

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORULARDA SÜRTÜNME KAYIPLARININ AZALTILMASININ DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Ali KARTAL**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ PAÇACI**

**EKİM 2021**

**T.C  
İNÖNÜ NİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORULARDA SÜRTÜNME KAYIPLARININ AZALTILMASININ DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Ali KARTAL  
(36183615071)**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ PAÇACI**

**EKİM 2021**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu çalıőmanın her aőamasında yardım, öneri ve desteğini esirgmeden beni yönlendiren, bilgisini paylaşan, hayat tecrübesiyle bana ışık tutan çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI' ya

Hem maddi hem manevi her koőulda yanımda olan aileme, arkadaşlarıma, en çok da her düőtüęümde ayağa kaldıran, sırtımda hep elini hissettiğim kız arkadaşım Mevra ÇEKEN 'e sonsuz teşekkür ederim.



## ONUR SÖZÜ

Doktora veya yüksek lisans tezi olarak sunduđum “Tez Bařlıđı” bařlıklı bu çalıřmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dűőecek bir yardıma bařvurmaksızın tarafımdan yazıldıđına ve yararlandıđım bűtűn kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yűntemine uygun biçimde gűsterilenlerden oluřtuđunu belirtir, bunu onurumla dođrularım.

Muhammed Ali KARTAL



# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT .....	viii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR.....</b>	<b>2</b>
2.1.Literatür Taraması.....	2
2.2. Laminer ve Türbülent Akış.....	7
2.3. Reynolds Sayısı ve Önemi.....	8
2.4. Sınır Tabaka ve Türleri.....	8
2.5. Borularda Laminer ve Türbülent Akış İçin Basınç Düşmesi .....	11
2.6. Bernoulli Denkleminin Türetilmesi .....	13
2.7. Sürtünme Azaltmanın Önemi .....	18
2.8. Sürtünme Azaltma Çalışmalarında Deneysel Parametreler.....	19
2.8.1. Polimer konsantrasyonunun etkileri.....	19
2.8.2. Polimer molekül ağırlığının etkileri .....	19
2.8.3. Boru çapının etkileri.....	19
2.9. Katkı Maddesi Kullanılarak Sürtünme Azaltma Yöntemleri .....	20
2.9.1. Polimer çözeltileri ile sürtünme azaltma .....	20
2.9.2. Yüze aktif madde çözeltileri ile sürtünme azaltma .....	23
2.10. Diğer Sürtünme Azaltma Yöntemleri.....	24
2.10.1. Mikro kabarcık ile sürtünme azaltma .....	24
2.10.2. Manyetik akışkanlarla sürtünme azaltma .....	25
2.10.3. Fiber ile sürtünme azaltma.....	25
2.11. Polimer ve Yüze Aktif Katkı Maddelerinin Karşılaştırması .....	26
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>27</b>
3.1. Materyal ve Metod .....	27
3.2. Deney Düzenegi .....	27
3.4. Deneyde Kullanılan Kimyasalların Özellikleri.....	30
3.4.1. Poliakrilamit .....	30
3.4.2. Xanthan gum .....	30
3.4.3. Karboksimetilselüloz .....	31
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>32</b>
4.1. Poliakrilamit Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları .....	36
4.2. Karboksimetilselüloz Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları.....	41
4.3. Xanthan Gum Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları.....	46
4.4. Sürtünme Azaltıcı Maddelerin Etkileri.....	51
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>62</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1</b> : Direnç düşürücü polimerler.....	<b>21</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : Hidrolik devre bağlantı elemanları.....	<b>27</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Türbülent su akışında katkı maddesi ilavesi olmadan düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları.....	<b>32</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : Türbülent boru akışında xanthan gum katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç değerleri.....	<b>32</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : Karboksimetilselüloz katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları.....	<b>34</b>
<b>Çizelge 4.4</b> : Poliakrilamit katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları.....	<b>35</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	: Katı cidar üzerinde gelişmekte olan sınır tabakaları .....	10
Şekil 2.2	: Laminer ve türbülanslı akışlarda sınır tabakaları.....	10
Şekil 2.3	: Moody diyagramı.....	12
Şekil 2.4	: Genel akış sistemi.....	14
Şekil 2.5	: Boru hattında pompa kullanımı.....	15
Şekil 2.6	: Sürtünme azaltma metodları.....	20
Şekil 3.1	: Hidrolik bench düzeneği.....	28
Şekil 3.2	: Deneyde kullanılan tankın şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.3	: Deneyde kullanılan hidrolik sistemin şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.1	: 50 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	37
Şekil 4.2	: 100 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	38
Şekil 4.3	: Keskin dirsek boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	39
Şekil 4.4	: Küresel vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	40
Şekil 4.5	: Sürgülü vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	41
Şekil 4.6	: 50 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi .....	42
Şekil 4.7	: 100 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi .....	43
Şekil 4.8	: Keskin dirsek boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi .....	44
Şekil 4.9	: Küresel vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	45
Şekil 4.10	: Sürgülü vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	46
Şekil 4.11	: 50 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi .....	47
Şekil 4.12	: 100 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	48
Şekil 4.13	: Keskin dirsek boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi .....	49
Şekil 4.14	: Küresel vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	50
Şekil 4.15	: Sürgülü vana Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	51
Şekil 4.16	: Sürgülü vana için Reynolds sayısının ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı % DR değişimi .....	52
Şekil 4.17	: 50 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı % DR değişim.....	52
Şekil 4.18	: 100 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı % DR değişimi.....	53
Şekil 4.19	: Keskin dirsek için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı % DR değişimi .....	54
Şekil 4.20	: Küresel vana için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı % DR değişimi .....	54
Şekil 4.21	: 10000 Reynolds değerinde karboksimetilselülozün konsantrasyona bağlı %DR değişimi.....	55

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b><i>f</i></b>	: Darcy sürtünme faktörü
<b><math>\epsilon</math></b>	: Pürüzlülük
<b>V</b>	: Hız
<b><math>\acute{o}</math></b>	: Hacimsel debi
<b><math>\mu</math></b>	: Viskozite
<b><math>\rho</math></b>	: Yoğunluk
<b>DR</b>	: Sürtünme azaltma
<b>D</b>	: Boru çapı
<b>P</b>	: Basınç
<b>A</b>	: Yüzey alanı
<b>F</b>	: Kuvvet
<b>Re</b>	: Reynolds sayısı
<b>XG</b>	: Xanthan Gum
<b>PAA</b>	: Poliakrilamid
<b>CMC</b>	: Karboksimetilselüloz
<b>ppm</b>	: Konsantrasyon
<b>u</b>	: Ortalama hız
<b>DRA</b>	: Sürtünme azaltıcı madde



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BORULARDA SÜRTÜNME KAYIPLARININ AZALTILMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Ali KARTAL

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

62+viii sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI

Yaşayan bir insan için kan damarları ne kadar hayati önem taşıyorsa, üretim yapan bir işletme için de boru sistemleri aynı önemi taşır. Boru içi türbülanslı akışlarda oluşan sürtünme kayıpları basınç kayıpları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu basınç kayıplarının azaltılması, pompanın harcayacağı enerjiyi azaltarak doğrudan maliyeti düşürmek için oldukça önemlidir.

Bu tezde poliakrilamit, karboksimetilselüloz ve xanthan gum katkı maddeleri kullanılarak boru içi akışta sürtünme kayıpları deneysel olarak incelenmiştir. Farklı konsantrasyonlar (75, 150, 225, 300 ppm)'da 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds sayılarında; sürgülü vana, keskin dirsek, küresel vana, 100 mm çaplı ve 50 mm çaplı borularda çalışmalar yapılmıştır. Poliakrilamit ile %5-35, karboksimetilselüloz ile % 5-57,4 ve xhantan gum ile % 5-50 oranında sürtünmenin azaltılabileceği bulunmuştur. Ayrıca konsantrasyon ve Reynolds sayısının artmasıyla sürtünme kayıplarının azaldığı kaydedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme kayıpları, sürtünme azaltıcı katkı maddeleri, boru içi akışlar

## ABSTRACT

Master Thesis  
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DRAG REDUCTION IN PIPES

Muhammed Ali KARTAL

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Chemical Engineering

62+viii sayfa

2019

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI

Just as blood vessels are vital for a living person, piping systems are equally important for a manufacturing company. Friction losses occurring in turbulent flows within the pipe appear as pressure losses. Reducing these pressure losses is very important to reduce the direct cost by reducing the energy that the pump will consume.

In this thesis, frictional in pipe flows were experimentally investigated by using polyacrylamide, carboxymethylcellulose and xanthan gum additives. For different concentrations (75, 150, 225, 300 ppm) and for 4500, 6000, 7000, 8000 and 10000 Reynolds numbers; studies were carried out on gate valves, sharp bends, ball valves, pipes with 100 mm diameter and pipes with 50 mm diameter. It was found that drag reduction can be reduced by polyacrylamide, carboxymethylcellulose and xanthan gum with in the range of 5-35%, 5-57,4% and 5-50% respectively. As a result, it was observed that as the concentration and Reynolds number increased, frictional losses decreased.

**Keywords:** Drag Reduction, flow in pipe, polymer and surfactan additived.

# 1. GİRİŞ

Genel olarak sürtünme, hızı düşürmeye çalışan bir direnç kuvveti olarak basitçe tanımlanmaktadır. Yüksek hızlarda ve dolayısıyla yüksek Reynolds sayılarında oluşan akış türbülanslı akış olarak tanımlanmaktadır. Türbülanslı akış çok karmaşık bir yapıya sahip olduğundan bu tür akışta her noktada sürekli hız ve basınç değişimleri vardır. Borularda akış esnasında basınç düşmesi ile doğrudan ilişkili olan sürtünmeye özel önem göstermek gerekmektedir. Çünkü bu basınç düşmesi pompalama gücü ihtiyacını belirlemek için kullanılmaktadır. Borulama sisteminde kullanılacak pompanın gücünün belirlenmesi borulardaki akış kayıplarının yanında devre üzerindeki dirsek sayı ve açısı, vana tipleri ve sayısı, boruların devreye bağlanma açısı gibi birçok parametreye bağlıdır.

Katkı maddelerinin sürtünmeyi azaltması üzerine olumlu etkileri altmış yılı aşkın bir süredir bilinmektedir. Gerek laminer gerekse türbülent akışlarda yüksek ve düşük ağırlıklı polimerler, lifler, katyonik-anyonik-zwitteriyonik yüzey aktif maddeler gibi katkı maddelerinin eklenmesiyle türbülanslı akışlarda sürtünmenin azalabildiği bilim adamları tarafından keşfedilmiştir. Bu spesifik konunun ilk keşfi 1948 yılında Toms tarafından yapılmıştır. Bu nedenle katkı maddelerinin sürtünmeyi azaltma davranışı “ Toms olgusu ” olarak bilinmektedir. Toms; polimerik bir çözeltinin, çözücüye kıyasla daha az sürtünme gösterdiğini keşfetmiştir. Toms'un çalışmasından sonra birçok bilim adamı bu özel konuya odaklanmış ve sürtünmeyi azaltmanın temellerini anlamak için teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Bilim adamlarının yapmış olduğu çalışmalar sonucunda türbülanslı bir akışa katkı maddelerinin eklenmesiyle türbülanslı akışın düzensizliği azalmıştır. Son on yıla kadar deneysel ve simüle etmek için hesaplama gücünün olmaması nedeniyle sadece teorik çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, farklı konsantrasyon ve Reynolds sayılarında üç farklı polimerin türbülanslı boru akışı üzerinde sürtünme azaltması deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen değerler literatürdeki diğer yapılan çalışmalardaki değerler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR

### 2.1.Literatür Taraması

Zeybek'in yapmış olduğu çalışmada, tam gelişmiş türbülanslı boru akışında sürtünme azaltma deneyleri 200 ile 500 ppm konsantrasyonlarda karboksimetilselüloz denenerek araştırılmış ve basınç düşüşü ile sürtünme azalması belirlenmiştir. Ayrıca polimerin varlığının akış üzerindeki etkisini gözlemlemek için Ultrasonik Doppler Velosimetri (UDV) kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısına göre grafiği, her polimer çözeltisi için sürtünme azaltma seviyesini göstermiştir. Polimer konsantrasyonunun sürtünmenin azaltılması üzerindeki etkisi herhangi bir Reynolds değerinde daha düşük sürtünme faktörü olarak ortaya çıkmıştır. Polimer konsantrasyonu arttıkça daha yüksek sürtünme azalması sağlanmış ve bu değer yüksek türbülanslı akışlarda daha belirgin hale gelmiştir. 500 ppm karboksimetilselüloz çözeltisi kullanıldığında sürtünmede azalma oranı %22 olarak elde edilmiştir ( Zeybek, 2005).

Mowla ve Naderi 'nin yapmış olduğu çalışmada, sürtünme azaltıcı madde olarak kullanılan Polialfa-olefin (Poliizobütilen) varlığının ham petrol akışını sağlayan yatay borulardaki basınç düşüşü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 10.3 m uzunluğunda pürüzsüz bir polikarbonat boru ve 8.8 m uzunluğunda kaba bir galvanizli demir boru kullanılmıştır. Sürtünme azaltıcı madde varlığında elde edilen deneysel veriler kullanılarak yüzde sürtünme azalması (%DR) hesaplanmış ve %40 oranında sürtünme azalması elde edilmiştir ( Mowla ve Naderi, 2006).

Yaari ve arkadaşları, 0.0254 m çapa sahip yatay bir boruda akan yağ-su karışımındaki sürtünmeyi azaltmak için bir takım çalışmalar yapmıştır. Yüksek karışım hızında ve akış düzeninde sürtünme azaltıcı maddeye bağlı olarak basınç gradyanında önemli bir azalma görülmüştür. Bazı durumlarda suda çözünür polimer çözeltisinin eklenmesi ile sadece 10-15 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda yaklaşık %65 oranında bir sürtünme azalması sağlanırken, sürtünme azaltıcı madde 5 ppm enjekte edilerek %33 oranında bir sürtünme azalması elde edilmiştir (Yaari ve arkadaşları, 2009).

Kim ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada sürtünme azaltıcı katkı maddesi olarak Polietilen oksitler kullanılmıştır. Polimer konsantrasyonunun ve moleküler ağırlığının sürtünme azaltma üzerine etkisi dört moleküler ağırlık ( $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $9 \times 10^5$  ve  $4 \times 10^6$ ) ve konsantrasyonlar (1, 5, 10 ve 20 ppm) kullanılarak incelenmiştir. Reynolds sayısı 30.000

ile 60.000 arasında değişmiş olup bu çalışmada incelenen aralıktaki tüm moleküler ağırlıklar ve polietilenoksit yapıları için %20 oranında bir sürtünme azalması elde edilmiştir. Maksimum sürtünme azaltma oranı  $4 \times 10^6$  moleküler ağırlık ve 20 ppm konsantrasyonda %50 olmuştur. Genel olarak sonuçlar sürtünme azaltma etkisinin artan moleküler ağırlık ve Reynolds sayısı ile artma eğiliminde olduğunu göstermektedir (Kim ve arkadaşları, 2009).

Hadri ve Guillou'nun yapmış olduğu çalışmada 75 ppm setil tri metil amonyum klorit ilavesi ile sürtünme azalması incelenmiştir. Basınç düşüşü ölçümleri için parçacık görüntüleme hız lm (PIV) sistemi kullanılmış, sürtünmeyi azaltan türbülanslı akıştaki basınç düşüşünün hıza bağlı olduğu görülmektedir. Parçacık görüntüleme hız ölçümü sonuçlarına göre çok düşük konsantrasyonda dahi yüzey aktif madde çözeltisinin eklenmesiyle türbülans özelliklerinin güçlü bir şekilde etkilendiği elde edilmiştir. Bu sistem ile yaklaşık %75 oranında bir sürtünme azalması kaydedilmiştir (Hadri ve Guillou, 2010).

Wei-guo'nun yapmış olduğu çalışmada iki boyutlu bir kanalda yüzey aktif katkı maddelerinin sürtünme azaltma üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Parçacık Görüntü Hız lm (PIV) sistemi ile yüzey aktif katkı maddesi olarak setil tri metil amonyum klorür kullanılmıştır. Konsantrasyonu 25 ppm olan ve  $Re = 25000-40000$  değerlerinde % 68.5 oranında maksimum sürtünme azalması elde edilmiştir ( Wei-guo, 2012).

Khalaf ve Shua'abın yapmış olduğu çalışmada anyonik yüzey aktif madde olan sodyum dodesil sülfat, sodyum nitrat ile karıştırılarak 50 ile 2000 ppm konsantrasyonda sürtünmeyi azaltan bir katkı maddesi olarak kullanılmıştır. 30 C sabit sıcaklıkta, 6 mm iç çapa sahip boru ve farklı çözelti akış hızında ( $8 \text{ m}^3 / \text{h}$ ) değerlere bakılmıştır. 2000 ppm yüzey aktif madde - karşı iyon sulu çözeltisi kullanılarak yaklaşık %66 oranında maksimum sürtünme azalma yüzdesi elde edilmiştir. Ayrıca kritik bir Reynolds sayısının aşılmaması gereken yaklaşık 96000'e eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü daha fazla artış sürtünme azalmasında belirgin bir fark oluşturmayacaktır (Khalaf ve Shua'ab, 2012).

Hadi ve Khadom'un yapmış olduğu çalışmada sürtünme azaltıcı katkı maddelerinin Irak ham petrolünün boru hatlarındaki akışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katkı maddesi olarak

sodyum dodesil benzen sülfat ve sodyum lauril sülfat kullanılmıştır. Katkı maddesi tipinin ve konsantrasyonunun, boru çapının, çözelti akış hızının ve dirseklerin varlığının sürtünme azaltma yüzdesi ve akış artış miktarı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Maksimum sürtünme azaltma oranı 0.0508 m çapa sahip düz boruda akan 250 ppm yüzey aktif maddesinde %55 olarak kaydedilmiştir (Hadi ve Khadom, 2013).

Yaday ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada sürtünmeyi azaltan katkı maddesi olarak setil piridinyum klorür kullanılmış ve suyla karıştırılarak bir çözelti hazırlanmıştır. Homojen olmayan berrak çözelti 100, 300, 600 ve 700 ppm konsantrasyonlardaki çözeltileri hazırlamak için uygun şekilde seyreltilmiştir. 600 ppm konsantrasyon değerinde %26 oranında sürtünme azalması elde edilmiştir (Yadav ve arkadaşları, 2013).

Drzazga yapmış olduğu çalışmada iyonik olmayan yüzey aktif maddelerinin su ve metal oksit nanoakışkan içindeki sürtünme azaltma üzerindeki etkisini incelemiştir. İki noniyonik yüzey aktif madde (Rokacet O7 ve Rokanol K7) ve bakır (II) oksit su bazlı nanoakışkan kullanılmıştır. 4 mm çaplı bir boru kullanılmış ve Reynolds sayısı 8000 ile 50000 arasında değişerek sürtünme faktörleri belirlenmiştir. Sonuçlar iyonik olmayan yüzey aktif maddelerin eklenmesinin su ve nano sıvıdaki sürtünme faktörünün azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Sürtünme azaltma etkisi her iki durumda da benzerlik göstermektedir. Nanopartiküllerin sistemde bulunmasının sürtünme azaltma etkisi üzerinde büyük bir etkisi yoktur (Drzazga, 2013).

Abubakar ve arkadaşlarının çalışması, 30.6 mm çaplı yatay bir boruda akan tek fazlı sudaki sürtünme azaltıcı polimerlerin performansı üzerindeki etkisi hakkında deneysel bir araştırmaya dayanmaktadır. Yüksek molekül ağırlıklı polimer, sürtünme azalması elde etmek için 2-40 ppm konsantrasyon aralığında ana çözeltiliye farklı akış hızlarında eklenmiştir. Sürtünme azalması polimer konsantrasyonu ile 10 ppm'e kadar yükselmiş ve bunun üzerindeki bir değerde sürtünme azalmasında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Bu değerdeki sürtünme azalması polimer molekül ağırlığı ile artarken maksimum sürtünme azalması polimer konsantrasyonundaki artıştan etkilenmemiştir. Anyonik polimerler için maksimum sürtünme azalması %5 ile %13 arasındaki yük yoğunluğunda %60 iken bu değer %25' lik yük yoğunluğuna sahip polimer için yaklaşık %38'e düşmüştür (Abubakar ve arkadaşları, 2014).

Dai ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada Poliolefin ve yüzey aktif maddeyi birleştiren araştırmada yüzey aktif maddenin kayma önleyici katkı maddeleri olarak potansiyeli araştırılmıştır. Yüzey aktif madde içeren dört örnek hazırlanmış sürtünme azaltma ve kayma önleyici performans deneysel döngü ile analiz edilmiştir. Yüzey aktif madde ilavesinin yüzey aktif madde misel sürtünme azaltma etkisinin neden olduğu sürtünme azalmasını güçlendirebileceği gösterilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda %40 oranında sürtünme azalması elde edilmiştir (Dai ve arkadaları, 2015).

Tamano'nun çalışmasında noniyonik yüzey aktif madde olan oleil dimetil aminoksit kullanılmıştır. Oleil dimetil aminoksit çözeltisinin konsantrasyonu ağırlıkça 100, 500 ve 1000 ppm olarak ayarlanmıştır. Sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı ilişkisini elde etmek, boru akışındaki basınç düşüşü ve debi ölçümleri için kapalı devre iç çapı 24.8 mm olan vinil klorür borudan oluşan deney düzeneği kullanılmıştır. Sonuç olarak %60 oranında sürtünme azalması elde edilmiştir (Tamano, 2015).

Dawood'un yapmış olduğu çalışmada karboksimetilselüloz ve sodyum dodesil benzen sülfonatın sulu bir çözelti olarak sürtünme azaltma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 50, 100, 200 ve 300 ppm konsantrasyonlarında deneyler yapılmış ve iki farklı PVC boru (1" ve 3/4") kullanılmıştır. Sonuçlar, karboksitmetilselüloz ile sodyum dodesil benzen sülfonatın karıştırılmasının tek tek kullanımdan yaklaşık %58 daha fazla sürtünme azaltma yüzdesi sağladığını göstermiştir. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Reynolds sayısı, boru çapı ve polimer-yüzey aktif madde konsantrasyonları sürtünme azalmasını etkileyen faktörler olarak bilinmektedir (Dawood, 2016).

Huang'ın yapmış olduğu bu çalışmada çözücü olarak musluk suyu ve katyonik yüzey aktif madde olarak setil trimetil amonyum klorür kullanılmıştır. Deneyde farklı Reynolds sayılarında çeşitli kütle konsantrasyonlarına sahip (0.16, 0.22, 0.31, 0.47 mmol / L) setil trimetil amonyum klorür çözeltisi hazırlanmıştır. %60-80 arası oranda sürtünme azalması sağlandığı kaydedilmiştir (Huang, 2016).

Liu çalışmasında 3m uzunluğundaki bir boruda yüzey aktif madde ve polimerlerin sürtünme azaltması üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüzey aktif madde olarak setil tri metil amonyum klorid ve sodyum salisalit kullanılmış, polimer olarak ise iyonik olmayan

poliakrilamid kullanılmıştır. Reynolds sayısı 10.000 olarak hesaplanmış ve çalışmada 100 ppm sürfaktan ve 60 ppm polimer kullanılmıştır. Yüzey aktif madde kullanılarak yapılan işlemde maksimum sürtünme azalmasının %71.49, polimer kullanılarak yapılan işlemde ise sürtünme azalmasının %50.15 oranında olduğu kaydedilmiştir (Liu, 2018).

