

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ONDÜLELİ BORU HİDRODİNAMİĞİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Makina Müh. Bahadır BİRECİKLİ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Oktay ÖZCAN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK İNCELEME.....	3
2.1 Boru Akımı (cazibesiz akış) Analizi.....	3
2.1.1 Boru Akımına Giriş	3
2.1.2 Laminer ve Türbülanslı Akış	4
2.1.3 Reynolds Sayısı “Re”	5
2.1.4 Basınç ve Yük Kaybı	5
2.1.5 Borularda Türbülanslı akış	8
2.2 Açık Kanal Akımı (cazibeli akış) Analizi	11
2.2.1 Açık Kanal Akımına Giriş	11
2.2.2 Akış Bölgeleri	12
2.2.3 Laminer ve Türbülanslı Akış	13
2.2.4 Froude Sayısı “Fr”	14
2.2.5 Basınç ve Yük Kaybı	15
2.2.6 Chezy “C” ve Manning “n” Katsayıları.....	17
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	19
3.1 Ondüleli veya Benzer Geometriye Sahip Borular	20
3.2 Türbülötörler	37
3.3 İki Fazlı Akış	48
3.4 Açık Kanal Akımı.....	51
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	55
4.1 Deney Tesisatı	55
4.2 Deneysel Süreç	59
4.3 Deneysel Verilerin Analizi	62
4.3.1 Boru Akımı için Darcy “f” Sürtünme Katsayısının Bulunması.....	62
4.3.2 Açık Kanal Akımı için Darcy “f” Sürtünme Katsayısının Bulunması	64

4.4	DeneySEL Sonuçlar ve Değerlendirilmesi.....	67
4.4.1	Boru Akımı Deney Sonuçları	67
4.4.2	Açık Kanal Akımı Deney Sonuçları	75
5.	SONUÇ ÖZETLERİ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....		82
ÖZGEÇMİŞ.....		86

SİMGE LİSTESİ

a	Manning sabiti
A, A_c	Alan, en-kesit alanı
C	Chezy katsayısı
D veya d	Çap
D_h	Hidrolik çap
d_i	İç çap
f	Darcy sürtünme faktörü
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Yükseklik
h_K	Yük kaybı
H	Açık kanal akışında akışkanın toplam enerjisi
L	Uzunluk
L_c	Karakteristik uzunluk
\dot{m}	Kütleli debi
n	Manning katsayısı
p	Islak çevre
P	Basınç
\dot{Q}	Hacimsal debi
Re	Reynolds sayısı
R_h	Hidrolik yarıçap
r	Yarıçap
S_0	Açık kanal akımında kanal tabanının eğimi
u	Hız profili
V	Hız
V_0	Açık kanal akışında üniform akış hızı
x	Kartezyen koordinat
y	Açık kanal akışında sıvı derinliği
y_n	Açık kanal akışında normal derinlik

Yunan Harfleri

α	Açı
ε	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
γ	Özgül hacim
μ	Viskozite
ν	Kinematik viskozite
θ	Açı veya açısal koordinat
ρ	Yoğunluk
τ	Kayma gerilmesi

Alt indisler

c	En-kesitle ilgili
h	Hidrolik
K	Kayıp katsayısı
n	Normal bileşen
ort	Ortalama büyüklük
w	Çeperdeki özellik
0	Durma özelliği

KISALTMA LİSTESİ

ÜA	Üniform Akış
YDA	Yavaş Değişen Akış
HDA	Hızlı Değişen Akış
RNG	Renormalization Group Theory
DN	Deney
PE-100	Polietilen boru, anma çapı 100 mm