Sokhal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Arap zankı ve Guar zankı kullanarak su / yağ emülsiyonunun oluşumu ve bunların sürtünme yüzdesi azalmasına etkisini incelemiştir. Polimerler kullanılarak iki farklı ana emülsiyon çözeltisi hazırlanmıştır. Arap zankı konsantrasyonu 1000 ile 5000 ppm arasında değişirken ana çözeltide guar zankı konsantrasyonu 500 ile 3000 ppm arasında değişmiştir. Guar zankının, Arap zankına kıyasla daha az konsantrasyonla daha kararlı olduğu bulunmuştur. %50'lik bir sürtünme azalması elde edilmiştir (Sokhal ve arkadaşları, 2019).

Sokhal ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada çeşitli Reynolds sayıları (10000-45000) ile katkı maddesi konsantrasyonlarında (100-300 ppm) basınç düşüşü üzerindeki etkisini bulmak için bir biyopolimer Arap zankı kullanmıştır. 19.50 mm iç çapa ve 3045 mm uzunluğa sahip bir boru üzerinde deneyler yapılmış, polimer çözeltisinin konsantrasyonu ve Reynolds sayısı olası maksimum sürtünme azalmasını elde etmek için parametre olarak kullanılmıştır. Arap zankının 300 ppm konsantrasyonunda maksimum sürtünme azalması %62.15 olarak kaydedilmiştir (Sokhal ve arkadaşları, 2019).

Mohammadtabar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada suda çözünebilen birkaç polimerin sürtünme azaltma performansını araştırmıştır. Üç dereceli poliakrilamid ve bir polietilen oksit içeren esnek moleküler yapıya sahip polimerler ve her biri katı bir moleküler yapıya sahip olan xhantan gum ve karboksimetilselüloz araştırılmıştır. Türbülanslı bir boru akışındaki basınç düşüşü ölçümleri kullanılarak her bir polimer çözeltisinin sürtünme azaltması belirlenmiştir. Poliakrilamid çözeltileri %50-58 oranında bir sürtünme azalması ile sonuçlanırken Polietilenoksit %44 ve sert polimerler %12 oranında sürtünme azalması sağlamıştır (Mohammadtabar, 2020).

Edomwonyi ve Otu'nun yapmış olduğu çalışmada doğal ve sentetik polimerlerin yatay yağ-su akışları sırasındaki sürtünme azaltıcı maddelerin sinerjik etkisini incelemiş ve 12 mm iç çaplı polivinilklorür (PVC) boru kullanılmıştır. Kısmen hidrolize poliakrilamid, polietilen oksit, aloe vera müsilağı karışımı kullanılmış ve Reynolds sayısı 62923 olarak



hesaplanmıştır. Deneyde 30 ppm ve 400 ppm konsantrasyonlarda çalışılmış test sıvısı olarak mazot kullanılmıştır. Sonuçlar poliakrilamid-aloe vera musilajı ve polietilenoksit-aloe vera musilajı karışımları için sırasıyla %65.39 ve %69.23, %69.23 ve %70.77 oranlarında sürtünme azalmasının sağlandığını göstermiştir (Edomwonyi ve Otu, 2020).

Huang'ın yapmış olduğu bu çalışmada yüzey aktif madde ve mikro oluğun sinerjik etkisinin sürtünme azaltma performansı deney ile doğrulanmıştır. Farklı sıcaklıklarda iki uzunlamasına mikro oluk kanalında 0.16 - 0.47 mmol/L setiltrimetil amonyum klorür /Nazal yüzey aktif madde çözeltisinin sinerjik sürtünme performansları araştırılmıştır. Yüzey aktif madde çözeltisinin sürtünme azaltma etkisinin 20 °C'de mikro oluk ile arttırılabileceği ve pürüzsüz bir kanalla karşılaştırılabileceği bulunmuştur. Maksimum sürtünme azaltma oranı G1 kanalı için %5 ve 0.22 mmol/L setil trimetil amonyum klorür çözeltisi için G2 kanalında %8 arttırıldığı kaydedilmiştir (Huang, 2020).

## **2.2. Laminer ve Türbülent Akış**

Laminer akışta akışkan parçacıklarının hareketi oldukça düzenlidir ve tüm parçacıklar boru duvarlarına paralel düz çizgiler halinde hareket etmektedir. Tek başına akışkan parçacıkların yörüngeleri kendisine komşu olan parçacıkların yörüngelerini kesmez ve küçük hızlarda oluşmaktadır. Laminer akışta viskoz kuvvetler daima atalet kuvvetlerinden daha büyüktür. Boru içerisinden akan sıkıştırılmaz bir akışkanın akışı atalet ve viskoz kuvvetlerinin etkisi altında kalmaktadır ancak akışkanın farklı kısımları arasındaki piyezometrik basınç farklarının meydana getirdiği kuvvetler dışında normal olarak diğer kuvvetlerin etkisi altında değildir. Laminer akış düşük hızlarda ve bu nedenle düşük Reynolds sayılarında oluşan bir akış türüdür. Türbülanslı akış ise yüksek hızlarda ve büyük Reynolds değerlerinde meydana gelmektedir. Laminer akışta viskoz kuvvetler hakim iken türbülanslı akışta atalet kuvvetleri önemini arttırmaktadır. Hız arttırıldığı anda girdaplar yavaş yavaş değil birden başlar ve laminer olan akış kararsızlaşır. Türbülanslı akış hız, basınç ve diğer parametrelerde düzensiz dalgalanmaların ortaya çıktığı zaman içinde rastgele değişen parçacık yörüngelerine sahip bir akışkan hareketidir. Türbülans, sıvının fiziksel bir özelliğinden ziyade akışın bir özelliği olduğundan türbülansın gerçekleştiği her durumda türbülansı sürdürmek için bir enerji kaynağı gerekmektedir. Türbülanslı akıştaki enerji kayıpları aynı hızdaki laminer akıştaki enerji kayıplarından daha büyüktür. Boru içi akışlar genel olarak türbülanslıdır ve bu nedenle oldukça karmaşıktır. Boru içi akışlar Reynolds sayısına bağlı olarak değişmekte ve aynı zamanda hızdaki dağılımlarda farklılık

göstermektedir. Laminer akışta boru merkezinden cidara olan mesafede hız dağılımı değişmektedir. Türbülanlı akışta ise bu hız dağılımı sadece boru merkezi ve cidarı arasında değişmeyip türbülans üssü dediğimiz n sayısının artması ile düzleşmektedir (Uysal, 2003).

### 2.3. Reynolds Sayısı ve Önemi

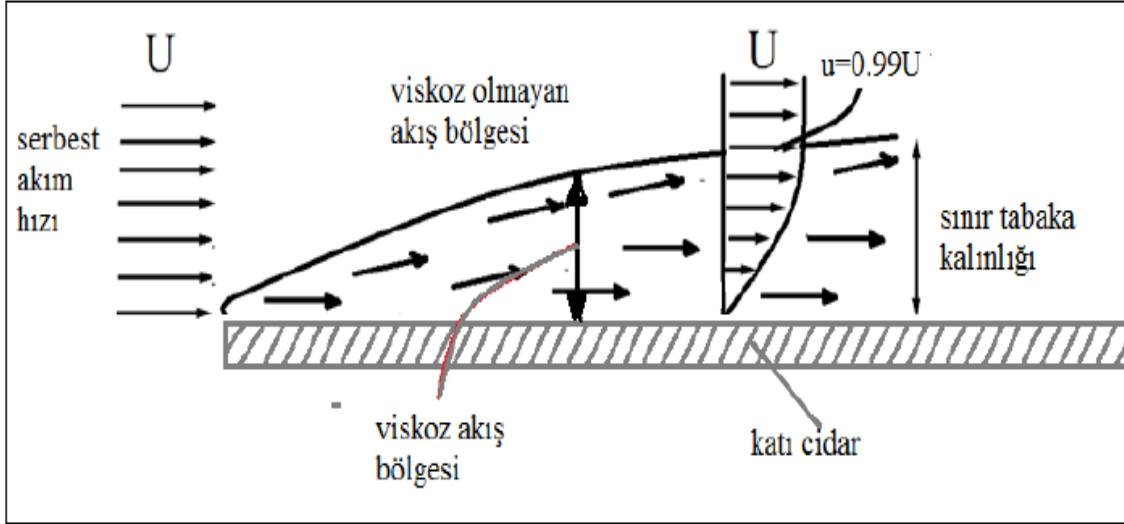
“ $\rho Lu / \mu$ ” ile gösterilen atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı Osborne Reynolds tarafından bulunmuştur ve “Reynolds” sayısı olarak bilinmektedir. Bu boyutsuz değer akışkanlar mekaniği ve birçok alanda büyük bir öneme sahiptir. Burada “ $\rho Lu / \mu$ ” oranı temel bir akış karakteristiğidir. Reynolds sayısında gösterilen L uzunluğu ve u hızı temsil etmektedir. Bu terimler karakteristik olarak seçilen niceliklerdir. Seçilen uzunluk ve hız, Reynoldsun sayısal değerini etkilemekte fakat asıl anlamını etkilememektedir. Birçok uygulamada düşünülen uzunluk ve hız standart bir duruma getirilmiştir. Örnek olarak dairesel bir boruda akış için karakteristik uzunluk, çap ve karakteristik hız da ortalama hız olarak bilinmektedir. Bilindiği üzere Reynolds sayısı yalnız viskozite ve atalet kuvvetleri ile değil aynı zamanda piyezometrik basınç farklarından kaynaklanan kuvvetler ile de ilgilenmektedir. Atalet kuvvetleri akış bir bütün olarak daimi ve yönünü değiştirmese bile vardır. Viskoz ve atalet kuvvetlerinin en önemli olduğu durumlarda deneysel gözlemleri karşılaştırmak için kullanılan parametre Reynolds sayısıdır.  $\rho Lu / \mu$  bağıntısından görüleceği üzere  $\rho$ , L veya u’ nun büyük bir değeri veya  $\mu$  nün küçük bir değeri büyük bir Reynolds değerini vermektedir. Zıt olarak küçük bir Reynolds değeri yüksek viskozite veya küçük yoğunluk, küçük hız veya küçük boyut ile elde edilmektedir. Büyük bir Reynolds değerinde viskoz kuvvetleri sadece küçük bir rol oynarken atalet kuvvetleri oldukça baskındır. Öte yandan Reynolds değer olarak küçük iken viskoz kuvvetleri hakimdir ve atalet kuvvetleri bunun yanında küçük kalmaktadır ( Atılğan, 1996).

### 2.4. Sınır Tabaka ve Türleri

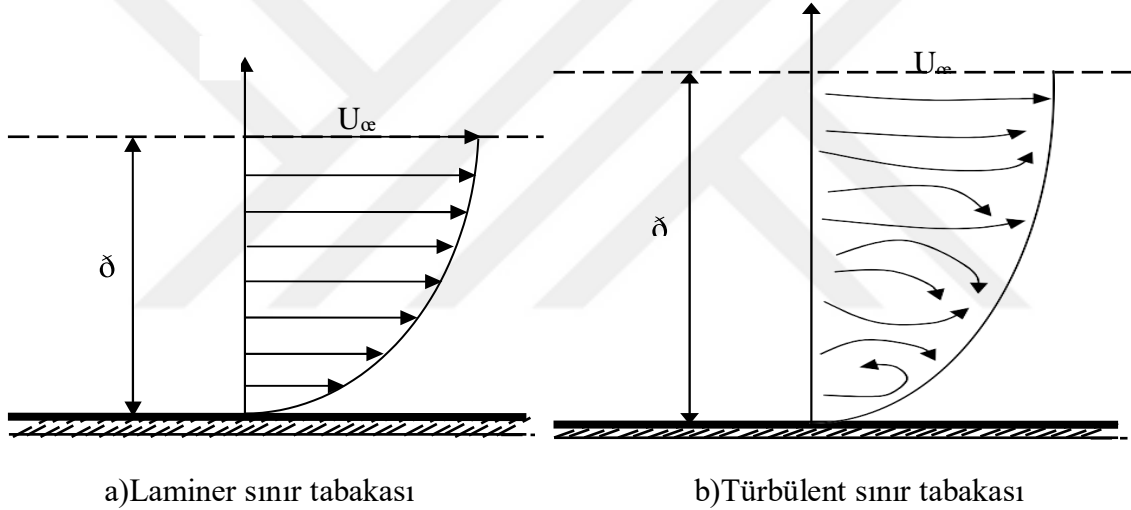
Genel olarak viskozitenin akışkan tabakalarının birbiri üzerinde kaymaya karşı gösterdikleri direncin bir tür ölçüsü olduğu söylenebilmektedir. Benzer direnç durumu akışkanla - katı cidar arasında da olmaktadır. Bir akışkan bir katı cisim etrafından akarken veya bir cisim bir akışkan içerisinde hareket ederken cisim akışkana akışkan da cisme temas yüzeyleri boyunca teğetsel kuvvetler ile etki etmektedir. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar göstermektedir ki böyle bir hareket içerisinde temas yüzeyinin bütün noktalarında katı cismin hızı ile akışkanın ortalama hızları aynı değere sahiptir. Farklı bir şekilde ifade edecek

olursak akışkanın katı cisme göre hızı sıfır olmaktadır. Cisme en yakın tabakalarda neredeyse durma hızlarında olan akışkan partikülleri daha üst tabakalardaki biraz daha hızlı komşu akışkan kitlelerine teğetsel kuvvetler ile etki ederek onların yavaşlamasına neden olmaktadır. Komşu tabakalar arasındaki bu etkileşim cisimden uzaklaştıkça azalacak biçimde sonsuza kadar devam etmektedir. Bir katı cidar civarında akım hızlarının bu şekilde azalması doğrudan viskozitenin sonucu olmaktadır. Viskozitenin olmaması halinde yani sürtünmesiz akımda bu etkinin bulunmayacağını söylemek mümkün olmaktadır. Aslında bütün akışkanlar viskoz yani sürtünmelidir denilmektedir. Prandtl, viskozite etkisinin bir katı cidar yakınında dar bir bölgede çok fazla olduğunu ve bu bölgenin dışına çıkınca etkinin ihmal edilebilir mertebelere indirildiğini tespit ederek bir cisim etrafındaki akım alanının farklı karakterde iki bölge halinde incelenmesinin uygun olacağını ortaya koymaktadır. Bu bölgelerden katı cidara yakın olan ve akım hızlarının azaldığı bölgeye sınır tabaka adını vermiş viskozite etkilerinin ihmal edilebilir mertebelere indirildiği dış bölgeye ise sürtünmesiz akım bölgesi adını vermiştir. Sınır tabaka genellikle akım hızlarının viskoz olmayan bölgedeki akım hızlarının %99'u ve daha altındaki mertebelerde olduğu bölge olarak kabul edilmektedir. Katı cidardan itibaren akım hızının sürtünmesiz akım hızının %99'una eşit olduğu tabakaya kadar olan mesafe de sınır tabakanın kalınlığı olarak tanımlanmaktadır (Duyar, 2011).

Sınır tabakalar laminer ve türbülanslı olarak iki şekilde bulunmaktadır. Laminer olarak başlayan sınır tabaka belirli bir süre sonra başlangıç noktasından belli bir uzaklıkta türbülanslı hale geçmektedir. Laminer sınır tabakanın türbülanslı hale geçtiği bölgeye “geçiş bölgesi” adı verilmektedir. Sınır tabakanın laminer veya türbülanslı oluşunu tanımlayabilmek için makroskobik seviyedeki akışkan kitlelerinin hareketine bakmak gerekmektedir. Makroskobik büyüklükteki akışkan partiküllerinin yörüngeleri boyunca düzgün bir akış halinde ise ve yörüngeler arasında makroskobik boyutta bir karışma gerçekleşmiyorsa bu tür sınır tabakaya “laminer sınır tabaka” adı verilmektedir. Makroskobik büyüklükteki akışkan partiküllerinin hareketinde bir düzensizlik var ise buna “türbülanslı sınır tabaka “ denilmektedir. Sınır tabaka içerisindeki her bir noktada ortalama bir hız yanında, yüksek frekanslı ani hızlar söz konusu olmaktadır. Tanecikler genel akım doğrultusunda ortalama bir hareket yaparken rastgele doğrultularda ve rastgele hızlarda ani hareketler de yapmaktadır. Ani hız doğrultuları rastgele olduğundan türbülanslı sınır tabakanın tabakaları arasında kütle transferi ve oldukça kuvvetli bir karışım da söz konusu olmaktadır. Geçiş bölgesinde ise hem laminer hem de türbülanslı sınır tabakanın her ikisine birden rastlanmaktadır (Duyar, 2011).



Şekil 2.1 : Katı cidar üzerinde gelişmekte olan sınır tabakaları



a) Laminer sınır tabakası

b) Türbülent sınır tabakası

Şekil 2.2 : Laminer ve türbülanslı akışlarda sınır tabakaları

Şekil 2.1 ve 2.2 de laminer ve türbülent sınır tabakaları gösterilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi laminer sınır tabakasında akışın sabit ve düzenli olduğu aynı zamanda sınır tabakasının kalınlığı görülmektedir. Türbülent sınır tabakasına baktığımızda ise laminer akıma göre ne sabit ne de düzenli olduğunu söyleyebiliriz. Akış içerisinde girdaplar oluştuğu görülmektedir. Sınır tabakanında laminer sınır tabakasından daha kalın olduğu görülmektedir. Newton yasasına göre akış içerisinde ki yüksek hız gradyanları nedeniyle cismin yüzeyinde bir sürtünme olacaktır. Sürtünme akışının miktarı akış tipine bağlıdır. Türbülanslı akıştaki girdaplı yapı nedeniyle iç ve dış katmanlar arasında önemli düzeyde enerji alışverişi vardır.

Bu nedenle enerji alışverişlerini ve dolayısıyla duvara yakın hız gradyanlarını en aza indirmek için bu girdapları yok ederek bir sürtünme azalması elde edilebilir. Bu duvara yakın uyumlu yapıları ortadan kaldırmak için farklı yöntemler vardır. Polimerler, lifler, yüzey aktif maddeler vb. katkı maddelerine ek olarak aktif kontrol teknikleri de vardır. Bu yüksek lisans tezinde, polimer katkı maddeleri ile sürtünme azaltılmasına odaklanacağız (Duyar, 2011).

## 2.5. Borularda Laminer ve Türbülent Akış İçin Basınç Düşmesi

Borularda basınç düşmesi  $\Delta P$ , fan ve pompaların güç hesabı için oldukça önemlidir. Artan basınç kaybı pompa tarafından karşılanması gereken kayıp enerji olarak değerlendirilebilmektedir. Bu daha güçlü elektrik motoru ve daha fazla enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir.

Boruda ortalama akış  $V_{ort}$ :

$$V_{ort} = \frac{R^2}{8\mu} \left( \frac{dP}{dx} \right) \quad (2.1)$$

Basınç düşmesi  $\Delta P$ :

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2.2)$$

Laminer akış için basınç düşmesi;

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu L V_{ort}}{R^2} = \frac{32\mu L V_{ort}}{D^2} \quad (2.3)$$

Burada R boru yarı çapı, D boru çapı,  $\mu$  ise akışkanın viskozitesidir. Denklem (2.3) incelendiğinde basınç düşmesinin akışkanın viskozitesiyle doğru orantılı olduğu ve sürtünme yoksa basınç düşmesinin olmayacağı görülmektedir. O halde viskoz akışlarda basınç düşmesinin çok artacağını ve pompa gücünün de büyüyeceğine dikkat edilmelidir.

Uygulamada tam gelişmiş tüm akış türleri (laminer veya türbülanslı) dairesel veya dairesel olmayan borular, pürüzlü veya pürüzsüz yüzeyler veya eğimli borular için basınç kaybı;

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{ort}^2}{2} \quad (2.4)$$

biçiminde gösterilir. Burada  $\rho V_{ort}/2$  ifadesi dinamik basınç, f ise Darcy sürtünme faktörüdür.

Dairesel borudaki tam gelişmiş laminer akış için için sürtünme faktörü

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{ort}} = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

Bu denklem laminer akışta sürtünme faktörünün sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğunu ve boru yüzeylerindeki pürüzlülüğün bağımsız olduğunu göstermektedir. Bu durum aynı zamanda hızın belirli değerinin altında olması durumunda akış sürtünmelerinin azalacağını da bir göstergesidir.

Akışkanın boru duvarında ki sürtünme nedeni ile uğradığı enerji kaybı sürtünme kaybı olarak adlandırılır ve “ $h_{fs}$ ” ile gösterilir.

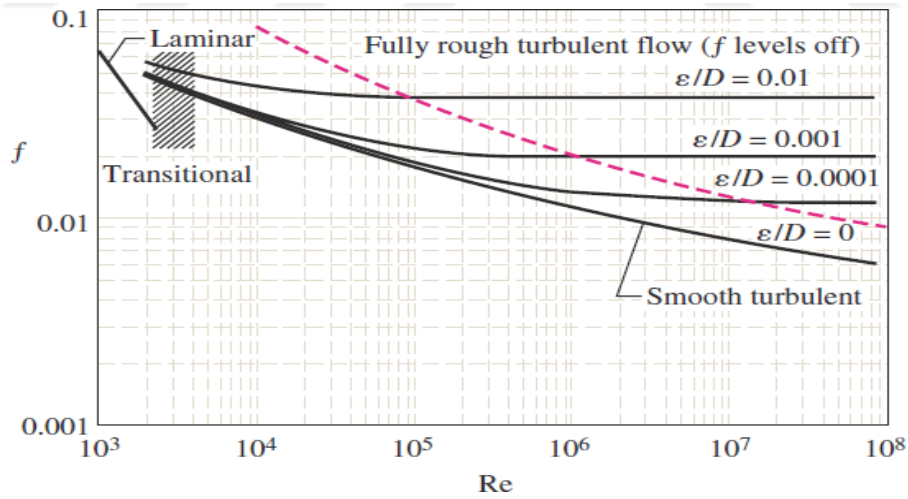
$$h_{fs} = 2f \frac{L v^2}{D g_c} \quad (2.6)$$

denklemini ile hesaplanır.

Türbülanslı akışta boru içerisindeki akışta sürtünme Reynolds sayısına ve boru pürüzlülüğünün ortalama yüksekliğinin boru çapına oranı olan bağıl pürüzlülük  $\epsilon/D$ 'ye bağlıdır. Türbülanslı akışın bu bağımlılığı teorik olarak ifade edilemediği için ampirik bağıntılar kullanılmaktadır. Coolbrook pürüzlü ve pürüzsüz borularda geçiş ve türbülans akışlar için mevcut olan bilgileri birleştirmiş ve Coolbrook denklemi olarak adlandırılan aşağıdaki kapalı denklemi elde etmiştir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.7)$$

Coolbrook denklemi kullanılarak  $f$  ve  $Re$  ye bağlı olarak çizilmiş diyagrama Moody diyagramı denmektedir.



Şekil 2.3 : Moody diyagramı

Şekil 2.3 incelendiğinde çok büyük Reynolds sayılarında, Moody diyagramındaki sürtünme faktörü eğrileri hemen hemen yataydır ve dolayısıyla sürtünme faktörleri Reynolds sayısından bağımsızdır. Denklem 2.7 deki Coolbrook denklemi  $f$ 'ye göre kapalı bir

fonksiyon olduğu için iterasyon gerektirmektedir.  $f$  'nin yaklaşık açık bağıntısı denklem 2.8 de verilmektedir (Yükselen, 2012).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left( \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right) \quad (2.8)$$

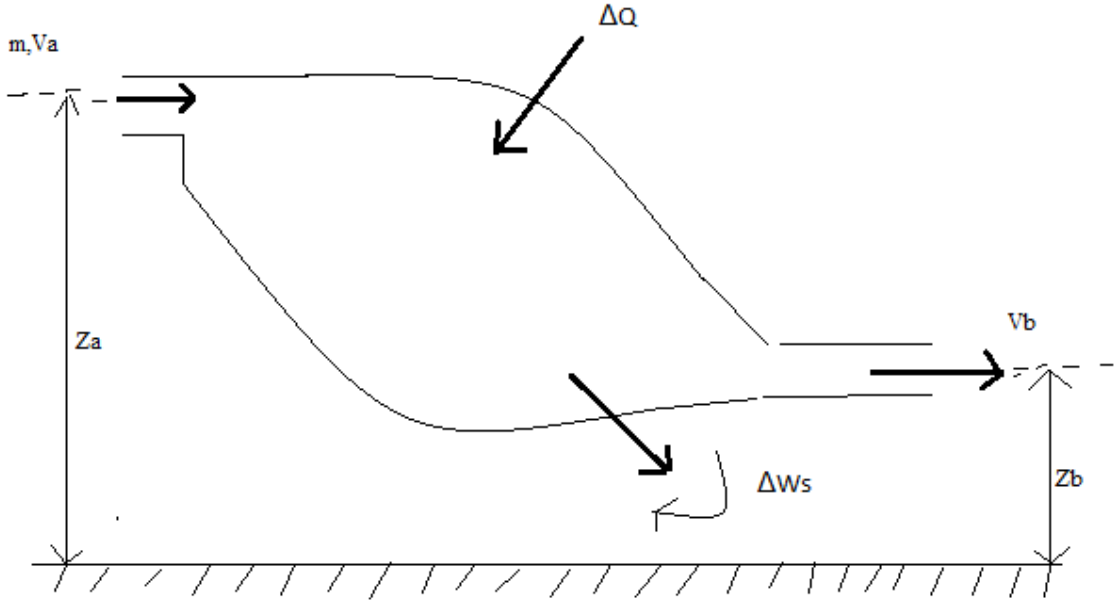
Yukarıda ki kısımda, boru içinde akış için sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybının nasıl hesaplanabileceği anlatılmıştır. Ancak bir boru hattının tasarımı için bu yeterli değildir. Diğer kayıpları, akışkanın potansiyel ve kinetik enerjisinde ki değişikliklerin etkisini ve kullanılıyorsa pompanın katkısını da dikkate alan Bernoulli denkleminde faydalanmak gerekir.

## 2.6. Bernoulli Denklemine Türetilmesi

Bernoulli prensibine göre yatay bir akım çizgisi boyunca noktalarda daha yüksek basınç bölgeleri daha düşük sıvı hızına ve daha düşük basınçlı bölgeleri ise daha yüksek sıvı hızına sahiptir. Bernoulli prensibini, yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine akan bir sıvının hareket yönü boyunca net kuvvet nedeniyle hızlanacağı gerçeği olarak düşünülebilir. Bernoulli denklemi, esasen yerçekimi potansiyel enerjisindeki değişiklikleri de hesaba katan Bernoulli prensibinin daha genel ve matematiksel bir şeklidir (Uysal, 2003).

Bir sisteme akışkanın giriş hattı seçilen herhangi bir referans seviyesinden  $z_a$  kadar yükseklikte olduğu ve çıkış hattı da  $z_b$  yüksekliğinde olduğu kabul edilmektedir. Sisteme giriş hattında ki ortalama hız ( $V_a$ ) ve çıkış hattında ki ortalama hız da ( $V_b$ ) şeklinde ifade edilmektedir. Genel yaklaşım içinde sisteme  $\Delta Q$  miktarında bir enerji girişi olsun ve sistemin çevre üzerinde yaptığı iş de  $\Delta W_s$  olarak ifade edilmektedir. Böyle bir sistem için enerji korunumu denkliği genel olarak aşağıda ki gibi ifade edilebilir;

$$(\text{Enerji giriş hızı}) - (\text{Enerji çıkış hızı}) = (\text{Enerji birikim hızı}) \quad (2.9)$$



Şekil 2.4 : Genel akış sistemi

Denklemler 2.9 sürtünmesiz akış şartları için yazıldığında,

$$m_a \left\{ \Delta Q + \left[ P_a V_a + U_a \frac{g}{g_c} z_a + \frac{V_a^2}{2g_c} \right] \right\} - \left\{ \Delta W_s + \left[ P_b V_b + U_b + \frac{g}{g_c} z_b + \frac{V_b^2}{2g_c} \right] \right\} m_b = \Delta E \quad (2.10)$$

elde edilir. Kararlı hal şartlarında  $\Delta E = 0$  ve  $m_a = m_b$  olduğundan,

$$\Delta Q - \Delta W_s = \left\{ \left[ (P_b V_b + U_b) - (P_a V_a + U_a) \right] + \frac{g}{g_c} (z_b - z_a) + \frac{V_b^2 - V_a^2}{2g_c} \right\} m \quad (2.11)$$

ve ya entalpinin tanımı kullanılarak;

$$\Delta Q - \Delta W_s = \left\{ (H_b - H_a) + \frac{g}{g_c} (z_b - z_a) + \frac{V_b^2 - V_a^2}{2g_c} \right\} m \quad (2.12)$$

yazılabilir. Birim kütleli hız ( $m=1$ ) için diferansiyel farklar cinsinden,

$$\Delta Q - \Delta W_s = \left\{ \Delta H + \frac{g}{g_c} \Delta z + \frac{\Delta V^2}{2g_c} \right\} \quad (2.13)$$

olarak yazılabilmektedir. Sistemin küçülerek, giriş ve çıkış noktalarının birbirine sadece küçük diferansiyel mesafe kadar yaklaştığı kabul edilirse ( $\Delta \rightarrow d$ ) denklem aşağıdaki diferansiyel denklem halini almaktadır;

$$dQ - dW_s = \left\{ dH + \frac{g}{g_c} dz + d \left( \frac{V^2}{2g_c} \right) \right\} \quad (2.14)$$



Akışın sürtünmesiz olduğu varsayımı yapıldığından, denge halinden çok az farklı bir durumda bulunduğu kabulü yapılabilir ve bu şartlarda akış tersinir bir proses gibi kabul edilebilmektedir. Tersinir prosesler için sisteme giren veya çıkan ısı enerjisi sadece iç enerjiyi ve genişleme işini etkileyeceğinden,

$$dQ = dU + PdV \quad (2.15)$$

yazılabilir. Ayrıca entalpinin tanımı da kullanılarak,

$$dH = dU + d(PV) = dU + PdV + VdP \quad (2.16)$$

denklem (2.16) aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$dU + PdV - dW_s = dU + PdV + VdP + \frac{g}{g_c} dz \left( \frac{V^2}{2g_c} \right) \quad (2.17)$$

veya

$$-dW_s = VdP + \frac{g}{g_c} dz + d \left( \frac{V^2}{2g_c} \right) \quad (2.18)$$

Bu ifade  $m=1$  için yazıldığından,

$$V = \frac{\text{Hacim}}{\text{Birim kütle}} \rightarrow \frac{1}{V} = \rho \rightarrow V = \frac{1}{\rho} \quad (2.19)$$

V yerine  $(1/\rho)$  yazılabilir,

$$-dW_s = \frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c} dz + d \left( \frac{V^2}{2g_c} \right) \quad (2.20)$$

Bu denklemin giriş ve çıkış noktaları arasında integrasyonu yapılırsa,

$$-W_s = \int_a^b \left\{ \frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c} dz + d \left( \frac{V^2}{2g_c} \right) \right\} \quad (2.21)$$

ve

$$-W_s = \frac{P_b - P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} (z_b - z_a) + \frac{(V_b^2 - V_a^2)}{2g_c} \quad (2.22)$$

elde edilir. Bu ifade genellikle tercih edilen şekliyle,

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_a + \frac{V_a^2}{2g_c} - W_s = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_b + \frac{V_b^2}{2g_c} \quad (2.23)$$

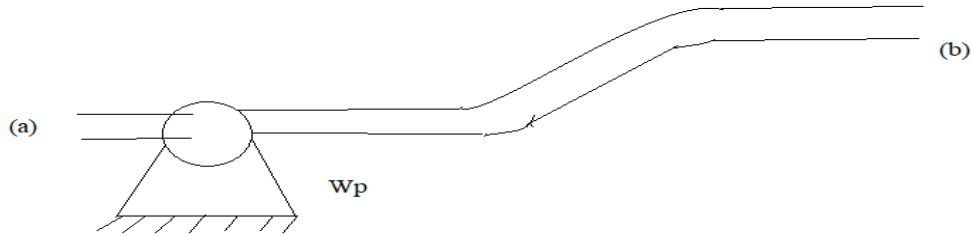
olarak yazılır (Uysal, 2003).

Bernoulli denklemi çıkartılırken termodinamik yaklaşımın genel seçimine uygun olarak  $W_s$  sisteminin çevresi üzerinde yaptığı mil işi olarak tanımlanmaktadır. Halbuki akışı sağlamak için ve akışkanın basıncını arttırmak amacıyla akış hattında bir pompa kullanmak gerekmektedir. Başka bir ifadeyle akışkana bir güç sağlanmaktadır. Bir pompanın motoru çalıştırılmak için elektrik hattına bağlandığında elektrik hattından çekilen bu güç  $W_p$ ' dir. Elektrik hattından sağlanan bu gücün tamamı akışkana aktarılamamaktadır. Enerjinin bir kısmı motor ile pompa arasında ki aktarma organlarında ve pompanın içinde ki sürtünme

kayıpları ve piston veya dönen pompa kısımlarının sürtünme kayıpları için harcanmaktadır. Bu tür mekanik sürtünme kayıpları  $h_{fp}$  ile gösterilirse akışkana aktarılan güç,

$$W_p - h_{fp} = \eta W_p$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada “  $\eta$  ” pompa verimi olarak tanımlanır ve 1’den küçük bir sayıdır;



**Şekil 2.5 : Boru hattında pompa kullanımı**

$$\eta = \frac{W_p - h_{fp}}{W_p} < 1 \quad (2.24)$$

Böylece denklem

$W_s = -\eta_p W_p$  yazılırsa,

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_a + \frac{V_a^2}{2g_c} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_b + \frac{V_b^2}{2g_c} \quad (2.25)$$

elde edilir (Uysal, 2003).

Boru gibi kapalı bir kesit alanına sahip sistemde akış için hız pozisyonun bir fonksiyonudur.  $v=v(r)$ . Ayrıca hız duvarda sıfıra düştüğünden akışkan tarafından duvara bir kuvvet uygulanmakta ve duvarda sürtünme kayıplarına yol açmaktadır. Bu iki husus için Bernoulli denkleminde düzeltmeler yapılması gereklidir (Uysal, 2003).

Bernoulli denkleminde ki terimler ve bu arada kinetik enerji terimi ( $\frac{V^2}{2g_c}$ ) birim kütle için enerjisi [ J/kg ] ifade etmektedir. Boru içinde hız radyal yönde değiştiğinden, akışkanın taşıdığı kinetik enerjisi de kesit alanı boyunca değişir. Diferansiyel bir kesit alanı için kütleli akış hızı,

$$dm = \rho V dS \quad (2.26)$$

ve bunun kinetik enerjisi de,

$$dE_K = (\rho V dS) \frac{v^2}{2g_c} = \rho \frac{v^3}{2g_c} dS \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şayet  $\rho$ =sabit ise,

$$dE_K = (\rho V dS) \frac{v^2}{2g_c} = \rho \frac{v^3}{2g_c} dS \quad (2.28)$$

yazılabilir. Birim kütlese hız için kinetik enerji ise,

$$\frac{E_K}{m} = \frac{\frac{\rho}{2g_c} \int_S v^3 dS}{\rho \int_S v dS} = \frac{1}{2g_c} \frac{\int_S v^3 dS}{(\int_S v dS)} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde hızın üçüncü kuvvetinin integrasyonu işleminin zorluğundan kaçınmak için kinetik enerji düzeltme faktörü ( $\alpha$ ) tanımlanıp aynı denklem şöyle yazılır;

$$\frac{E_K}{m} = \alpha \frac{(\int_S v^2 dS)}{2g_c} \quad (2.30)$$

Denklem 2.29 ve 2.30'un karşılaştırılmasından kinetik enerji düzeltme faktörünün tanımı

$$\alpha = \frac{\int_S v^3 dS}{(\int_S v dS)^2} = \frac{1}{S} \int_S \left[ \frac{v}{\int_S v dS} \right] dS \quad (2.31)$$

olarak yazılabilir. Denklem 2.31 kullanılarak hesaplanan  $\alpha$  değeri şöyledir;

Laminer akım için:  $\alpha = 2$

Türbülant akım için:  $\alpha = 1$

Bu düzeltme ile Bernoulli denklemi aşağıdaki hali halidir;

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\alpha_a (V_a)^2}{2g_c} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\alpha_b (V_b)^2}{2g_c} \quad (2.32)$$

Denklem 2.25' in geliştirilmesinde başta yapılan varsayım, akışkanın sürtünmesiz akış içinde olduğudur. Halbuki gerçekte akışkan sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybına uğramaktadır. Bunun yanı sıra akış hızında veya yönünde ki değişikliklerden dolayı olabilecek akım ayrılması nedeniyle biçim kayıpları da mümkündür. Tüm bu enerji kayıpları  $h_f$  ile gösterilirse bununda Bernoulli denklemine eklenmesi gerekir.

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\alpha_a(V_a)^2}{2g_c} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\alpha_b(V_b)^2}{2g_c} + h_f \quad (2.33)$$

## 2.7. Sürtünme Azaltmanın Önemi

Enerji kaynaklarımızın verimliliğini artıracak yeni teknolojilerin bulunması bilim insanları için önemli bir konu haline gelmiş ve bu konu hakkında çalışmalar yapılmaktadır. Boru taşımacılığında sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarının yaşanması böylelikle pompa veriminin azalması önemli bir sorun olarak görülüp, pompa veriminin artırılması için bir takım deneyler yapılmaktadır. Polimer ve yüzey aktif katkı maddeleri gibi sürtünme azaltıcılar kullanılarak sürtünmenin azaltılması sağlanmaktadır. Polimer katkı maddelerinin sürtünme azaltıcı madde olarak kullanılmasının ilk endüstriyel uygulaması Trans-Alaska Boru Hattı Sisteminde görülmüştür. Sürtünmeyi azaltan katkı maddelerinin en önemli ticari kullanımı, sürtünme direncini azaltmak için bunları bir boru hattındaki ham petrole enjekte etmektir. Trans-Alaska Boru Hattı Sisteminde mühendisler, akıştaki türbülanslı yapılardan kaynaklanan enerji kaybını belirli yöntemlerle azaltmayı amaçlamışlardır.

Pompa istasyonlarında yağa uzun zincirli hidrokarbon polimerleri enjekte ederek ilk testlere başladılar. İlk olumlu sonuçların alınmasının ardından sürtünme azaltıcı katkı maddeleri ile ilgili çalışmalar başlatılmıştır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda ham petrole az miktarda polimerik katkı maddesi eklenmesinin pompalama gücünü önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Aynı pompa basıncına sahip boru hatları ile ham petrol taşınırken sürtünme azaltıcı katkı maddelerinin enjeksiyonundan sonra bir sonraki pompa istasyonuna taşınan petrol miktarının arttığı düşünülmektedir. Kısaca katkı maddelerinin varlığında akış hızı artmakta ve bu durum aynı enerjiyi tüketirken taşınan ham petrol miktarının orijinal halinden çok daha fazla olacağı anlamına gelmektedir. Katkı maddelerinin sürtünmeyi azaltma özelliği şirketlerin enerji kaynakları için harcadıkları büyük miktarda maliyetten tasarruf etmelerini ve verimin artmasını sağlayacaktır. Trans-Alaska Boru Hattı Sisteminde yapılan

çalışmalar sonucunda elde ettikleri bilgilere göre sürtünme azalması ile günlük 1.44 varil ham petrolden günde 2.13 milyon varile yükseltildiği görülmektedir. Dolayısıyla bir boru hattı taşımacılığı için sürtünmeyi azaltan katkı maddelerinin kullanılmasının ne kadar önemli olduğu görülmektedir (Duyar, 2011).

## **2.8. Sürtünme Azaltma Çalışmalarında Deneysel Parametreler**

### **2.8.1. Polimer Konsantrasyonunun Etkileri**

Polimer konsantrasyonu boru içi akışlarda sürtünme azalmasının sağlanması için önemli bir parametredir. Lumley, polimer konsantrasyonunun etkisini gözlemlemek için aynı polimerin farklı konsantrasyonlardaki çözeltileri için aynı boruda deneysel bir çalışma yapmıştır (Lumley, 1969). Bu çalışma sonucunda, düşük konsantrasyonlarda dahi sürtünme azalması sağlanırken artan polimer konsantrasyonu ile polimer katkı maddesinin sürtünme azaltma etkisinin arttığı kaydedilmiştir (Zeybek, 2005).

### **2.8.2. Polimer Molekül Ağırlığının Etkileri**

Polimerin moleküler ağırlığı polimerin sürtünmeyi azaltmadaki etkinliğini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Molekül ağırlığı arttıkça düşük Reynolds sayısında sürtünme azalması başlar. Yüksek ve düşük moleküler ağırlıklara sahip polimerler türbülanslı bir akışın içerisine eklendiği zaman yüksek moleküler ağırlığa sahip polimer, düşük moleküler ağırlığa sahip polimere kıyasla daha düşük konsantrasyonlarda aynı sürtünme azalmasını sağlar. Zakin ve Hunston, polistirenin toluen içindeki moleküler ağırlık dağılımının sürtünme azaltma etkisini incelemiştir. Polistiren numunesinin moleküler ağırlıkları  $7.1 \times 10^6$ ,  $4.1 \times 10^6$  ve  $2.4 \times 10^6$  değerlerinde ayarlanmıştır. Sonuçlar sürtünme azalmasının polimerin moleküler ağırlık dağılımından etkilendiğini göstermiştir. Yüksek moleküler ağırlıkları daha yüksek sürtünme azalması sağlamıştır. Aynı polimer konsantrasyonunda (100 ppm) ve deney koşullarında,  $7.1 \times 10^6$  moleküler ağırlıklı polistiren çözeltisi % 63 oranında sürtünme azalması elde edilirken,  $4.1 \times 10^6$  ve  $2.4 \times 10^6$  moleküler ağırlığı sırasıyla %42 ve %18 oranlarında sürtünme azalması elde edilmiştir ( Zakin ve Hunston, 1980).

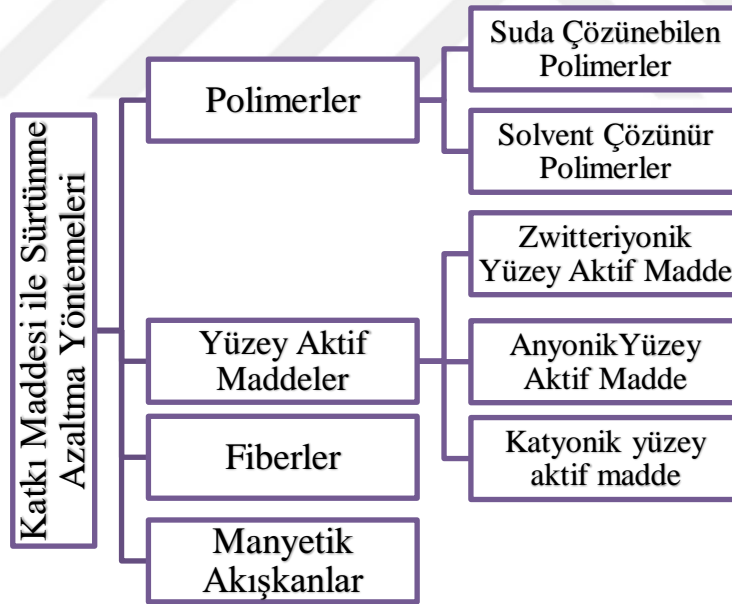
### **2.8.3. Boru Çapının Etkileri**

Boru çapı sürtünmeyi azaltmada bir diğer önemli parametredir. Virk ve arkadaşları, artan boru çapı ile sürtünme azalmasının sağlanabilmesi için daha yüksek polimer

konsantrasyonları kullanılması gerektiğini bildirmiştir(Virk ve arkadaşları,1975). Gasljević ve arkadaşları, bir polimer çözeltisinin sürtünme azalmasına etkisinin boru çapının küçülmesiyle daha belirgin hale geldiğini bulmuştur (Gasljević ve arkadaşları,1999). Çap arttıkça polimerin sürtünme azaltma kabiliyetini baskılayan daha büyük girdaplar gözlenmektedir ve bu girdaplar akış içerisinde daha fazla sürtünme oluşmasına neden olmaktadır (Zeybek, 2005).

## 2.9. Katkı Maddesi Kullanılarak Sürtünme Azaltma Yöntemleri

Boru içi akışlarda farklı parametrelere bağlı olarak gerçekleşen sürtünme kayıplarını azaltmak için birden fazla yöntem ve teknik kullanılmaktadır. Sürtünme azaltıcı maddeler polimerler, yüzey aktif maddeler, lifler ve mikro kabarcıklar gibi katkı maddelerini içermektedir. Bunlardan polimerin bir sürtünme azaltıcı madde olarak kullanılması en yaygın olanıdır. Çünkü önemli sürtünme azaltımı üretmek için sadece küçük konsantrasyonlara ihtiyaç vardır. Sürtünme azaltıcı maddelerin faydaları arasında düşük işletme maliyeti ve uygulama kolaylığı bulunmaktadır. Petrol ve doğalgazdaki uygulamaları, petrol ürünlerinin taşınmasından faz ayrılmasına kadar uzanmaktadır.



Şekil 2.6 : Sürtünme azaltma metodları

### 2.9.1. Polimer çözeltileri ile sürtünme azaltma

Sürtünme azaltma işlemi polimerin sıvıya eklenmesiyle sağlanabilmektedir. 19. yüzyılın sonlarında insanlar bazı nehir bölümlerinde çamurlu suyun temiz sudan daha hızlı akabildiğini keşfetmiştir. 1940'ların sonlarında Toms en eski sürtünme azaltıcı katkı maddesi olan polimetil metakrilatı bulmuştur. Araştırmacılar birbiri ardına başka katkı

maddeleri bulmuşlardır. Sürtünme azaltma maddesi olan polimerler suda çözünür ve solvent çözünür olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Suda çözünür sürtünme azaltıcı katkı maddesi poliakrilamid ve sentetik polioksietilen içermektedir. Solvent çözünür sürtünme azaltıcı katkı maddesi ise olefin kopolimeri ve poliizobüteni içermektedir.

Virk ve arkadaşları sürtünme azaltma maddesi eklemeyen önce ve eklendikten sonraki sıvı hızını ölçerek buna göre asimptot elde edildiğinde laminar akış ve türbülanslı akış arasında elastik bir tampon alanı olduğunu keşfetmiştir. İlk araştırmacılar elastik tampon alanının varlığının boruda hızın genişlemesine ve akış hızında artışa neden olduğunu böylelikle sürtünmeyi azaltma etkisini elde ettiğini düşünmüştür. Sıvı kinetik karakteristiğinin etkisine odaklanarak polimer, duvardaki çalkantılı yapıyı değiştirebilmektedir (Virk ve arkadaşları, 1967).

Abernathy yapmış olduğu deneyler sonucunda iki çıkarımda bulunmuştur. Birincisi; polimer katkı maddesi girdap oluşumunu engelleyebilir ve girdap sıklığını azaltabilir; diğeri ise polimer katkı maddesinin girdabın dönüş oranını düşürebilmesidir. İkisi birlikte sürtünme azalmasını sağlayabilir. Polimer katkı maddesi ile sürtünme azaltma mekanizması için deneysel sonuçlarla birleştirilerek bazı hipotezler ve analizler önerilmiştir ancak hala tüm deneysel ifadeleri açıklayabilecek birleşik bir teori yoktur (Abernathy, 1977).