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Bir boru içerisindeki akışta renkli boyanın davranışı (Çengel ve Cimbala, 2007) .4
Şekil 2.2	Basınç kaybı ve yük kaybı ifadeleri (Çengel ve Cimbala, 2007)..... 6
Şekil 2.3	Moody diyagramı (Çengel ve Cimbala, 2007)..... 9
Şekil 2.4	Doğal açık kanal akımı (Çengel ve Cimbala, 2007) 11
Şekil 2.5	Üniform akış (Çengel ve Cimbala, 2007) 12
Şekil 2.6	Bir açık kanaldaki akış bölgeleri (Çengel ve Cimbala, 2007)..... 13
Şekil 2.7	Dairesel kanal (Çengel ve Cimbala, 2007)..... 13
Şekil 2.8	Kritikaltı ve kritiküstü akış (Çengel ve Cimbala, 2007) 15
Şekil 2.9	Açık kanal akımında akışkanın toplam enerjisi (Çengel ve Cimbala, 2007) 16
Şekil 3.1	Dalgalı yüzeyli kanal (Wang ve Chen, 2000) 20
Şekil 3.2	Simetrik ve asimetrik kanal (Nishimura vd., 1998) 20
Şekil 3.3	Yarı-dairesel kesitli trapezoid kanal (Geyer vd., 2007) 21
Şekil 3.4	Değişken kavisli eğimli boru (Yang vd., 2001) 21
Şekil 3.5	f-Re grafiği (Yang vd., 2001)..... 22
Şekil 3.6	Farklı genlikteki paralel ondüleli cidarlı kanallar (Fischer ve Martin, 1996) 23
Şekil 3.7	Dalgalı oval boru (Li vd., 2006)..... 23
Şekil 3.8	f-Re grafiği (Li vd., 2006) 24
Şekil 3.9	Balıksırtı mikro kanatlı boru (Afroz ve Miyara, 2007) 24
Şekil 3.10	(a) f-Re grafiği, (b) f-bağıl pürüzlülük grafiği (Ceylan ve Kelbaliyev, 2002) 25
Şekil 3.11	Sürtünme faktörü denklemi (Romeo vd., 2001)..... 25
Şekil 3.12	Spiral ondüleli boru (Vicente vd., 2003)..... 26
Şekil 3.13	Farklı geometrilerdeki f-Re grafiği (Vicente vd., 2003) 26
Şekil 3.14	Spiral ondüleli boru (Dong vd., 2001) 27
Şekil 3.15	f-Re grafiği (Dong vd., 2001)..... 27
Şekil 3.16	Farklı geometrik parametrelili(4040-4045) f-Re grafiği (Zimparov, 2000)..... 28
Şekil 3.17	Farklı geometrik parametrelili(4030-4035) f-Re grafiği (Zimparov, 2000)..... 29
Şekil 3.18	Dalgalı yüzeyli paralel plaka (Mahmud vd., 2002)..... 30
Şekil 3.19	Farklı geometrik parametrelili f-Re grafiği (Mahmud vd., 2002) 30
Şekil 3.20	U tip dalgalı borular (Wojtkowiak ve Popiel, 2000)..... 31
Şekil 3.21	f-Re grafiği (Wojtkowiak ve Popiel, 2000)..... 31
Şekil 3.22	Pürüzlü yüzey şekilleri (Zhao ve Trass, 1996)..... 32
Şekil 3.23	f-Re grafiği (Zhao ve Trass, 1996)..... 32
Şekil 3.24	Sinüzoidal ondüleli-plakalı kanal (Metwally ve Manglik, 2003)..... 33
Şekil 3.25	f-Re grafiği (Metwally ve Manglik, 2003)..... 33
Şekil 3.26	f-boru çapı ve f-Re grafiği (Silberman, 1970)..... 34
Şekil 3.27	Kare kesitli kanal (Roy ve Date, 2002) 35
Şekil 3.28	Farklı büküm oranındaki f-Re grafiği (Roy ve Date, 2002)..... 35
Şekil 3.29	Ondüleli kanal (Ghaddar ve Hajj, 2000) 36
Şekil 3.30	Farklı kanal geometrisindeki f-Re grafiği (Ghaddar ve Hajj, 2000) 36
Şekil 3.31	(a) yakınsak türbülötör (b) iraksak türb. (Promvonge ve Eiamsa, 2006) 37
Şekil 3.32	Farklı PR lerde f-Re grafiği (Promvonge ve Eiamsa, 2006) 38
Şekil 3.33	A-B-C ve D tip türbülötörler (Sivashanmugam ve Suresh, 2006) 39
Şekil 3.34	A-B-C ve D tip türbülötörler f-Re graf. (Sivashanmugam ve Suresh, 2006) 39
Şekil 3.35	Sağ-sol yönlü helisel darsac tip türb.(Sivashanmugam ve Nagarajan, 2007) 40
Şekil 3.36	f-Re grafiği (Sivashanmugam ve Nagarajan, 2007) 40
Şekil 3.37	Pürüzlü ve pürüzsüz cidarlı bükümlü tip türbülötörler (Chang vd., 2006)..... 41
Şekil 3.38	f-Re grafiği (Chang vd., 2006) 41
Şekil 3.39	f-Re grafiği (Zimparov, 2001)..... 42