Bugüne kadar polimer çözeltileri en çok çalışılan ve en çok kullanılan direnç azaltma sistemleridir. Sürtünmeyi azaltma için kullanılan birkaç tipik polimer Çizelge 2.1.' de gösterilmiştir (Truong, 2001).

**Çizelge 2.1 : Direnç düşürücü polimer çözeltileri**

<b>Suda Çözünebilen Polimerler</b>	<b>Solvent Çözünür Polimerler</b>
Polietilenoksit	Poliizobütilen
Poliakrilamid	Polistiren
Guar zankı	Polimetil metakrilat
Xhantan gum	Polidimetikoksan
Karboksimetil selüloz	Poli cis-izopren
Hidroksietil selüloz	

Polimer kullanılarak yapılan çalışmalar moleküler ağırlık ne kadar yüksek olursa belirli bir polimerin direnç düşürücü olarak o kadar etkili olduğunu göstermektedir. Ortalama molekül ağırlığı polietilenoksit  $2 \times 10^5$  ten  $5 \times 10^6$ 'nın üzerine çıkarıldığı zaman bir boru içerisinde yaklaşık %70 oranında bir sürtünme azaltmak için çözelti konsantrasyonları 600'den 100 ppm'e düşürülür. Başka bir deyişle molekül ağırlığı ne kadar yüksek ise belirli bir konsantrasyon ve Reynolds sayısı için sürtünme azalması o kadar büyük olur. Polimer zincirinin uzatılmasının sürtünmeyi azaltmak için çok önemli olduğu yapılan çalışmalar sonucunda doğrulanmıştır. Daha uzun polimer zinciri, akışla etkileşim için daha fazla imkan sağlar. En etkili sürtünme azaltıcı polimerler esas olarak belirli bir moleküler ağırlık sahip doğrusal yapıdadır. Polietilenoksit, poliizobütülen ve poliakrilamid doğrusal polimerlerin tipik örnekleridir. Arap zıncığı ve dekstranlar gibi doğrusal yapıya sahip olmayan polimerler sürtünme azaltma için çok etkin değildir (Hoyt, 1986).

Polimerlerin bir sürtünme azaltıcı madde olarak dikkat çekici bir yönü sürtünme azaltmasının ppm bölgesinde çok düşük konsantrasyonlarda meydana gelmesidir. 30-40 ppm üzerinde ki konsantrasyonun artırılması artan konsantrasyonla viskozitenin artması nedeniyle küçük bir tüpte polietilenoksit için sürtünme azaltmayı düşürür. Sürtünme azaltması 0.02 ppm'de dahi gözlemlenebilir.

McCormick ve meslektaşları tarafından bir dizi yeni suda çözünebilir polimerler sentezlenmiştir. Çok çeşitli yapı ve bileşimlere sahip polimerlerin kapsamlı analizlerini yapmışlardır. Bu polimerler hidrofobik olarak modifiye edilmiş poliakrilamid polimerler, anyonik ve katyonik polielektrolitler ve poliamfolitleri içerir. Bu suda çözünebilir polimerlerin sürtünme azaltma uygulamaları araştırılmıştır (Cormick, 1986).

Canlı organizmalar tarafından üretilen yüksek molekül ağırlıklı polisakkaritler gibi biyopolimerler etkili sürtünme azaltma sağlayabilir. Bazı tatlı su balığı ve deniz yosunu, sümüklü böcek diğer polisakkaritlerinin iyi sürtünme azaltıcı olduğu bulunmuştur (Shenoy, 1984).

Kim ve arkadaşları tuzlu suyun suda çözünür poliakrilik asitin sürtünme azaltma üzerinde ki etkisini araştırmıştır. Bu çalışma, sürtünme azaltmanın denizaltılar üzerindeki etkisi için oldukça önemlidir. Tuz, seyreltilmiş poliakrilikasitin verimliliğini artırır. Çünkü tuz molekülleri poliakrilikasit çözeltisinin sürtünme azaltma özelliklerini düşüren poliakrilikasitin zincirlerinin bozunmasını önlemektedir (Kim ve arkadaşları, 1988).



## 2.9.2. Yüzey aktif madde çözeltileri ile sürtünme azaltma

Yüzey aktif maddeler içinde çözüldükleri sıvının yüzey gerilimini değiştiren nispeten düşük moleküler ağırlıklı kimyasal maddelerdir. Çözelti içinde konsantrasyona, sıcaklığa, tuzluluğa vb. niceliklere bağlı olarak küresel miseller, çubuk benzeri miseller, kristaller, emülsiyonlar ve veziküller gibi çeşitli yapıları vardır (Kamel ve Shah, 2013).

Yüzey aktif madde sınıfları iyonik (anyonik, katyonik ve zwitteriyonik) ve iyonik olmayan yüzey aktif maddelerdir. Polimer ile karşılaştırıldığında mekanik bozulmaya karşı daha yüksek dirence sahiptirler ve termodinamik olarak kararlıdır. Bunun nedeni bozulduktan sonra kendi kendini onarabilmesidir (Lumley, 1973). Yüzey aktif maddelerin sürtünmeyi azaltmadaki etkinliği konsantrasyonuna, sıcaklığına, akış kanalının geometrisine, misel boyutuna ve bağ mukavemetine bağlıdır (Yaari, 2009). Bazı ilk araştırmacılar yüzey aktif maddeler tarafından sürtünmeyi azaltma mekanizmasını çözeltinin viskoelastik reolojisine bağlamıştır (Rose ve arkadaşları, 1989). Bununla birlikte viskoelastik olmayan yüzey aktif maddelerde sürtünme azalması gözlenmiştir. Yüzey aktif maddelerin sürtünme azaltıcı olarak hareket etme yeteneği iplik benzeri misellerin oluşumu ile ilişkilidir. Bu miseller yakın duvar bölgesindeki türbülanslı akışın yapısını değiştirir. Yüzey aktif madde sürtünme azalmasının kayma gerilimi altında miseller akış yönünde hizalandığında ve devasa bir ağ yapısı oluşturduğunda elde edildiği öne sürülmüştür. Bu radyal türbülansın sönümlenmesine ve ardından basınç kaybının azalmasına yol açmıştır. Farklı yüzey aktif maddeler kaymanın etkisi altında farklı tepki veya özellikler göstermektedir (Myska ve Mik, 2004). Yüzey aktif maddelerin sürtünme azaltıcı madde olarak etkinliği akıştaki bozulmalardan olumsuz etkilenir ancak yüzey aktif maddelerin bozulmalara duyarlılığı farklılık göstermektedir. Gasljevic ve Matthys tarafından bildirildiği üzere bükülmeden sonra yüksek akış hızından kaynaklanan girdapların olduğu bölgede yüzey aktif madde çözeltilerinin akışından ek sürtünme meydana gelmektedir (Gasljevic ve Matthys, 2009).

Katyonik yüzey aktif maddeler açık farkla en yaygın kullanılan sürtünmeyi azaltan yüzey aktif maddelerdir. Uygun karşı iyonlarla birleştirilmiş katyonik yüzey aktif maddeler etkili sürtünme azaltıcılardır. Anyonik yüzey aktif maddelerin sulu veya hidrokarbon çözeltilerinde uygulanabilirliği moleküler ağırlıklarına bağlıdır. Genel olarak düşük moleküler ağırlıklı yüzey aktif maddeler sürtünme azaltıcı maddeler olarak kullanılır. Çok düşük moleküler ağırlıklı anyonik yüzey aktif maddeler önemli yüzey etkisine sahip

olamayacak kadar çözüdür ve bu nedenle küçük sürtünme azalmasına neden olmaktadır (Jubran ve arkadaşları, 2005).

Zwitteriyonik yüzey aktif maddelerinin yüzey aktif kısmı üzerinde zıt yükler ve ayrıca imidazolinden türetilen bir alt grup taşır. Zwitteriyonik yüzey aktif maddeler katyonik olanlardan daha çevre dostudur. Bununla birlikte düşük konsantrasyonda, akıştaki sürtünme azaltma yeteneklerini engelleyebilecek etkilere karşı çok duyarlıdır. İyonik olmayan yüzey aktif maddelerinin iyonik yüzey aktif maddelerine kıyasla kimyasal, mekanik ve termal olarak kararlı oldukları bilinmektedir. Ayrıca iyonik olmayan yüzey aktif maddeler kalsiyum iyonlarının varlığında çökelmezler. İyonik olmayan yüzey aktif maddeler yalnızca sınırlı bir sıcaklık ve konsantrasyon aralığında uygulanabilir ve kimyasal bozunmaya duyarlı olabilir. Glikolik asit etoksilat, Arquad 16-50 setiltrimetilamonyum klorür (CTAC), Ethoquad O12, Soya-N ( $\text{CH}_3$ )<sub>3</sub>Cl ve sodyum oleat yaygın olarak kullanılan yüzey aktif maddelerinin bazı örnekleridir (Edomwonyi-Otu, 2005). Ayrıca kavisli borularda gözlemlenen yüksek kesme gerilmeleri nedeniyle yüzey aktif maddeler polimerlerden daha fazla türbülanslı akış için sürtünme azaltıcı olarak kullanılması uygundur. Yüzey aktif maddelerin özellikle ticari sıvı naklinde uygulanmasının bir sakıncası bunların korozyon eğilimleridir. Genel olarak yüzey aktif maddeler çelik borular için aşındırıcıdır. Örneğin anyonik yüzey aktif maddelerin etkili uygulama aralığı asit aralığı içindedir ve bu aşındırıcılıkları nedeniyle çelik borulardaki uygulamalarını sınırlamaktadır. Ticari uygulamalarını sağlamak için korozyon inhibitörleri eklemek gerekmektedir (Deyab, 2015).

## **2.10. Diğer Sürtünme Azaltma Yöntemleri**

### **2.10.1. Mikro kabarcık ile sürtünme azaltma**

Sürtünme azaltmada mikro kabarcıkların uygulanması polimerlere ve yüzey aktif maddelere kıyasla çevre dostu ve daha ucuzdur (Ortiz, 2002). Mikro kabarcıkların çapları 10 µm'den azdır ve daha büyük kabarcıklardan farklı davranışlar sergilerler. Bu farklılıklar daha uzun süreler boyunca sıvı fazda kalma eğilimi gibi kimyasal ve fiziksel özelliklerinde görülür (Shatat, 2009). Mikro kabarcıkların sürtünme azaltıcı madde olarak kullanılması üzerine yayınlanan ilk çalışma Mc Cormick tarafından yapılmıştır (Cormick, 1973). Mikro kabarcıklar tarafından sürtünmeyi azaltma mekanizması henüz iyi anlaşılmamıştır. Diğer sürtünme azaltma tekniklerine benzer şekilde, mikro kabarcık enjeksiyonunun amacı sınır tabakasının yapısını değiştirmektir. Mikro kabarcıkların hem laminer hem de türbülanslı sınır tabakası özelliklerini değiştirerek sürtünmeyi azalttığı öne sürülmüştür (Cormick,

1973). Hava kabarcıklarının enjekte edilmesinin kinematik viskozitede bir artışa ve tampon tabakadaki türbülanslı Reynolds sayısında bir azalmaya yol açtığı bildirilmiştir. Bu viskoz alt tabakanın kalınlaşmasına ve duvardaki hız gradyanında azalmaya neden olmaktadır. Ortiz, mikro kabarcıkların bir kanal akışının sınır tabakasına enjekte edilmesinin etkisini incelemek için parçacık görüntü hızı ölçümü (PIV) kullanmışlardır(Ortiz, 2002). Sonuçlarından bazıları polimerler veya yüzey aktif maddeler tarafından sürtünme azaltma davranışı ile bazı benzerliklerin olduğunu aynı zamanda mikro kabarcıklar kullanan daha önceki bazı araştırmaların raporlarıyla da uyumlu olduğunu göstermiştir. Sürtünme azalmasını sağlayan en önemli neden tampon tabaka içindeki kritik bir bölgede mikro kabarcıkların birikmesidir. Mikro kabarcıkların tampon tabakadaki türbülansla etkileşimi gözlemlenen sürtünme azaltımı ile ilişkilidir. Genel olarak mikro kabarcıkların enjeksiyonu sınır tabakasındaki kayma değişmeden kalırken türbülent enerjilerini azaltmaktadır. Özellikle viskoz alt tabakanın kalınlaşması ve türbülansın bastırılması ile ilgili olduğu için mikro kabarcık sürtünme azaltma mekanizması üzerinde etkili olduğu görülmektedir(Ayegba ve arkadaşları, 2020).

### **2.10.2. Manyetik akışkanlarla sürtünme azaltma**

Daha öncede vurgulandığı gibi viskoz sıvı akışına sahip katı bir ara yüzey sürtünme kuvvetleriyle ilişkili olarak büyük sürtünmeye neden olmaktadır. Bu metotta taşınan karışmayan viskoz bir sıvıyı kapsülleyen bir ferro akışkanı stabilize etmek için manyetik kuvvetler kullanılmaktadır. Bu sıvı içinde sıvı akışı taşınan sıvının kapsülleyici sıvınınkinden daha büyük veya daha küçük bir viskoziteye sahip olduğu bir aralıkta iki sıvı arasındaki viskozite oranıyla ayarlanabilen %80'den %99'un üzerine sürtünme düşüşü sergilemektedir (Dunne ve arkadaşları, 2020)

### **2.10.3. Fiber ile sürtünme azaltma**

Sulu ortamda hem kimyasal hem de mekanik olarak stabil olan fiberler kağıt yapımı endüstrisi, gıda endüstrisi ve elyaf takviyeli plastiklerin üretiminde önemli bir pratik öneme sahip olan birçok pratik uygulama için sürtünme azaltıcı madde olarak da kullanılır. En fiberli malzemeler boru maddeleri ve sıcaklıktan etkilenmediğinden geniş bir sıcaklık aralığına dayanabilirler. Sürtünme azaltıcı fiberlerin çevre kirliliğine neden olmadığı düşünülmektedir, çünkü herhangi bir malzeme ile reaksiyona girmezler ve toksik maddeler üretmezler. Lee ve arkadaşları fibersürtünmesinin azaltılabileceğine inanmışlardır. Fiber sistemlerin ve polimerlerin karışımlarından dolayı %95'lik bir sürtünme azalmasının

meydana geldiği gözlenmiştir (Lee ve arkadaşları, 1974). Sadece polimerlerin veya elyafların sürtünme azaltma değerleri karşılaştırıldığında bu sürtünme azaltma seviyesi daha yüksektir. Bununla birlikte bu ortamlarda fiberlerin kullanılması zordur. Çünkü yüksek konsantrasyonun bir sonucu olarak boru hatlarında tıkanma problemleri yaratabilirler (Duyar, 2011).

### **2.11. Polimer ve Yüzey Aktif Katkı Maddelerinin Karşılaştırılması**

Türbülanslı akışta sürtünme azaltıcı katkı maddesi olarak katyonik, anyonik ve zwitteriyonik yüzey aktif maddeler kullanılmaktadır ve bunlar üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda artmaktadır. Sürtünme azaltıcı katkı maddeleri genellikle girdaplı, türbülanslı akış sistemlerinde kullanılmaktadır. Polimerik ve katyonik yüzey aktif maddelerin akış davranışlarındaki farklılıklar Myska ve Zakin tarafından incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, polimer çözeltileri geri dönüşü olmayan bir şekilde bozunur ve sürtünme azaltma davranışlarını kaybeder. Katyonik yüzey aktif maddeler yüksek kayma gerilimi altında bozunur ancak yapılar onarılabılır ve yeniden kazanılabılırler (Myska ve Zakin, 1997).

Seyreltik polimer çözeltileri eşik kayma hızı aşıldığında sürtünmeyi azaltmaktadır. Yüzey aktif madde çözeltileri genellikle laminer akışta bir sapma gösterir ve eşik kayma hızına ulaşılan kadar sürtünmeyi azaltmaktadır. Yüksek konsantrasyonlu polimerler için maksimum sürtünme azaltma asimptotu ile tahmin edilenlerin önemli ölçüde altındaki sürtünme faktörlerine katyonik yüzey aktif madde sistemlerinde ulaşılabilir. Katyonik yüzey aktif maddeler için türbülanslı ortalama hız profilleri yüksek polimerler için elastik alt tabaka modeli tarafından tahmin edilen sınırdan önemli ölçüde daha iyi olabilmektedir (Duyar, 2011).

Polimerlerden daha yüksek seviyedeki sürtünme azaltımı sağlamasına rağmen yüzey aktif maddelerin kullanımı oldukça sınırlı olmaktadır. Yüzey aktif maddelerin dezavantajı polimerlere kıyasla olumsuz etki ortamlarıdır. Sabunun ham maddesi olan yüzey aktif maddeler çok fazla köpürdüğünden deneysel olarak incelenmesi ve yapılan deneylerin tekrarlanması borular tam olarak temizlenemediği için oldukça zordur.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Materyal ve Metod

Literatürde yapılan araştırmalara bakıldığında birçok katkı maddelerinin kullanımı ile birlikte borularda sürtünme azaltma işlemi sağlanabilir. Yapılan bu çalışmada üç farklı polimer kullanılarak borularda sürtünme azaltma deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölüm laboratuvarında yapılmıştır. Deney ekipmanı pompa, debiyi ölçebilmek için tankın üzerinde bulunan akış ölçer, basınç ölçümü için üzerinde ölçekli boruların olduğu bir sistemden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada akışkan olarak su kullanılmıştır.

#### 3.2. Deney Düzenegi

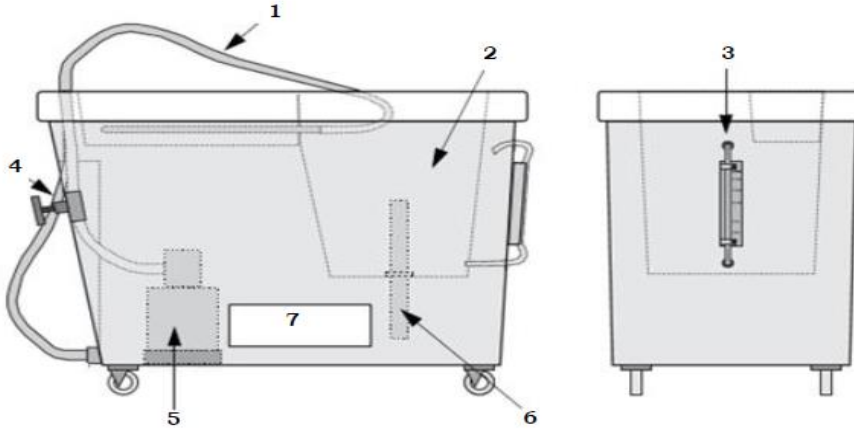
Bu deneyde kullanılacak düzenek (Hidrolik Şebeke) şematik olarak Şekil 3.1’ de gösterilmiştir. Sistem esas itibariyle iki ayrı hidrolik devreden oluşmaktadır. Bu devrelerden birisi koyu mavi renkli diğeri ise açık mavi renkli olarak temsil edilmiştir. Bu devrelerin birbirinden farkı esas itibariyle üzerinde bulunan muhtelif boru elemanları ile ilgilidir. Bu devrelerin her ikisine de aynı hidrolik benchten su beslemeleri yapılmaktadır. Her devrenin beslemesi ayrı bir vana ile kontrol edilmektedir. Her bir devrede bulunan temel elemanlar Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Hidrolik şebeke düzenegi Hidrolik Bench sistemiyle birlikte kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte daha büyük çaplı boru şebekelerindeki kayıpların hesabında da aynı prensipler geçerlidir. Bütün hallerde her bir eleman ile ilgili basınç değişimleri Piyezometre Tüpü Çiftleri yardımıyla ölçülür. Piyezometre Tüpü Çifti aslında bir “U” manometresidir. Koyu mavi ve açık mavi boru devrelerinin başında bulunan vanalardaki sürtünme kayıpları veya basınç değişimi ölçümleri için vananın giriş çıkış uçları arasına tüpler bağlanmıştır.

**Çizelge 3.1 : Hidrolik devredeki bağlantı elemanları**

<b>Koyu mavi devre</b>	<b>Açık mavi devre</b>
Sürgülü vana	Küresel vana
Keskin dirsek	100 mm çaplı 90° dirsek
90° dirsek	50 mm çaplı 90° dirsek



Şekil 3.1 : Hidrolik bench deney düzeneği.



Şekil 3.2 : Deneyde kullanılan tankın şematik gösterimi

1. Tezgah hortumu

2. Toplama tankı

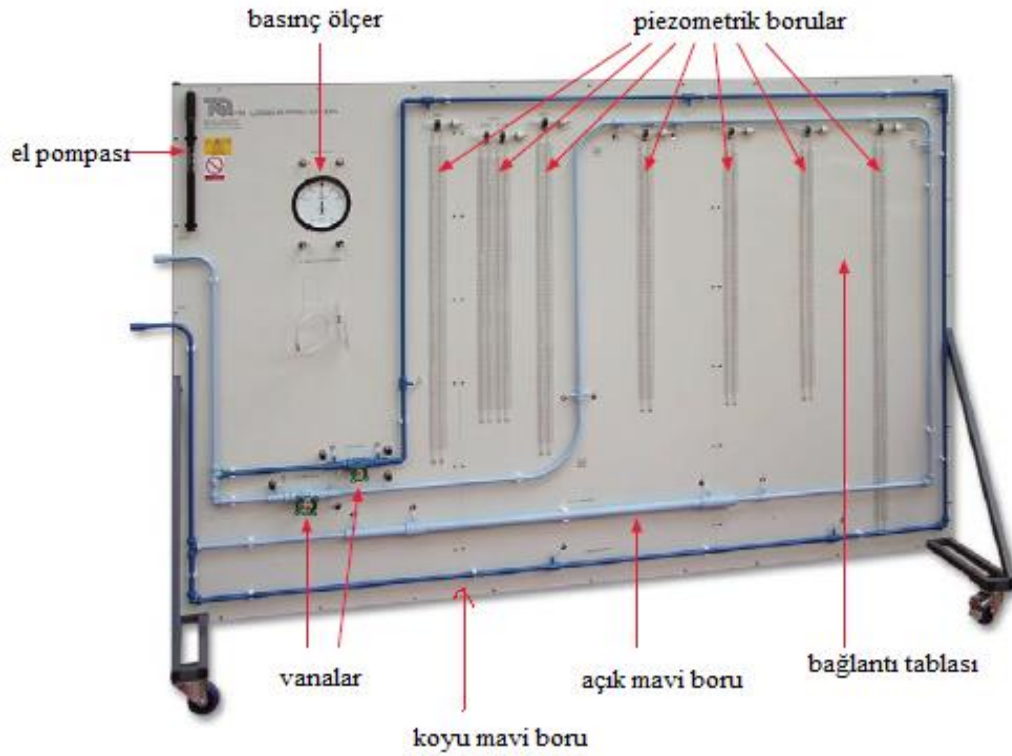
3. Hacim göstergesi

4. Akış kontrol vanası

5. Dalgıç pompa

6. Boşaltma musluğu

7. Rezervuar



Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan hidrolik bench sisteminin şematik gösterimi

### 3.3. Deneyin Yapılışı

Deney düzeneğine bağlı olan tankın içerisine belirli hacimde su eklenerek, tankın üzerindeki akış ölçer ile debi belirlenmiştir. Belirlenen debi ve diğer değişkenler (yoğunluk, viskozite, boru çapı, hız) kullanılarak Reynolds sayısı hesaplanmıştır. Tankın içerisine 75, 150, 225 ve 300 ppm konsantrasyonlarda hazırlanan sürtünme azaltıcı katkı maddeleri eklenip, hafifçe karıştırılarak homojenizasyon sağlanmıştır. Tankın içerisinde bulunan pompa çalıştırılarak borular vasıtasıyla akışkan akışı sağlanmıştır. Sırasıyla açık ve koyu mavi boru hatları açılarak akış esnasında manometrelerin gösterdiği basınç kayıpları kaydedilmiştir. Elde edilen basınç kayıpları denklem 3.1 de yerine konularak yüzde sürtünme azaltma değerleri hesaplanmış ve grafikler çizilmiştir.

$$\%DR = \frac{\Delta P_{su} - \Delta P_{DRA}}{\Delta P_{su}} \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.4. Deneyde Kullanılan Kimyasalların Özellikleri

#### 3.4.1. Poliakrilamid

Kısaca PAA olarak da adlandırılan poliakrilamid, genel olarak uçtan uca konfigürasyonla bağlanmış akrilamid monomerleri olan bir polimerdir. Oda sıcaklığında sert camsı bir katıdır. Üretim yöntemlerinin farklılığından dolayı ürünler beyaz toz, yarı saydam boncuklar ve pul pul olabilir. İyi bir termal kararlılığa sahiptir ve suda çözünür; sulu çözeltisi, polimerin artan moleküler ağırlığı artan viskozitesi ile berrak aynı zamanda şeffaftır. Ayrıca polimerin konsantrasyonunda ki değişiklik ile logaritmik bir ilişkiye sahiptir. Asetik asit, akrilik asit, etilen glikol, gliserol ve formamid gibi birkaç çözücü dışında genellikle organik çözünmezler.

Poliakrilamid, serbest akrilamid monomer radikalinin polimerizasyonu ile oluşur. Çözelti polimerizasyonu, ters emülsiyon polimerizasyonu, süspansiyon polimerizasyonu ve katı hal polimerizasyonu gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilir. Talep edilen ürün, kontrol edilebilir moleküler ağırlığa, suda iyi çözünürlüğe sahip olmalıdır.

Poliakrilamid, moleküler yapıda bulunan çok sayıda asılı amid grubu ile en yaygın olarak kullanılan suda çözünür polimer türlerinden biridir. Amid grubu, birçok türde bileşikle bir dizi türev oluşturabilen yüksek bir kimyasal aktiviteye sahiptir. Poliakrilamid, flokülasyon, kalınlaşma, sürtünmeyi azaltma, yapıştırıcı, koloidal stabilize etme, film oluşturma ve tortuyu önleme etkilerine sahiptir. Kağıt yapımı, madencilik, kömür yıkama, metalurji, petrol çıkarma ve diğer endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta ve ayrıca su arıtma için önemli bir kimyasaldır ( Xiong, 2018).

#### 3.4.2. Xanthan gum

Xanthan gum, fermente şekerlerin (glikoz, mannoz ve glukuronik asit) belirli bir bakteri türü ile karıştırılmasıyla elde edilen uzun zincirli bir polisakkarittir. Esas olarak emülsiyonları, köpükleri ve süspansiyonları kalınlaştırmak ve stabilize etmek için kullanılır. xanthan gum, çok çeşitli gıda ürünlerinin reolojik özelliklerini kontrol etmek için bir gıda katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. İmalatta xanthan gum diş macunlarında ve ilaçlarda koyulaştırıcı aynı zamanda stabilize edici bir madde olarak kullanılır. İlaç sanayisinde şeker hastalarında kan şekerini ve toplam kolesterolü düşürmek için ayrıca müsil olarak kullanılır. Xanthan gum, bazen ağız kuruluğu olan kişilerde (Sjogren sendromu) tükürük yerine kullanılır ( Petri, 2015).



### 3.4.3. Karboksimetilselüloz

Karboksimetilselüloz ya da Avrupa birliğinin verdiği isimle E466, bitki hücre duvarlarının yapıtaşlarından olan selülozun kimyasal modifikasyonu ile elde edilen ve gıda sanayisinde çeşitli amaçlarla yaygın kullanılan bir katkı maddesidir. Üretim prosesi ilk olarak 1918'de tanımlanan ve ticari olarak odun selülozundan elde edilen karboksimetilselüloz beyaz ve krem renkli, katı granül ya da toz halindedir. Suda çözünür özellikteki karboksimetilselüloz gıda maddelerine en çok kıvam arttırıcı ve emülgatör olarak işlev görmek üzere ilave edilir. Gıdalar ve katkı maddeleri açısından dünyada ki en önemli otoritelerden olan Amerikan İlaç ve Gıda Dairesi (FDA) tarafından GRAS (genel olarak güvenilir) statüsünde olduğu kabul edilen karboksimetilselülozun gıdalarda ki kullanım miktarı ile ilgili Türk Gıda Kodeksinde herhangi bir üst sınır belirtilmemiştir.

Karboksimetilselüloz gıda, ilaç, sabun, deterjan, tekstil ve kağıt endüstrilerinde farklı amaçlarla kullanılmıştır. Karboksimetilselüloz suda çözülebilen bir selüloz türevidir. Bir avuç karboksimetilselüloz bir kova suyu bal kıvamına getirebilir. Bu özelliği sayesinde birçok sektörde kıvam arttırıcı hammadde olarak kullanılmaktadır. Çok az bir miktarı bile yüksek düzeylerde su kaybını önleyebilir. Karboksimetilselüloz,  $C_6H_7O_2(OH)_2OCH_2COO_2$  kimyasal formülüne sahiptir (Ambjörnsson ve arkadaşları, 2013).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Boru için akışlarda sürtünme kayıplarının azaltılması için tank içerisinde bulunan suya sürtünme azaltıcı maddeler (DRA) eklenerek konsantrasyon ve Reynolds sayısı gibi önceden belirlenmiş parametrelerde deneyler yapılarak Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4 'te elde edilen veriler kaydedilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Türbülent su akışında katkı maddesi ilavesi olmadan düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	350	340	190	250	230
6000	280	390	175	268	280
7000	190	450	140	297	330
8000	150	449	110	309	350
10000	100	460	94	349	385

**Çizelge 4.2 :** Türbülent boru akışında xanthan gum katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları

**a. 75 PPM**

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	338	327	175	239	218
6000	269	372	150	251	255
7000	178	423	114	273	296
8000	134	417	85	278	308
10000	90	440	68	303	314

**b. 150 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	332	310	165	217	209
6000	262	350	138	227	245
7000	163	395	105	225	280
8000	138	410	79	244	290
10000	80	420	68	258	284

**c. 225 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	325	302	181	202	188
6000	250	330	126	209	216
7000	150	380	98	225	250
8000	124	390	75	229	259
10000	70	400	60	233	263

**d. 300 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	315	285	135	184	172
6000	239	300	120	170	197
7000	123	330	93	209	224
8000	90	311	72	229	217
10000	50	350	58	216	200

**Çizelge 4.3 : Karboksimetilselüloz katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru**

ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları

**a. 75 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	340	190	180	240	220
6000	275	406	174	250	270
7000	181	429	120	278	310
8000	139	418	95	295	330
10000	92	429	85	330	350

**b. 150 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	330	184	170	230	210
6000	265	390	165	240	255
7000	175	405	110	260	300
8000	130	410	85	275	310
10000	88	420	75	290	335

**c. 225 PPM**

	Basınç Kaybı (mmSu)				
Reynolds Sayısı	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	320	170	160	215	200
6000	255	370	155	225	245
7000	165	395	100	250	285
8000	120	400	80	265	300
10000	80	410	65	280	325

**d. 300 PPM**

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	310	155	150	200	185
6000	240	360	145	220	230
7000	150	375	90	230	260
8000	110	380	70	250	284
10000	70	400	55	270	300

**Çizelge 4.4 :** Poliakrilamit katkı maddesinin kullanımı esnasında düz boru ve bağlantı elemanlarında kaydedilen basınç kayıpları

**a. 75 PPM**

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	344	331	175	245	210
6000	271	378	155	255	265
7000	181	423	120	278	310
8000	139	433	90	295	340
10000	92	450	80	310	350

**b. 150 PPM**

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	323	285	155	200	180
6000	264	320	125	210	245
7000	174	414	100	250	290
8000	132	410	70	270	310
10000	86	430	60	290	330

### c. 225 PPM

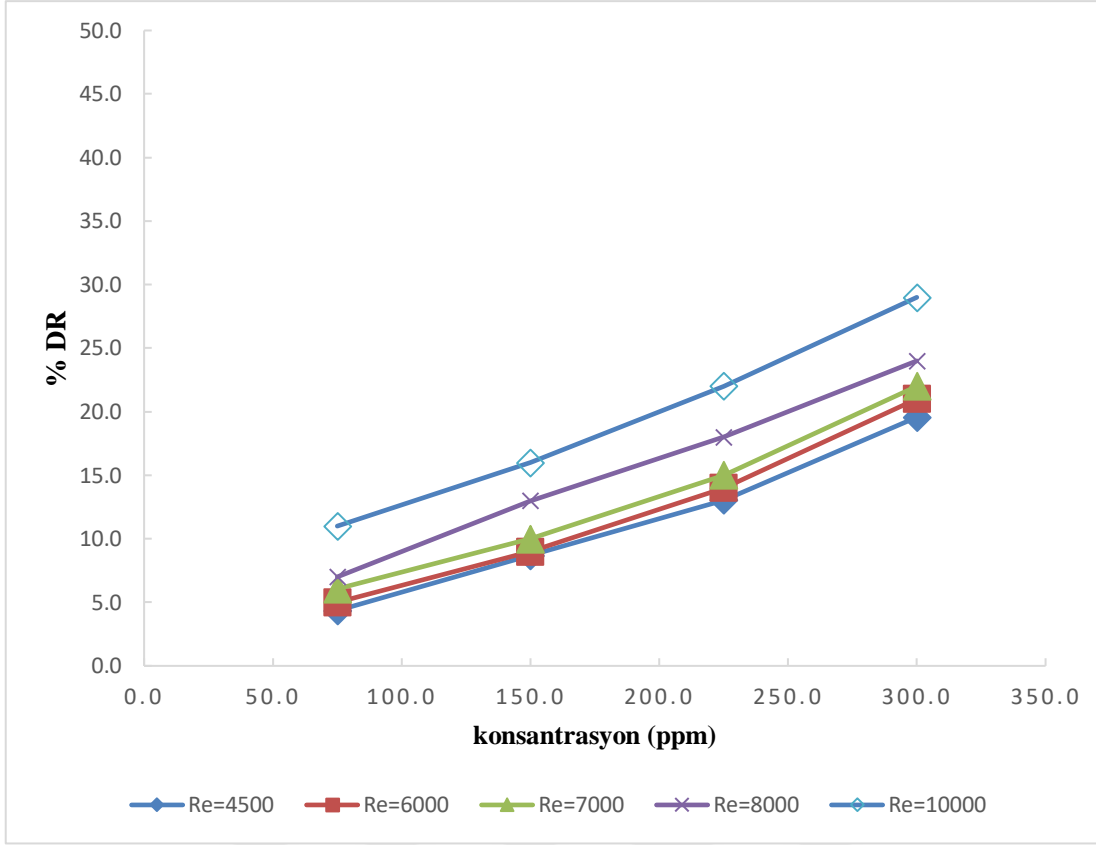
Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	320	255	140	170	140
6000	252	290	100	180	200
7000	164	370	90	230	250
8000	123	390	60	255	270
10000	80	405	50	270	300

### d. 300 PPM

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı (mmSu)				
	Sürgülü Vana	Keskin Dirsek	Küresel Vana	100 mm Çaplı Boru	50 mm Çaplı Boru
4500	308	235	120	152	130
6000	240	280	80	170	180
7000	155	343	70	220	195
8000	117	360	50	235	240
10000	73	390	40	250	315

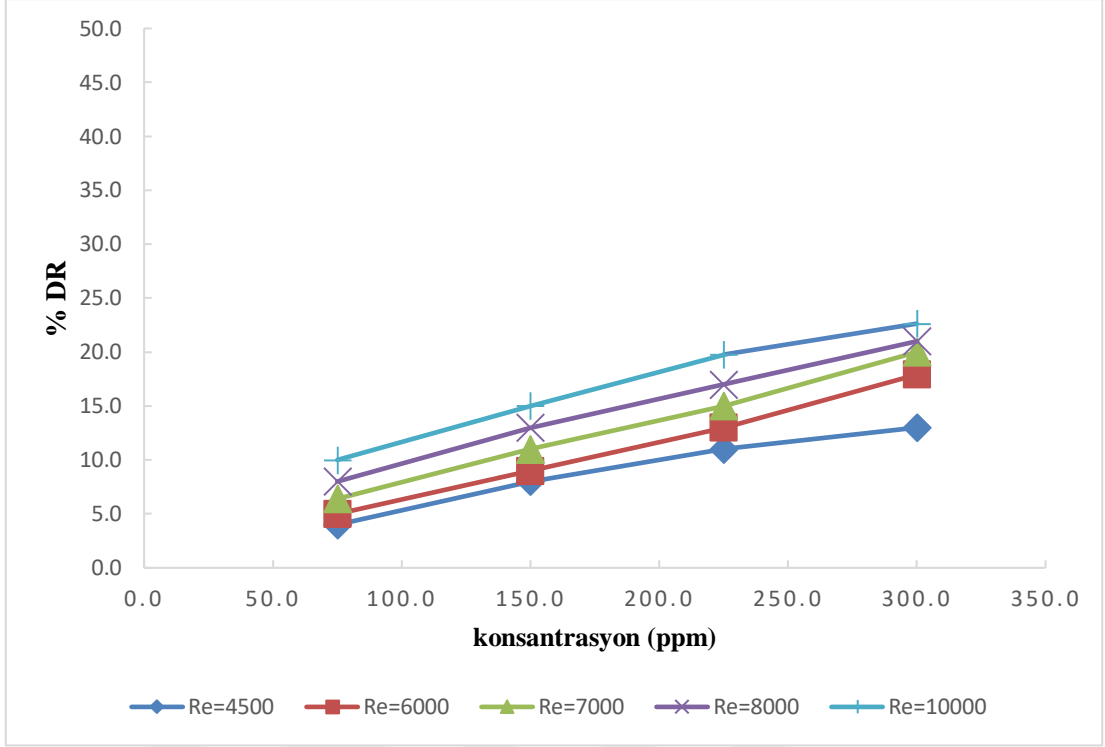
#### 4.1. Poliakrilamit Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları

Şekil 4.1 incelendiğinde 50 mm çaplı boruda farklı Reynolds sayılarına ve konsantrasyona bağlı olarak poliakrilamitin sürtünme azaltma yüzdeleri gösterilmiştir. 75 ppm konsantrasyonda ve 4500, 6000, 7000 ve 8000 Reynolds sayılarında sırasıyla %4,3, %5, %6,1, %7, %11 oranında minimum bir sürtünme azalması sağlanırken en yüksek Reynolds değerinde (10000) ve 300 ppm konsantrasyonda %29 oranında maksimum sürtünme azalması sağlanmıştır. Düşük konsantrasyonlarda sürtünme azaltma yüzdeleri birbirine yakın değerlerde iken yüksek konsantrasyonlarda bu değerlerinde arasındaki farklılaşmanın daha belirgin olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.1** : 50 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

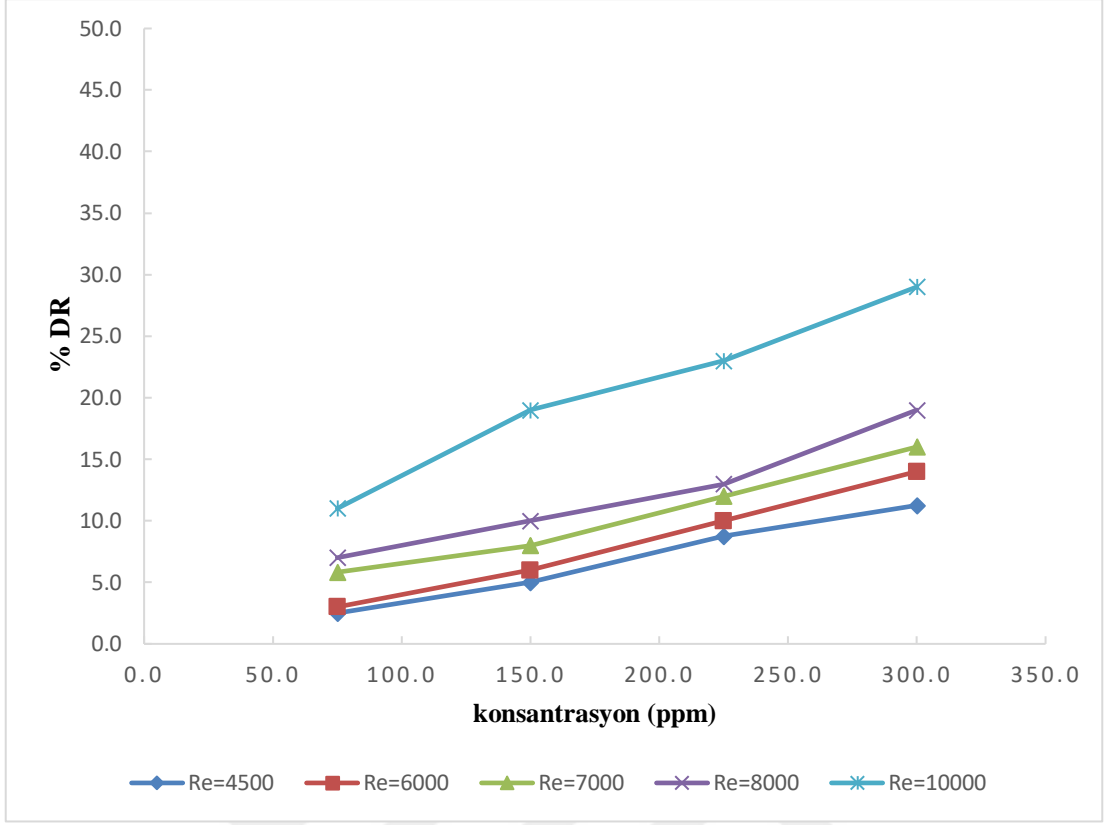
Şekil 4.2 incelendiğinde, 100 mm çaplı boruda farklı Reynolds sayılarına ve konsantrasyona bağlı olarak poliakrilamitin sürtünme azaltma yüzdeleri gösterilmiştir. 75 ppm konsantrasyonda, 4500 ve 6000 Reynolds sayılarında sırasıyla %4 ve %5 oranlarında bir sürtünme azalması sağlanırken, 300 ppm konsantrasyonda 8000 ve 10000 Reynolds sayılarında sırasıyla %21 ve %22 oranlarında sürtünme azalması sağlandığı görülmektedir. 100 mm çaplı boruda sürtünme azaltma değerlerinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. 300 ppm konsantrasyonda 4500 Reynolds sayısından 6000 Reynolds sayısına çıktığında sürtünme azaltma oranında belirgin artış olduğu şekilde görülmektedir.



**Şekil 4.2 :** 100 mm çaplı boruda Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

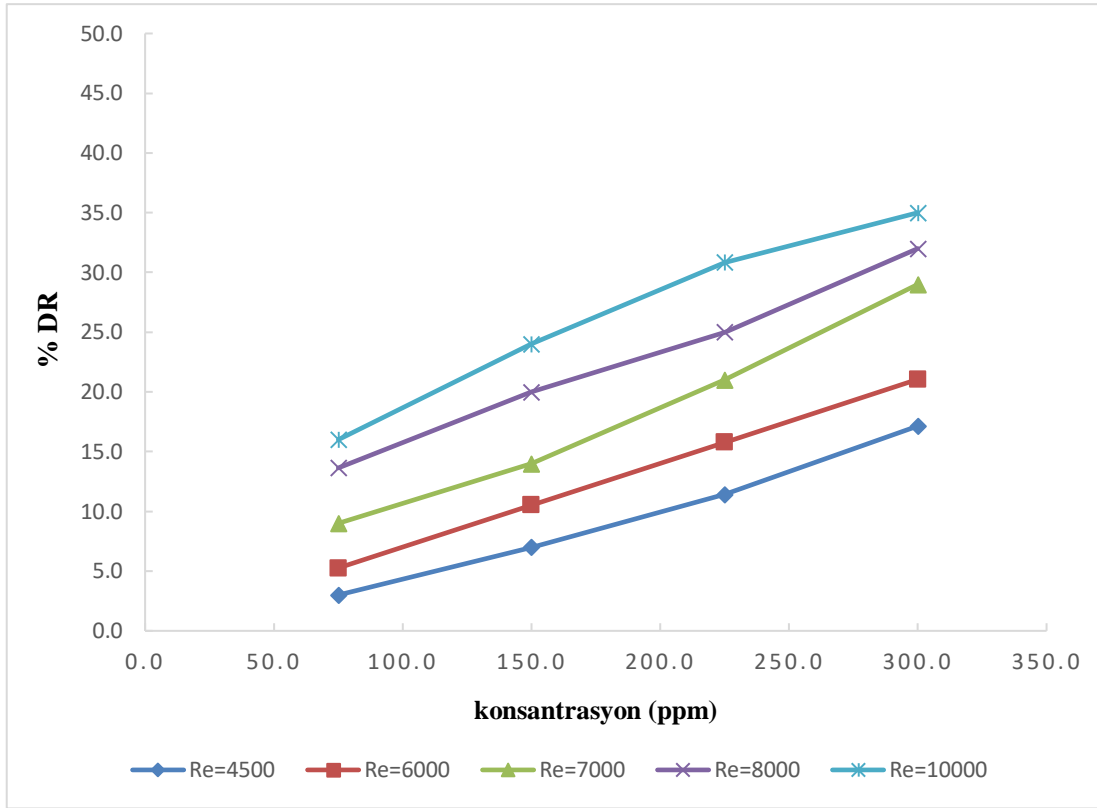
Şekil 4.3 incelendiğinde keskin dirsek boruda farklı Reynolds sayılarına ve konsantrasyona bağlı olarak poliakrilamitin sürtünme azaltma yüzdeleri gösterilmiştir. 75 ppm konsantrasyon, 4500 ve 6000 Reynolds değerlerinde sırasıyla %2.5 ve %3 oranında sürtünme azaltma yüzdesi elde edilirken bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Artan konsantrasyona ve Reynolds sayısına bağlı olarak sürtünme azaltma yüzdelerinin arttığı görülmektedir. 10000 Reynolds değerinde kullanılan her bir konsantrasyon değerinde sürtünme azaltma yüzdeleri diğer Reynolds değerlerine göre daha belirgin ve yüksek değerde olduğu görülmektedir. 300 ppm konsantrasyon, 8000 ve 10000 Reynolds değerlerinde sırasıyla %19 ve %29 oranlarında bir sürtünme azaltması elde edilmiştir.





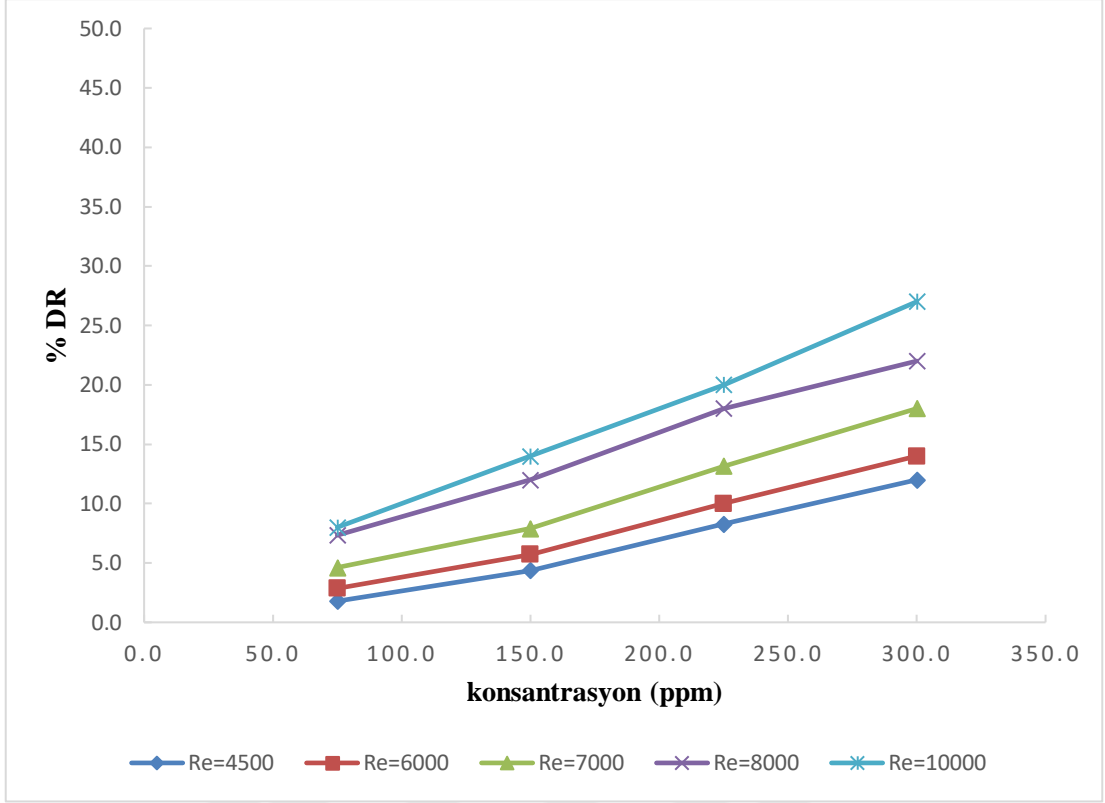
**Şekil 4.3 :** Keskin dirsek boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.4 incelendiğinde, küresel vana için farklı Reynolds sayıları ve konsantrasyonlara bağlı olarak poliakrilamitin sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Şekil 4.4'e bakıldığında sürtünme azaltma yüzdelerinin konsantrasyon ve artan akış hızıyla doğrudan ilişkili olduğu çok net şekilde görülmektedir. Düşük konsantrasyonlarda artan Reynolds sayısı ile birlikte sürtünme azaltma yüzdeleri artmaktadır. 10000 Reynolds sayısı ve 300 ppm konsantrasyon değerinde %35 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi elde edilmiştir. 300 ppm konsantrasyon değerinde Reynolds sayısı 6000' den 7000' e çıktığı anda sürtünme azaltma yüzdesinde belirgin artış (%11) gözlenmektedir.



**Şekil 4.4 :** Küresel vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

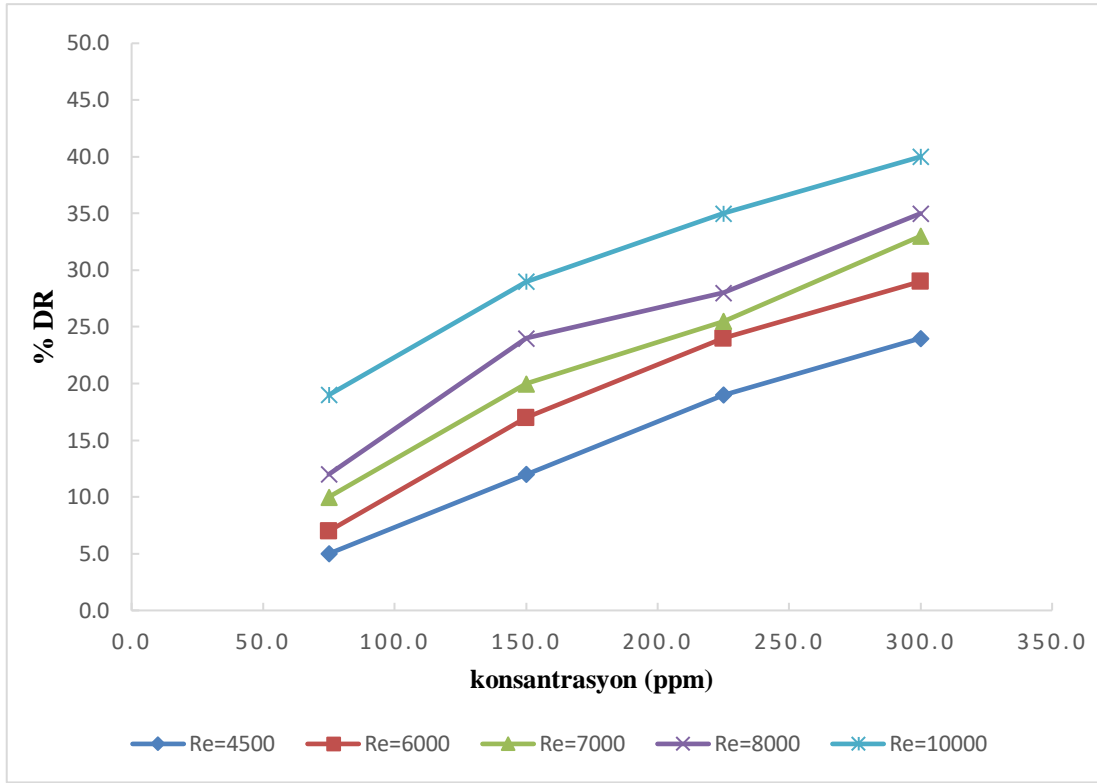
Şekil 4.5 incelendiğinde sürgülü vana için farklı Reynolds sayılarında ve konsantrasyonlarda poliakrilamitin sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. 75 ppm konsantrasyonda 4500 ve 6000 Reynolds sayılarında sırasıyla %1,8 ve %1,9 oranında sürtünme azalması sağlanırken Reynolds sayısı 7000'e çıkarıldığında %4,6 oranında bir sürtünme azalması sağlanmıştır. 150 ppm konsantrasyonda 7000 Reynolds değerinde %7,9 oranında bir sürtünme azalması sağlanırken aynı konsantrasyonda Reynolds sayısı 8000'e çıkarıldığında %12 oranında sürtünme azalması sağlanmıştır. Grafik incelendiğinde her bir Reynolds değerinde artan derişime bağlı olarak belirli sürtünme azaltma yüzdeleri olduğu fakat bu değerlerin birbirine yakın olduğu birbirleri ile aralarında belirgin farklar olmadığı görülmektedir. 300 ppm konsantrasyonda, Reynolds 8000 ve 10000 sayısı değerlerinde sırasıyla % 22 ve %27 oranlarında sürtünme azaltma yüzdeleri bulunmuştur. Maksimum sürtünme azaltma yüzdesi %27 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.5 : Sürgülü vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

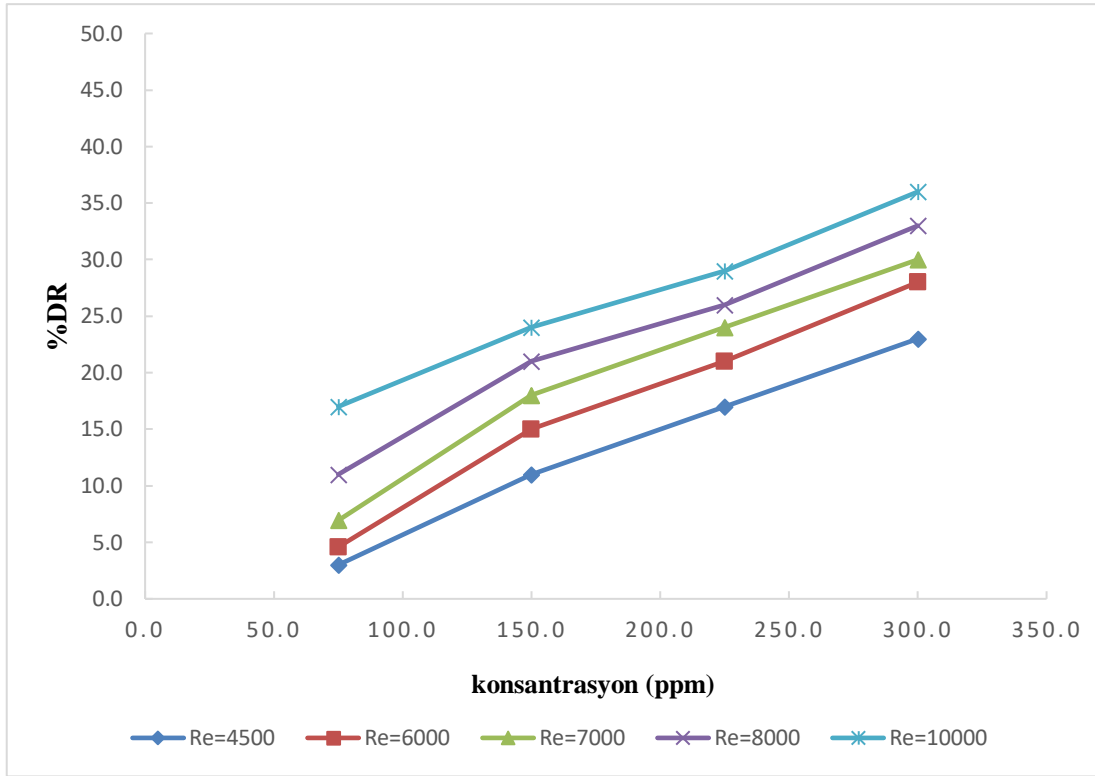
#### 4.2. Karboksümetilselüloz Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları

Şekil 4.6 incelendiğinde 50 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı karboksümetilselüloz için sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek Reynolds sayısında(10000) maksimum sürtünme azaltma yüzdesi elde edilmiştir. Reynolds 8000 değerinde 75 ppm konsantrasyonda % 12 oranında bir sürtünme azalması sağlanırken bu değer 150 ppm konsantrasyona çıkarıldığında %24 oranında bir sürtünme azalması sağlandığı 225 ppm konsantrasyona çıkarıldığında ise %28 oranında bir sürtünme azalması sağlandığı bulunmuştur. 225 ppm konsantrasyon ve Reynolds 6000 ve 7000 sayılarında sürtünme azaltma yüzdelerinin birbirine yakın olduğu bu değerlerin artan konsantrasyon ve değişen Reynolds sayısı ile fark oluşturduğu görülmüştür. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds değerinde %40 oranında maksimum sürtünme azaltma sağlanmıştır.



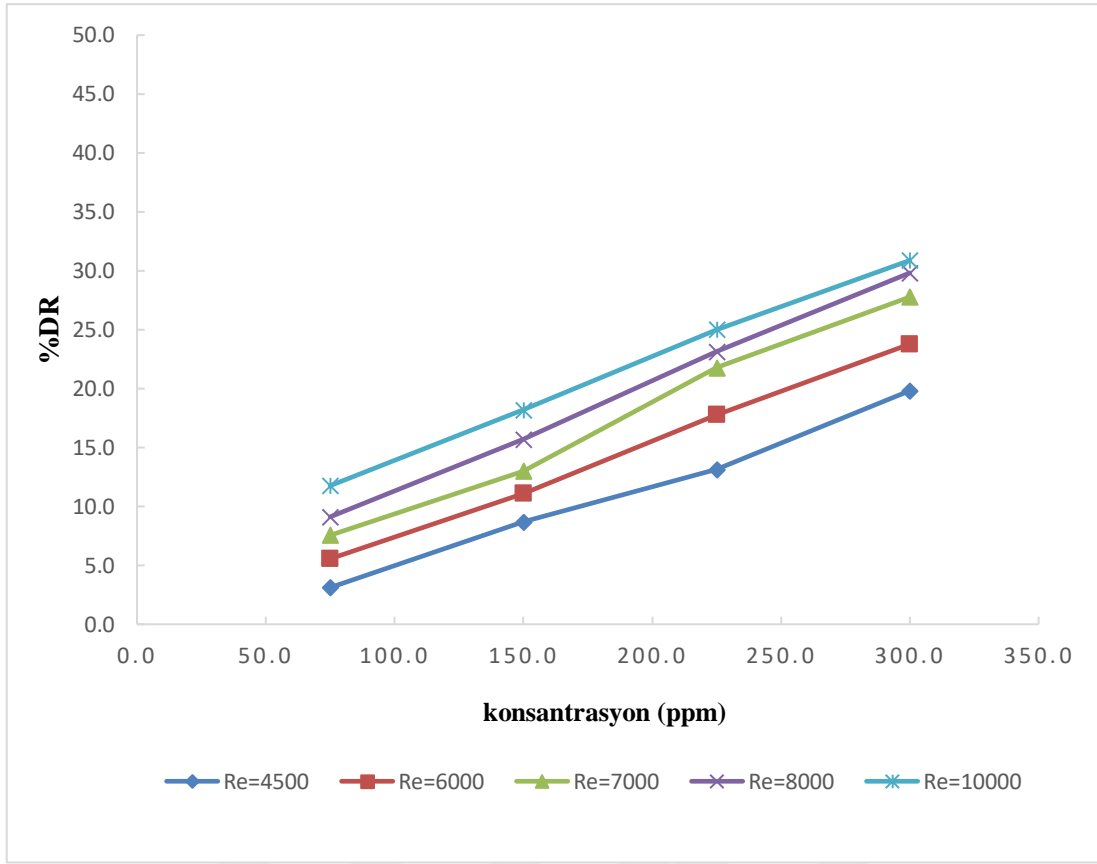
**Şekil 4.6 :** 50 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde 100 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı karboksimetilselüloz katkılı sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. 75 ppm konsantrasyon ve 4500 Reynolds değerinde %3 oranında minimum sürtünme azalması sağlanırken, 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds değerinde %36 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır. 4500, 6000 ve 7000 Reynolds sayılarında ve 75 ppm konsantrasyon değerinde sürtünme azalması yüzdeleri birbirine yakınken aynı konsantrasyonda 10000 Reynolds sayısına çıkıldığında sürtünme azalma yüzdesinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.6 ile karşılaştırıldığında boru çapı arttıkça sürtünme azaltma yüzdesinde azaldığını söyleyebilmekteyiz. Boru çapı küçüldükçe akışkan daha hızlı hareket ettiğinden sürtünme azaltmanın daha etkin olduğu söylenebilmektedir.



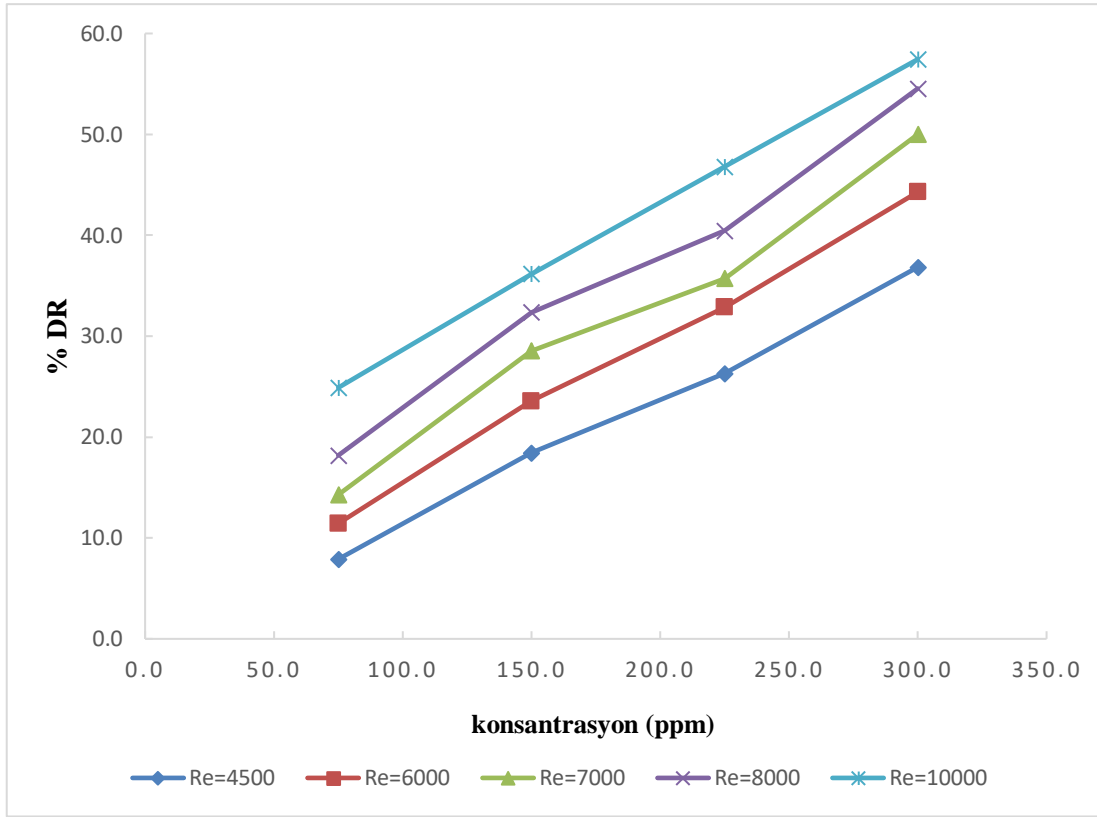
**Şekil 4.7 :** 100 mm çaplı boru için, Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.8 incelendiğinde keskin dirsek için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı olarak karboksimetilselüloz katkıli sürtünme azaltma yüzdelerine ulaşılmıştır. Her bir Reynolds değerinde derişim arttikça sürtünme azalması yüzdelerinde belirgin artışlar olduğu görülmektedir. 6000, 8000 ve 10000 Reynolds sayılarında sürtünme azalma yüzdeleri artan konsantrasyonla birlikte doğrusal bir şekilde artmaktadır. 225 ppm konsantrasyon ve 4500 Reynolds sayısında sürtünme azalma oranı %13,1 iken aynı konsantrasyonda 7000 Reynolds sayısında sürtünme azalma oranı %21,8 olarak bulunmuştur. Reynolds 6000 değerinden sonra sürtünme azaltma yüzde sonuçlarının birbirine yakın değerler olduğunu görmekteyiz. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerlerinde %30,9 oranında sürtünme azalması sağlanmıştır.



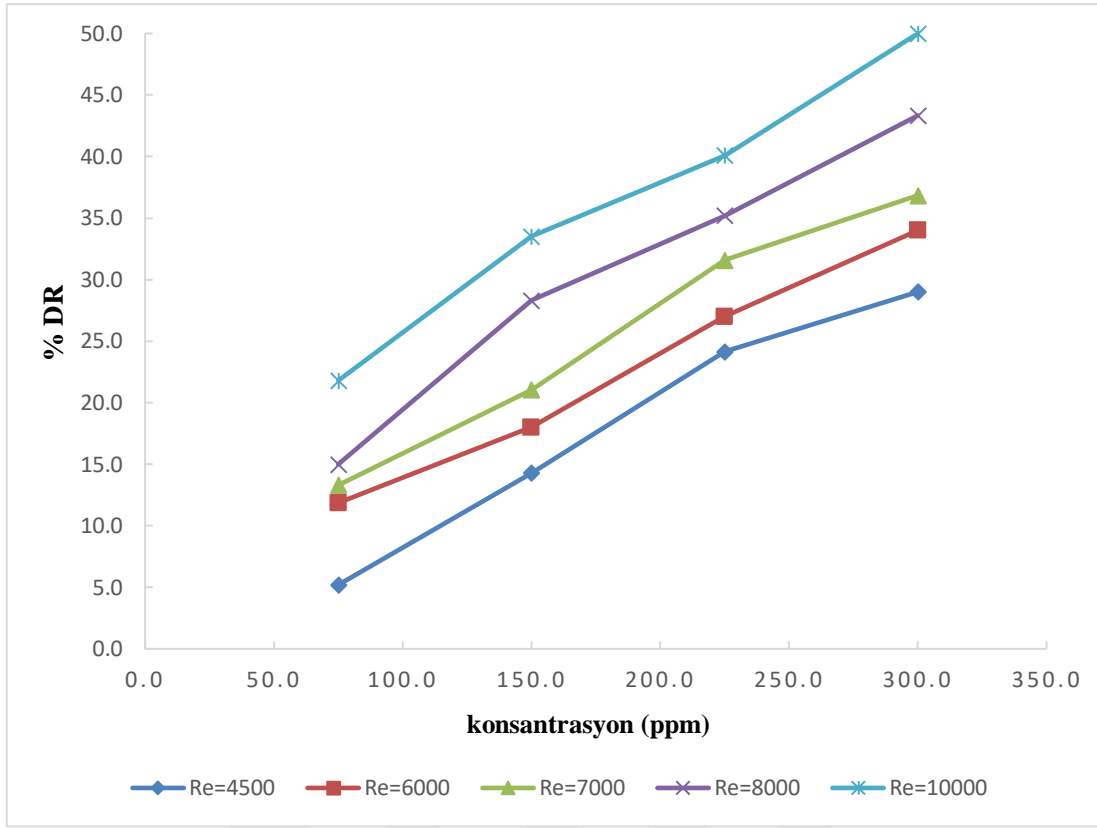
**Şekil 4.8 :** Keskin dirsek için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.9 incelendiğinde küresel vana için farklı Reynolds sayıları ve konsantrasyonlara bağlı olarak karboksimetilselüloz katkılı sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Reynolds 6000 ve 10000 sayılarında konsantrasyon arttıkça sürtünme azaltma yüzdesinin doğrusal bir şekilde arttığı gözlenmiştir. 7000 Reynolds sayısında, 225 ppm konsantrasyon değerinden 300 ppm konsantrasyon değerine çıkıldığı anda % 14.3 oranında belirgin bir sürtünme azaltma yüzdesi farkı olduğu görülmektedir. 300 ppm konsantrasyon ve Reynolds 7000, 8000 ve 10000 değerlerinde sırasıyla %50, %54,5 ve %57,4 oranlarında sürtünme azaltma yüzdesi sağlandığı görülmektedir. Böylelikle maksimum sürtünme yüzdesi %57,4 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.9 :** Küresel vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.10 incelendiğinde, sürgülü vana için farklı Reynolds sayılarında ve konsantrasyonlarda karboksimetilselülozun sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 75 ppm konsantrasyonda ve 4500, 6000, 7000 ve 8000 Reynolds değerlerinde sırasıyla %5.2, %11,9, %13,3 ve %15 oranlarında sürtünme azalması sağlanmıştır. Bu değerlere bakıldığında 75 ppm konsantrasyonda 4500 Reynolds sayısından 6000 Reynolds sayısına çıkıldığı zaman sürtünme azalma yüzdesinde önemli bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Aynı konsantrasyonda diğer Reynolds sayılarında sürtünme azaltma yüzdelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerinde %50 oranında maksimum sürtünme azalması sağlanmıştır.

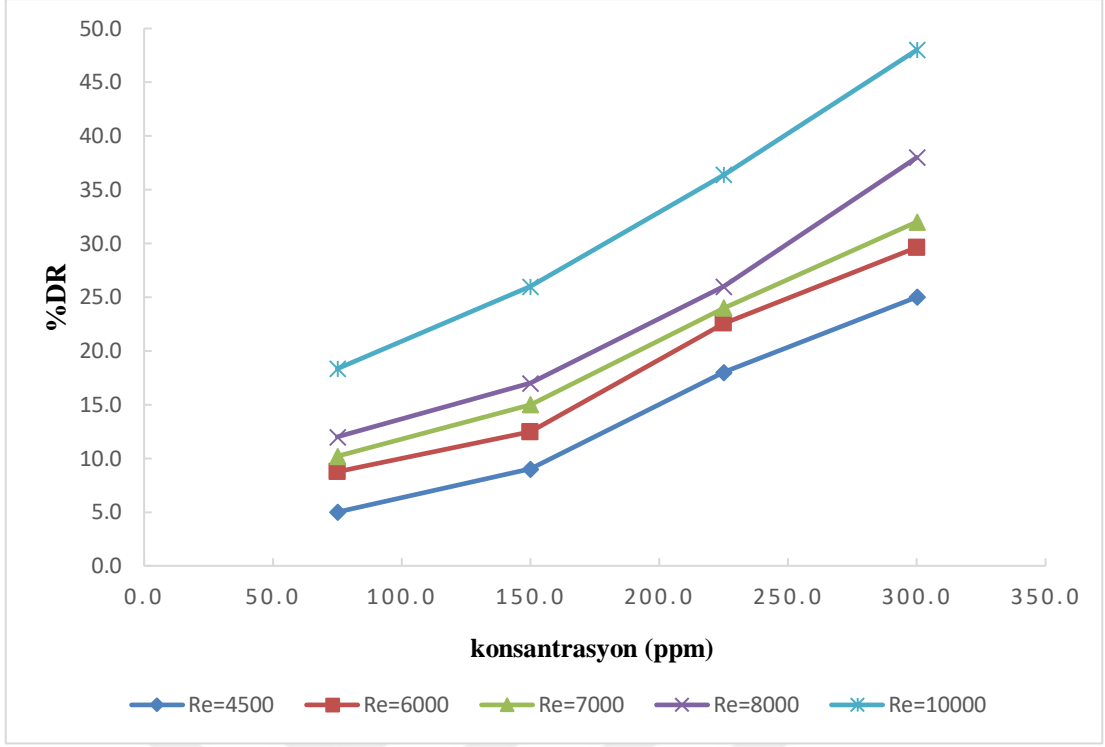


Şekil 4.10 : Sürgülü vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

### 4.3. Xanthan Gum Katkısıyla Sürtünme Azaltma Sonuçları

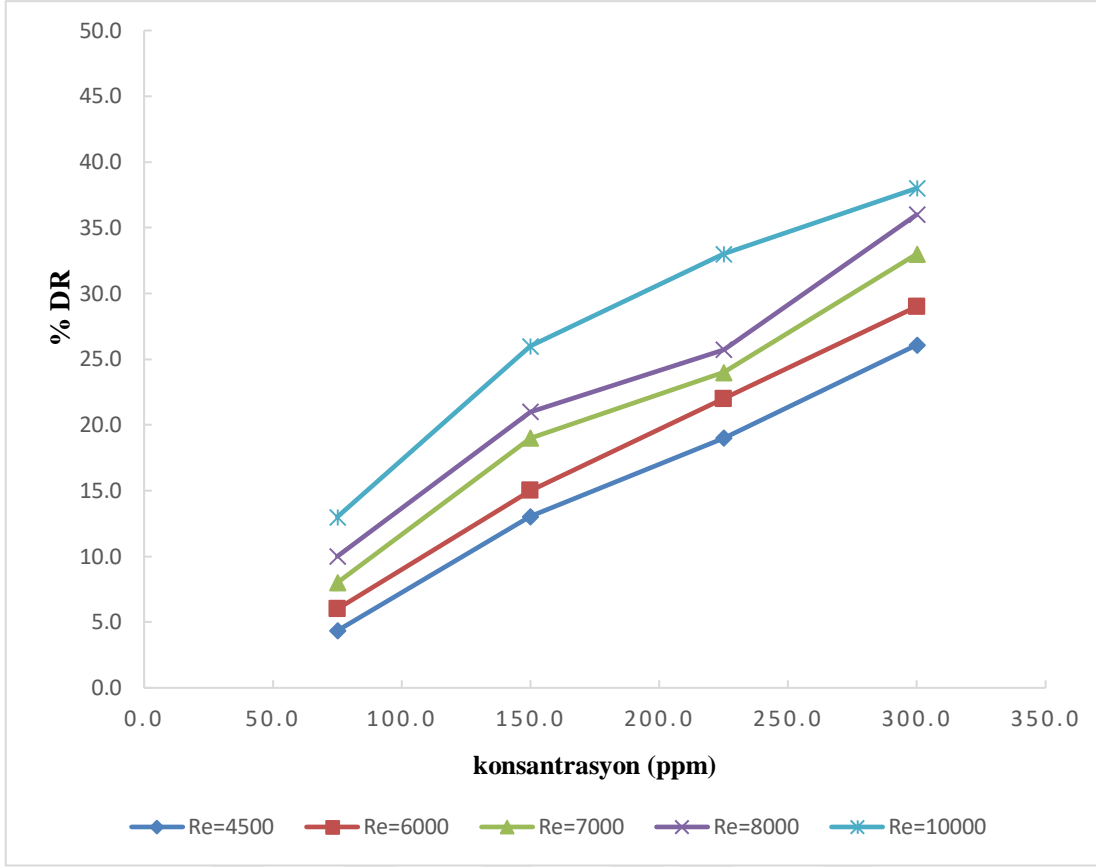
Şekil 4.11 incelendiğinde 50 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı xanthan gum için sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek Reynolds değerinde yüksek sürtünme azaltma yüzdesi elde edilmiştir. Reynolds 6000, 7000 ve 8000 değerlerinde sürtünme azaltma yüzdeleri birbirine yakın iken 10000 Reynolds değerinde daha yüksek sürtünme azaltma yüzdeleri elde edilmiştir. Xanthan gumun yüksek akış hızlarında daha iyi bir sürtünme azaltıcı madde olarak kabul edildiğini söyleyebiliriz. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerinde %48 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır.





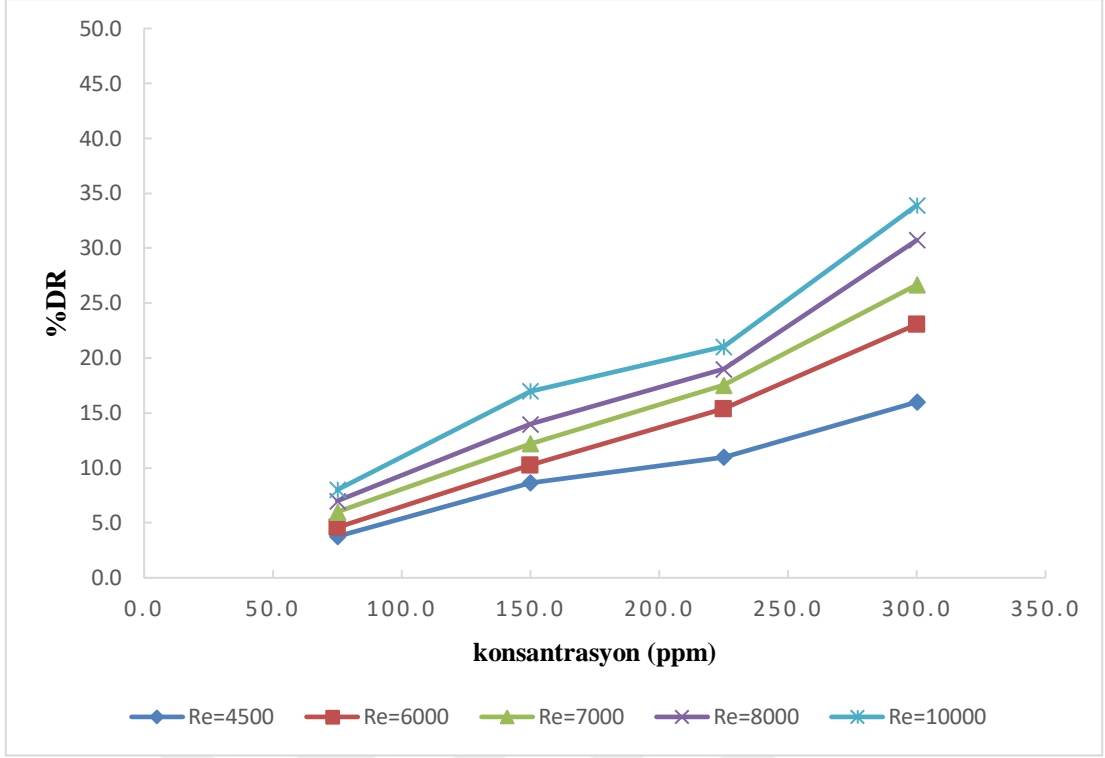
**Şekil 4.11 : 50 mm çaplı için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi**

Şekil 4.12 incelendiğinde 100 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı xanthan gum için sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 4500 Reynolds sayısında ve 75 ppm konsantrasyonda % 4,3 oranında bir sürtünme azalması sağlanırken aynı Reynolds sayısında 150, 225 ve 300 ppm konsantrasyonlarda sırasıyla %13, %19 ve %26,1 oranlarında sürtünme azalması sağlanmıştır. Düşük Reynolds sayısında dahi artan konsantrasyonla birlikte sürtünme azalmasının önemli ölçüde değiştiğini söyleyebiliriz. 225 ppm konsantrasyonda ve 6000, 7000 ve 8000 Reynolds sayılarında sürtünme azalma yüzdelerinin birbirine yakın olduğu ve bu değerlerin artan konsantrasyonla değiştiği görülmektedir. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerinde %38 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır.



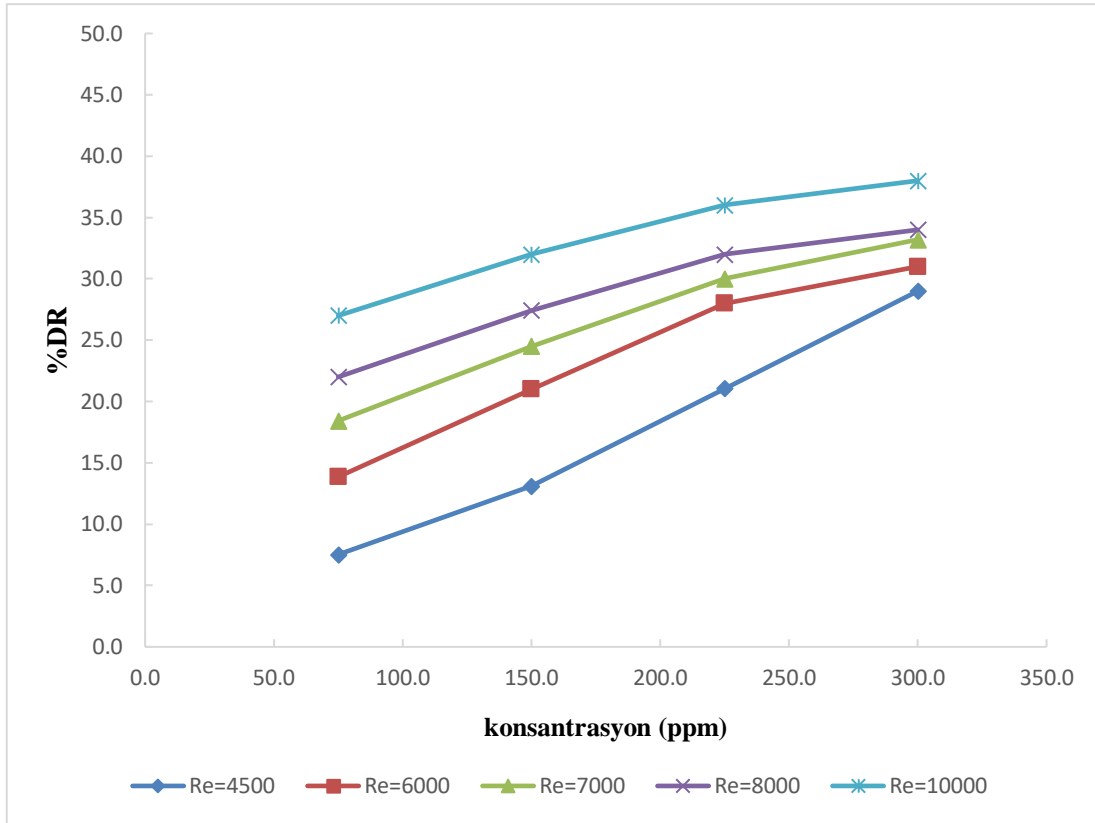
**Şekil 4.12 :** 100 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.13 incelendiğinde keskin dirsek için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı olarak xanthan gum katkılı sürtünme azaltma yüzdelerine ulaşılmıştır. Grafik incelendiğinde, 75 ppm konsantrasyonda ve 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds sayılarında sürtünme azalma yüzdelerinin birbirine yakın değerler olduğu ve 150 ppm konsantrasyona çıkıldığında değerler arasında belirgin farklılar oluşmadığı görülmektedir. 225 ppm konsantrasyonda 4500 Reynolds sayısından, 6000 Reynolds sayısına çıkıldığında yani akış hızı arttırıldığında sürtünme azalma yüzdesinin arttığı görülmektedir. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerinde % 33,9 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır.



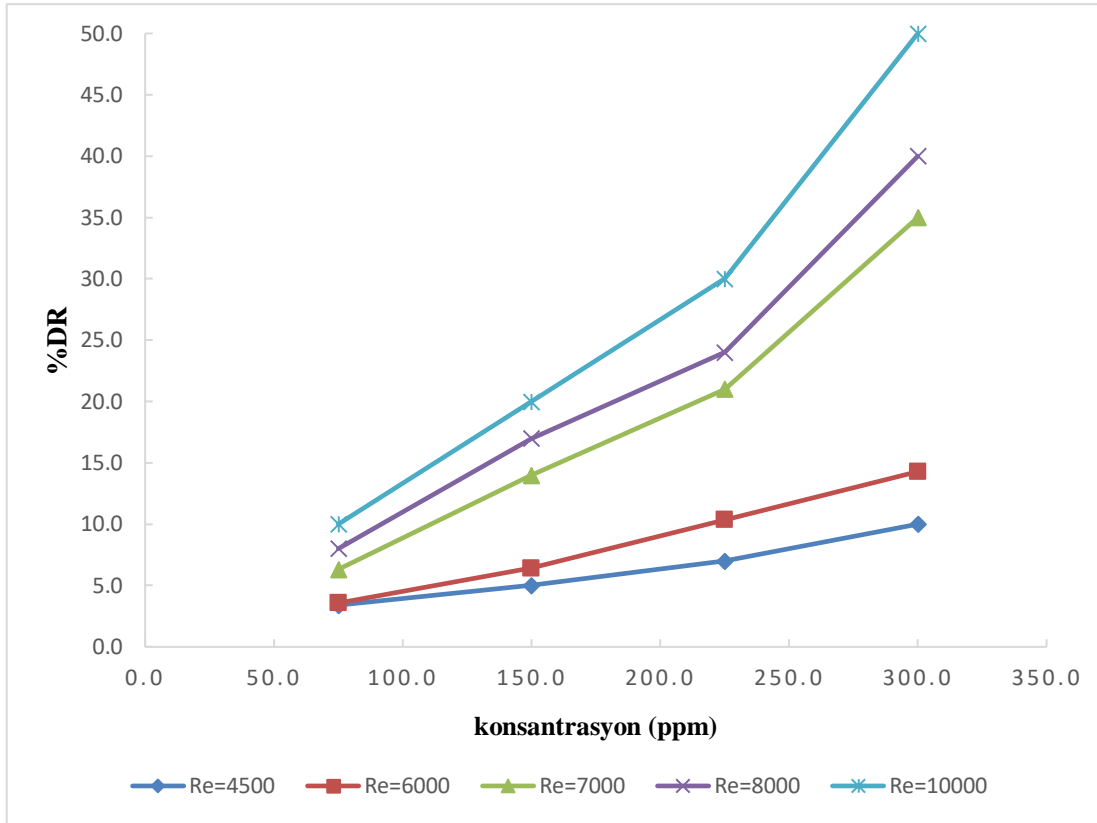
**Şekil 4.13 :** Keskin dirsek boru için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı %DR değişimi

Şekil 4.14 incelendiğinde küresel vana için farklı Reynolds sayıları ve konsantrasyonlara bağlı olarak xanthan gum katkılı sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. 75 ppm konsantrasyon ve 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds sayısında sırasıyla %7,5, %13,9, %18,4, %22 ve %27 oranlarında sürtünme azaltma yüzdeleri elde edilmiştir. 150 ppm konsantrasyon ve 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds sayısında sırasıyla %13,1, %21, %24,5, %27,4 ve %32 oranında sürtünme azalması sağlanmıştır. Grafik incelendiğinde düşük konsantrasyonlarda sürtünme azaltma yüzdeleri arasında belirgin fark varken, konsantrasyon miktarı arttıkça sürtünme azaltma yüzdeleri arasındaki farklar azalmıştır. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds değerinde %38 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır.



**Şekil 4.14 :** Küresel vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde sürgülü vana için farklı Reynolds sayılarında ve konsantrasyonlarda xanthan gum sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, belirli durumlarda değerlerde farklı sapmalar olduğu görülmüştür. 75 ppm’ de 4500 ve 6000 Reynolds değerinde sırasıyla %3,2 ve %3,4 oranlarında sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır. Bu iki değer birbirine yakın olduğu grafikte açıkça görülmektedir. 6000 Reynolds sayısından sonra artan akış hızıyla birlikte net bir şekilde farklılaşmalar görülmektedir. 300 ppm konsantrasyonda ve 6000 Reynolds sayısında %14,3 oranında sürtünme azalması sağlanırken, aynı konsantrasyonda 7000 Reynolds sayısında %35 oranında sürtünme azalması sağlanmıştır. Artan konsantrasyon ve Reynolds sayısına bağlı olarak sürtünme azaltma yüzdelerinde artış sağlanmıştır. 300 ppm konsantrasyon ve 10000 Reynolds sayısı değerlerinde %50 oranında maksimum sürtünme azaltma yüzdesi sağlanmıştır.

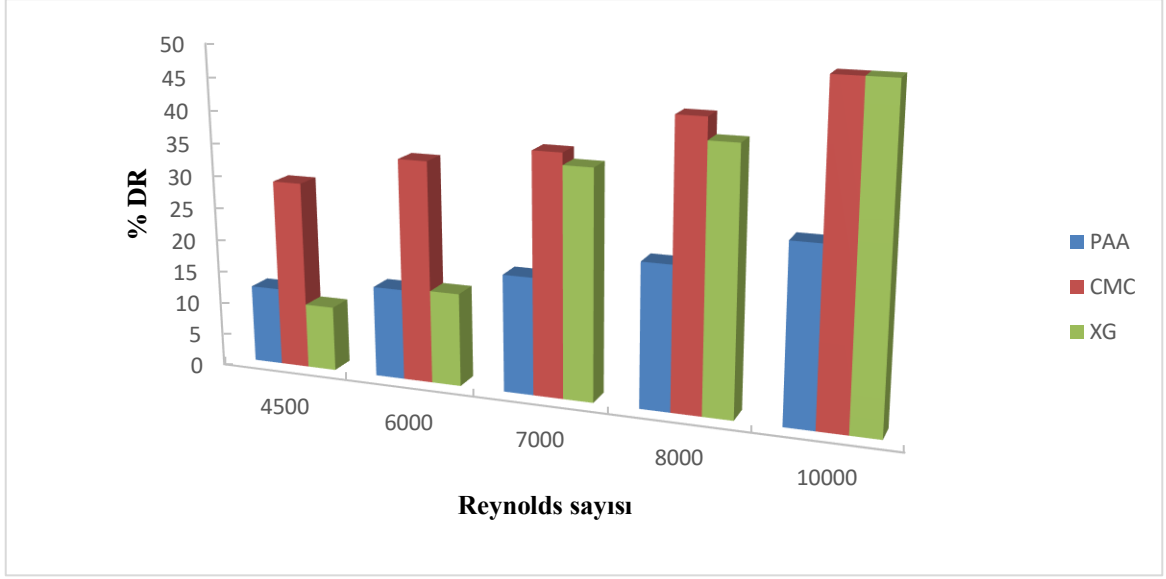


**Şekil 4.15 :** Sürgülü vana için Reynolds sayısı ve konsantrasyona bağlı % DR değişimi

#### 4.4. Sürtünme Azaltıcı Maddelerin Etkileri

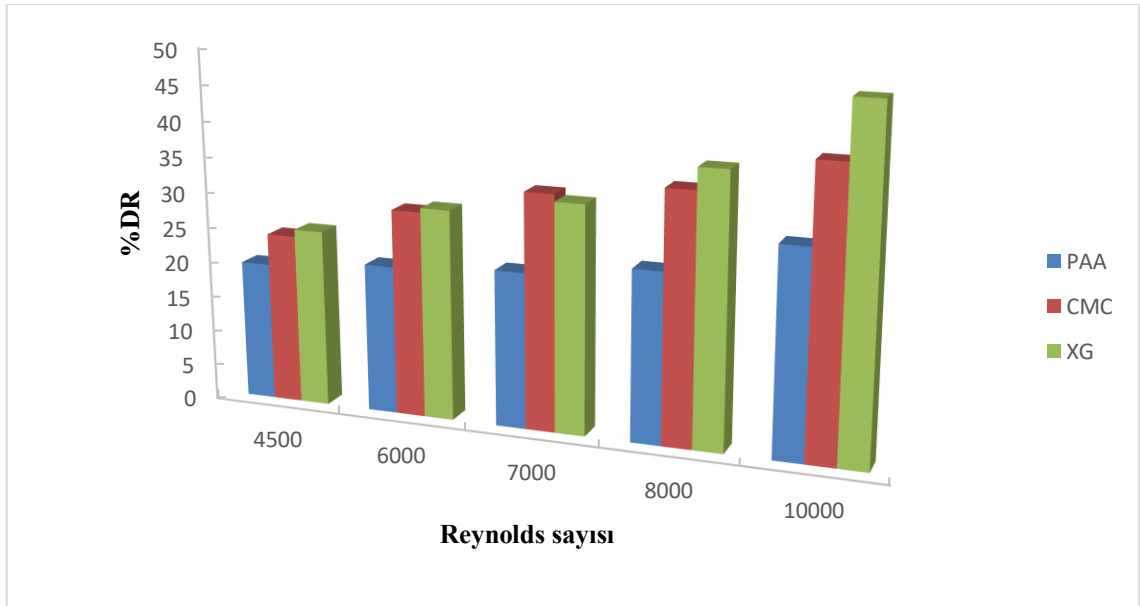
Sürtünme azaltıcı katkı maddelerinin etkisini inceleyebilmek için 300 ppm konsantrasyondaki değerler referans alınarak grafikler çizilmiştir.

Şekil 4.16 incelendiğinde sürgülü vana için xanthan gum ve karboksimetilselülozün 10000 Reynolds değerinde % 50 oranında sürtünme azalması sağladığı görülmektedir. Sürgülü vanada poliakrilamitin sürtünme azaltıcı katkı maddesi olarak etkisinin karboksimetilselüloz ve xanthan guma göre daha az olduğu görülmektedir.



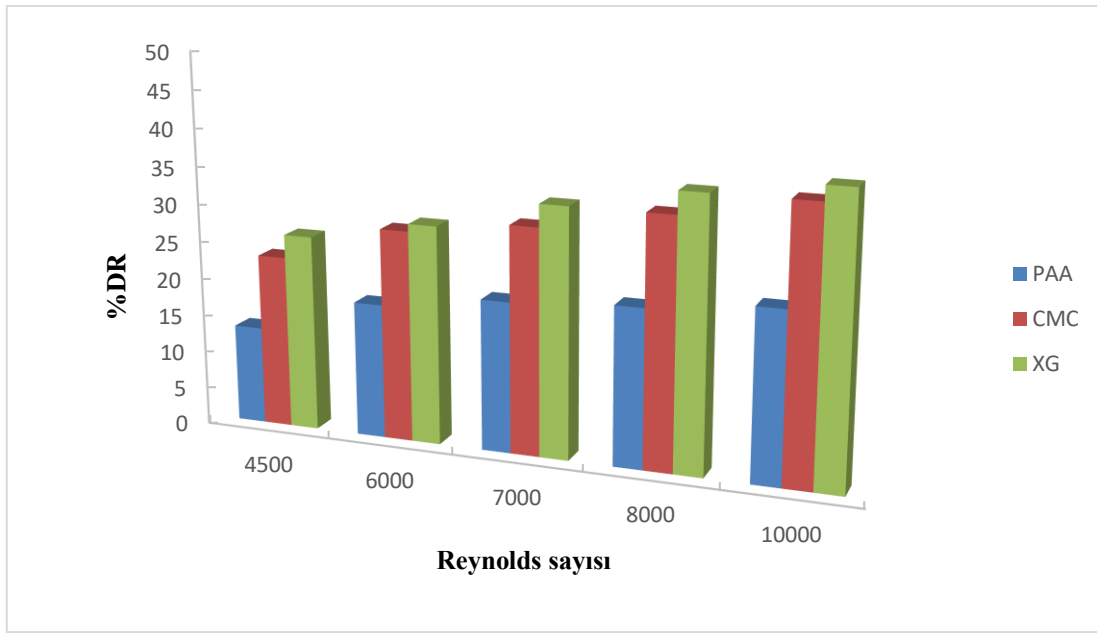
**Şekil 4.16 :** Sürgülü vana için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı %DR değişimi

Şekil 4.17 incelendiğinde 50 mm çaplı boruda 10000 Reynolds sayısı değerinde poliakrilamitin %29, karboksimetilselülozun %40 ve xanthan gum'ın %48 oranlarında sürtünme azaltma yüzdesi sağladığı görülmektedir. 50 mm çaplı boruda sürtünme azaltmaya poliakrilamitin katkısı diğer maddelere göre daha azdır.



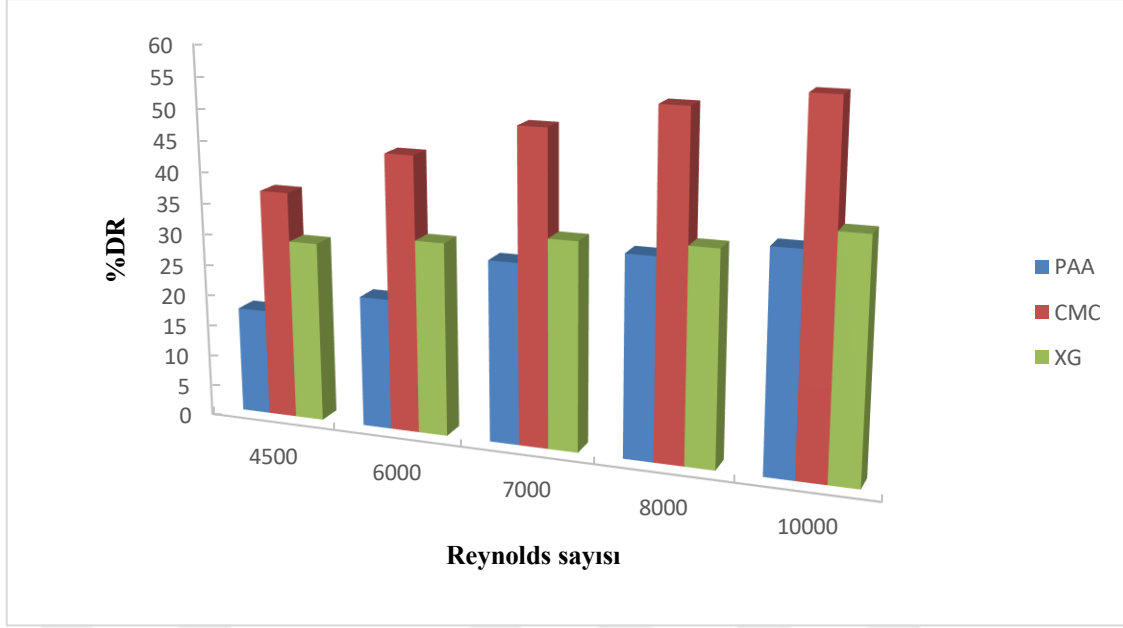
**Şekil 4.17 :** 50 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı %DR değişimi

Şekil 4.18 incelendiğinde 100 mm çaplı boruda her bir Reynolds sayısı değerinde xanthan gum ve karboksimetilselülozün sürtünme azalmasına katkılarının hemen hemen yakın olduğu, xanthan gum'ın az da olsa daha etkin olduğu görülmektedir. 6000 Reynolds sayısında xanthan gum %29 oranında sürtünme azalması sağlarken, karboksimetilselüloz %28 ve poliakrilamit ise %17,9 oranında sürtünme azalması sağlamıştır.



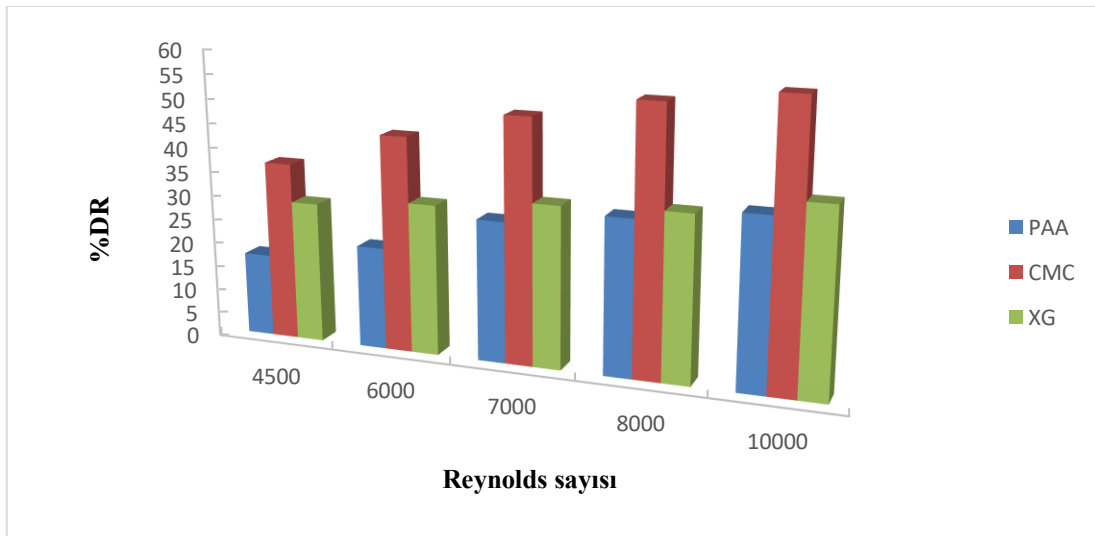
Şekil 4.18 : 100 mm çaplı boru için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı %DR değişimi

Şekil 4.19 incelendiğinde keskin dirsek boru için düşük Reynolds sayılarında kullanılan maddelerin etkinliğinin farklılaştığı görülmektedir. 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds sayısı değerinde en etkili sürtünme azaltıcı katkı maddesi karboksimetilselülozdur. Poliakrilamit ve xanthan gum polimerlerinin etkisinin birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. 8000 Reynolds sayısında poliakrilamit katkı maddesi ile %32 oranında sürtünme azalması sağlanırken xanthan gum katkı maddesi ile %34 oranında sürtünme azalması sağlanmıştır.



**Şekil 4.19 :** Keskin dirsek için Reynolds sayısı ve sürtünme azaltıcı maddeye bağlı %DR değişimi

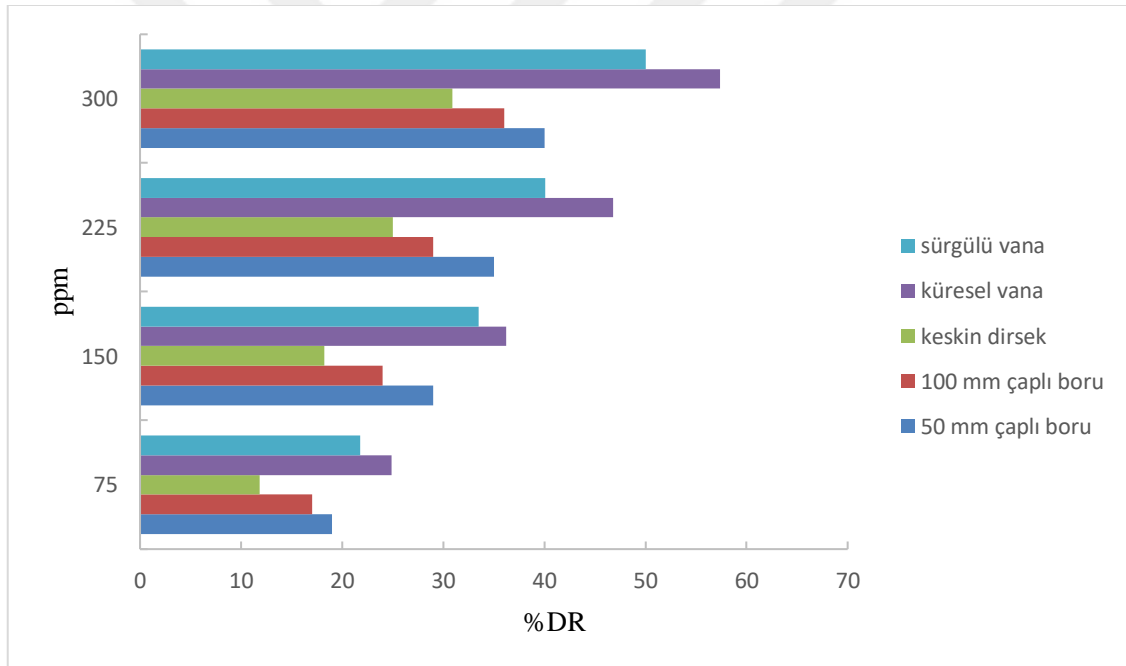
Şekil 4.4.5 incelendiğinde küresel vana için tüm Reynolds değerlerinde karboksimetilselülözün diğerlerine göre daha iyi bir sürtünme azaltıcı madde olduğu görülmektedir. Karboksimetilselülözün, 4500, 6000, 7000, 8000 ve 10000 Reynolds değerlerinde sırasıyla, %36,8, %44,3 %50, % 54,5 ve %57,4 oranlarında sürtünme azaltma yüzdesi sağlamıştır.



**Şekil 4.20 :** Küresel vana için Reynolds sayısı ve sürüklenme azaltıcı maddeye bağlı %DR değişimi



Şekil 4.21 incelendiğinde, en çok sürtünme azaltmaya etkisi olan madde karboksimetilselülozun, her bir parametrede sürtünme azaltma yüzdeleri verilmiştir. 75 ppm konsantrasyonda 50 mm çaplı boru, 100 mm çaplı boru, keskin dirsek, küresel vana ve sürgülü vana için sürtünme azaltma yüzdeleri sırasıyla %19, %17, %11,8, %24,9 ve %21,8'dir. 150 ppm konsantrasyonda 50 mm çaplı boru, 100 mm çaplı boru, keskin dirsek, küresel vana ve sürgülü vana için sürtünme azaltma yüzdeleri sırasıyla %29, %24, %18,2, %36,2 ve %33,5'tir. 225 ppm konsantrasyonda 50 mm çaplı boru, 100 mm çaplı boru, keskin dirsek, küresel vana ve sürgülü vana için sürtünme azaltma yüzdeleri sırasıyla %35, %29, %25, %46,8 ve %40,1'dir. 300 ppm konsantrasyonda 50 mm çaplı boru, 100 mm çaplı boru, keskin dirsek, küresel vana ve sürgülü vana için sürtünme azaltma yüzdeleri sırasıyla %40, %36, %30,9, %57,4 ve %50'dir.



**Şekil 4.21:** 10000 Reynolds sayısında karboksimetilselülozun konsantrasyona bağlı %DR değerleri

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son zamanlarda sürtünme azaltımı için bir takım yöntemler kullanılmış ve kullanılmaya devam edilmektedir. Bu çalışmada türbülanslı bir boru içi akışta, üç farklı sürtünme azaltıcı polimer madde farklı konsantrasyonlar (75, 150, 225, 300 ppm) ve farklı Reynolds sayılarında (4500, 6000, 7000, 8000, 10000) kullanılarak sürtünme azaltılması deneysel olarak incelendi. Ölçümler sonucunda basınç düşüşü ile sürtünme azalması belirlendi. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre grafiği, her çözelti için sürtünme azaltma seviyesini gösterir. Büyük çözelti konsantrasyonları daha yüksek sürtünme azalması sağlar ve bu yüksek türbülanslı akışlarda daha belirgin bir hale gelir. Grafikler incelendiğinde poliakrilamid, xanthan gum ve karboksimetilselülözün konsantrasyona ve Reynolds sayısına bağlı olarak nasıl davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Sürtünme azaltımı, boruların değişmesine bağlı olarak da değişim göstermektedir. Grafikler incelendiğinde her bir maddenin farklı sürtünme oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni her bir maddenin akışkanın reolojik davranışını değiştirmesidir. 4.1, 4.2 ve 4.3 olarak numaralandırılan başlıklar altındaki grafiklere bakıldığında artan konsantrasyon ve Reynolds sayısına bağlı olarak % DR'nin yani sürtünme azaltma oranının arttığı görülmektedir. 4.4 olarak numaralandırılan grafikler incelendiğinde, her bir maddenin etkisinin karşılaştırılmasını görebiliriz. Grafikler incelendiğinde bazı durumlar da sürtünme azaltma yüzdeleri aynı iken, konsantrasyon ve Reynolds sayısı değiştiğinde bu değer farklılaşmaktadır. Örneğin, Şekil 4.1 deki grafiğe bakıldığında xanthan gum ve karboksimetilselülözün 10000 Reynolds sayısında %50 sürtünme azaltma oranlarına sahip olduğunu, fakat değişen parametrelerle bu değerlerin değiştiğini de görürüz. Aynı zamanda yine bu grafiklere bakıldığında karboksimetilselülöz ve xanthan gumun, poliakrilamide göre daha iyi bir sürtünme azaltıcı madde olduğunu söyleyebiliriz. En fazla sürtünme azaltılmasını sağlayan madde olan karboksimetilselülözün Şekil 4.21 deki değerlerine baktığımız zaman 300 ppm ve 10000 Reynolds sayısında küresel vanada %57,4'lük maksimum sürtünme azaltma sağladığını söyleriz.

Genel olarak bakıldığında literatür çalışmaları ve kendi yapmış olduğum çalışma karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçların ortaya çıktığı gözlenmektedir. Katkı maddeleriyle sürtünme azaltımı üzerine yapılacak daha kapsamlı çalışmalar bu alanın daha da gelişmesine katkı sağlayacaktır. Manyetik akışkanlarla sürtünme azaltımı yeni yeni ortaya çıkan bir sürtünme azaltma yöntemidir. Borunun iç yüzeyi manyetik akışkanla

kaplandığında akışkan bir buz pistinde kayarcasına hareket etmektedir ve böylelikle belki de diğer katkı maddelerine göre daha fazla sürtünme azalması sağlayabilir.



## KAYNAKLAR

Abubakar, A. R. Al-Hashmi, T. Al-Wahaibi, Y. Al-Wahaibi, A. Al-Ajmi, and M. Eshрати. (2014). Parameters of Drag Reducing Polymers and Drag Reduction Performance in Single-Phase Water Flow. Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering Volume 2014, Article ID 202073, 8 pages.

Al-Yaari M., A. Soleimani, B. Abu-Sharkh, U. Al-Mubaiyedh, A. Al-sarkhi c, (2009) Effect of drag reducing polymers on oil–water flow in a horizontal pipe. International Journal of Multiphase Flow 35 516–524 p.

Ambjörnsson, H. A., Schenzel, K., and Germgard, U. (2013). Carboxymethyl Cellulose Produced at Different Mercerization Condition and Characterized by NIRFT Raman Spectroscopy in Combination with Multivariate Analytical Methods, CMC Mercerization, BioResources, 8 (2), 1918-1932.

ATILGAN Mehmet, GÖLCÜ Mustafa. (1996). Mühendislik Bilimleri Dergisi. Cilt:2, 109-116 p.

AV Shenoy, (1984). Colloid and Polymers. Science., 262,319

Bewersdorff H, Ohlendon D. (1988). The behaviour of drag-reducing cationic surfactant solutions. Colloid Polym Sci. 266:941-953.

Cormick CL Mc, Blook J. and Schulz DN. (1986). “ Water-Soluble Polymers”, in Encyclopedia of Polymer Science and Engennering, vol 17.

Çelikkán Hüseyin. (2003) . Suda Çözünen Polimerler. Polimer Teknolojisi Yüksek Lisans Dersi Ödevi. Ankara

Çengel, Yunus A, John M Cimbala, ve Tahsin Engin, (2008) . Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları. Güven Kitabevi.

Dai Xiaodong, Guoping Li , Jingmiao Li , Xin Yanping , Guanghui Yang. (2015). Potential of surfactant as anti-shear additive for DRA of oil. 2nd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences.

Dawood Sahar A. (2017). Study the Characterization of Adding Polymer-Surfactant Agent on the Drag Reduction Phenomena in Pipeline Flow System. Al-Khwarizmi Engineering Journal. 79-89 p

Dev A., Dunne P., Hermans T. M. ve Doudin B. (2020). Fluid drag reduction by magnetic confinement. Université de Strasbourg, CNRS, UMR 7140 & ISIS UMR 7006, 67000 Strasbourg, France

Deyab MA. (2015). Application of nonionic surfactant as a corrosion inhibitor for zinc in alkaline battery solution. *J Power Sources*. 292:66-71.

Duyar İsmail, (2011). Modeling Drag Reduction in Turbulent Flows by Brownian Fiber Additives. Yüksek Lisans Tezi, Munich.

Düz, Hasan. (2013). “Giriş Ve Tam Gelişmiş Akış Bölgesinde Laminar-Türbülans Geçiş Özelliklerinin Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi”. Batman Üniversitesi: 240.

Drzazga Michał, Andrzej Gierczycki, Grzegorz Dzido and Marcin Lemanowicz. (2013). Influence of Nonionic Surfactant Addition on Drag Reduction of Water Based Nanofluid in a Small Diameter Pipe. Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry, Department of Chemical and Process Engineering, Gliwice, Poland.

Edomwonyi-Otu LC, (2015). Drag Reduction in Oil-Water Flows. United Kingdom: University College London.

Gasljevic K, Matthys EF.(1993). On saving pumping power in hydronic thermal distribution systems through the use of drag-reducing additives. *Energy Build*. 20(1):45-56.

Gasljevic K, Matthys EF, (2009). Friction and heat transfer in drag-reducing surfactant solution flow through curved pipes and elbows. *Eur J Mech/B Fluids*. 28(5):641-650.

Hadi A Ali. Abdul- and Khadom. Anees A. (2013). Studying the Effect of Some Surfactants on Drag Reduction of Crude Oil Flow. Hindawi Publishing Corporation 6p.

HADRI Ferhat and GUILLOU Sylvain. (2010). Drag reduction by surfactant in closed turbulent flow. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 6876-6879 pages.

Helvacı Ş.Ş, Peker S. (2013). Akışkanlar Mekaniği, Literatür Yayıncı, İstanbul, 767 pages.

Huang Chonghai , Dongjie Liu , Jinjia Wei. (2016). Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels. *Chemical Engineering Science* 152, 267-279 pages.

Huang Chonghai, Yuansheng Lin, Bangming Li, Jinlan Gou, Wei Wang, Kai Chen, Xiaohu Yang, Hongkuan Zhou. (2020 ). Experimental Study on the Drag Reduction of Surfactant and Microgrooves. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 81

Javadian S, Yousefi A, Neshati J, (2013). Synergistic effect of mixed cationic and anionic surfactants on the corrosion inhibitor behavior of mild steel in 3.5% NaCl. *Appl Surf Sci B*. 285:674-681.

Jubran BA, Zurigat YH, Goosen MFA, (2005). Drag reducing agents in multiphase flow pipelines: recent trends and future needs drag reducing agents in multiphase flow pipelines: recent trends and future needs. *Pet Sci Technol.* 23:1403-1424.

JW Hoyt, (1986). "Drag reduction", in *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, vol.5.

Kamel AH, Shah SN, (2013). Maximum drag reduction asymptote for surfactant-based fluids in circular coiled tubing. *J Fluids Eng.* 135(3):031201.

Khalaf Abbas and Shua'ab Mohammed. (2012). *Kufa Journal of Engineering* , Volume 4, Issue 1, 97-112 pages.

Kim Nam-Jin, Kim Sin, Sang Hoon Lim, Kuan Chen, Wongee Chun. (2009). Measurement of drag reduction in polymer added turbulent flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 1014–1019 p.

Lawrence Chukwuka, Edomwonyi-Otu, Muhammad Gimba, Yusuf Nurudeen, Abdulkareem Abubakar. (2020) . Synergistic Effect of Polymer-Polymer Mixtures as Drag Reduction Agents on Oil-Water Flows. *Eskişehir Technical Universty Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engeneering.* 114-127 pages.

Liu Dongjie, Qinghui Wang , Jinjia Wei. (2018). Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions. *Chemical Engineering Research and Design* 132, 460-569 pages.

Lumley JL. (1973). Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. *J Polym Sci Macromol Rev.*7(1):263-290.

M. Mohammadtabar, R.S. Sanders, S. Ghaemi. (2020). Viscoelastic properties of flexible and rigid polymers for turbulent drag reduction. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 283.

Mowla D., A. Naderi. (2006). Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes. *Chemical Engineering Science* 61, 1549 – 1554 pages.

Myska J, V Mik. (2004). Degradation of surfactant solutions by age and by a flow singularity. *Chem Eng Process Process Intensif* . 43(12):1495-1501.

Nguyen Anh Tuan, Hiroshi Mizunuma (2013). High-shear drag reduction of surfactant solutions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* 71-77 pages.

Petri, DFS, (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 132 (23).

Rose GD, Foster KL. (1989). Drag reduction and rheological properties of cationic viscoelastic surfactant formulations. *J Nonnewton Fluid Mech*. 31(1):59-85.

Sokhala Kamaljit Singh , Gangacharyulu Dasarojua, Vijaya Kumar Bulasarab (2019). Formation, stability and comparison of water/oil emulsion using gum arabic and guar gum and effect of aging of polymers on drag reduction percentage in water/oil flow. *Vacuum* 159, 547-253 pages.

Sokhal Kamaljit Singh, Gangacharyulu Dasoraju, Vijaya Kumar Bulasara, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Materials Engineering Vol:13, No:2, 2019

Tamano Shinji , Hiroki Ikarashi, Yohei Morinishi, Keijiro Taga. (2015). Drag reduction and degradation of nonionic surfactant solutions with organic acid in turbulent pipe flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 215 (2015) 1–7 pages.

Truong V. – T. (2001). *Drag Reduction Technologies*. 1-31 pages.

Uysal B. Z. (2003). *Akışkanlar Mekaniği*, alp yayınevi, Ankara, 206 -211 p.

Van der Plas B, (2017). Golombok M. Reservoir resilience of viscoelastic surfactants. *J Pet Explor Prod Technol*. 7(3):873-879.

Yadav Phanikumar, Yanamala; King, Pulipati (2013). *Drag Reduction by Surfactant Solutions in Gravity Driven Flow Systems*. Department of Chemical Engineering, Andhra University, Viskhapatnam, A.P. INDIA.

Yükselen M. Adil (2012). *Aerodinamik Ders Notları*, İTÜ, İstanbul.

WIA Aly, Inaba H, Haruki N, Horibe A. (2006). Drag and heat transfer reduction phenomena of drag-reducing surfactant solutions in straight and helical pipes. *Trans ASME*. 128:800-810

Xiong Boya, Rebeca Dettam Loss. (2018). *Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems*. npj/cleanwater.

Zeybek Şerife, (2005). *Polimer Katkı Maddelerinin Türbülent Boru Akışında Sürtünme Azaltıcı Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Muhammed Ali KARTAL

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2021, İnönü Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2018-2019 Birim Kurs Merkezi/ Kimya Öğretmeni
- 2019-2021 Tesla Eğitim Kurumları