Şekil 3.40	(a)DR, (b)CR, (c)CDR tip konik türbülatorler (Promvonge, 2007).....	43
Şekil 3.41	f-Re grafiği (Promvonge, 2007)	43
Şekil 3.42	V-nozzle türbülatorler (Promvonge ve Eiamsa, 2007).....	44
Şekil 3.43	f-Re grafiği (Promvonge ve Eiamsa, 2007).....	44
Şekil 3.44	Dikdörtgen kesitli delikli-katı bloklar (Sara vd., 2001)	45
Şekil 3.45	f-Re grafiği (Sara vd., 2001)	45
Şekil 3.46	Bükülmüş dar sac tipi türbülator (Zimparov, 2003).....	46
Şekil 3.47	Farklı geometriye sahip türbülatorler için f-Re grafiği (Zimparov, 2003).....	46
Şekil 3.48	Basınç kaybı-Re grafiği (Behçet ve İlkılıç, 2006).....	47
Şekil 3.49	Dikey sinüzoidal dalgalı kanal (Nilpueng vd., 2005).....	48
Şekil 3.50	f-Re grafiği (Nilpueng vd., 2005).....	48
Şekil 3.51	Ribbed boru geometrisi (Cheng vd., 2006)	49
Şekil 3.52	Dairesel helisel boru (Lin vd., 2007).....	49
Şekil 3.53	(a) yakınsak, (b) iraksak mikrokanal (Fu vd., 2006).....	50
Şekil 3.54	Toplam Basınç Kaybı- Hacımsal Debi grafiği (Fu vd., 2006)	50
Şekil 3.55	Dairesel ondüleli boru (Ead vd., 2000)	51
Şekil 3.56	Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Varwick, 1945).....	52
Şekil 3.57	Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Kırkgöz, 1989).....	52
Şekil 3.58	Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Jarret, 1984).....	53
Şekil 3.59	Sürtünme katsayısının Re ile değişimi (Colosimo, Copertino ve Veltri, 1988)....	53
Şekil 3.60	f-Re grafiği (Shames, 2003)	54
Şekil 4.1	Deney tesisatı üst görünüş şematik resmi	56
Şekil 4.2	Deney tesisatı yan görünüş şematik resmi	56
Şekil 4.3	Su sayaçları, kollektör ve debi ayar vanası resmi	57
Şekil 4.4	Ondüleli boru iç ve dış yapısı.....	57
Şekil 4.5	Ondüleli borunun deney tesisatında görünümü.....	57
Şekil 4.6	Ondüleli boru teknik resmi.....	58
Şekil 4.7	Ondüleli boru kesit resmi	58
Şekil 4.8	Ondüleli boru kesit görünümü.....	59
Şekil 4.9	Boru akımı deney tesisatı resmi	60
Şekil 4.10	Basınç farkı ölçüm istasyonu	60
Şekil 4.11	Açık kanal akımı deney tesisatı resmi.....	61
Şekil 4.12	Su seviye yüksekliği ölçüm istasyonu.....	62
Şekil 4.13	Basınç kaybı “ $\Delta P_L = P_1 - P_2$ ” ifadesi (Çengel ve Cimbala, 2007).....	63
Şekil 4.14	Islak kesit alan ve ıslak çevre (Çengel ve Cimbala, 2007).....	64
Şekil 4.15	Eğimli kanal (Çengel ve Cimbala, 2007)	65
Şekil 4.16	f-Re deney ortalaması sonuçları	67
Şekil 4.17	f-Re deney ortalaması sonuçları	68
Şekil 4.18	f-Re deney ortalaması sonuçları	68
Şekil 4.19	h_K - \dot{Q} deney ortalaması sonuçları	69
Şekil 4.20	h_K - \dot{Q} deney ortalaması sonuçları	70
Şekil 4.21	h_K - \dot{Q} deney ortalaması sonuçları	70
Şekil 4.22	f-Re deney ortalaması sonuçları	71
Şekil 4.23	h_K - \dot{Q} deney ortalaması sonuçları	72
Şekil 4.24	f-Re deney ortalaması sonuçları	75
Şekil 4.25	f-Re deney ortalaması sonuçları	76
Şekil 4.26	f-Re deney ortalaması sonuçları	77

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Eşdeğer pürüzlülük değerleri (Çengel ve Cimbala, 2007)	8
Çizelge 2.2 Manning katsayısı (Çengel ve Cimbala, 2007)	18
Çizelge 3.1 Deneysel veriler (Ead vd., 2000).....	51
Çizelge 4.1 Ondüle boru ölçüleri, Fıratboru Ltd. Şti.....	58
Çizelge 4.2 f-Re deney ortalaması verileri	72
Çizelge 4.3 f-Re deney ortalaması verileri	72
Çizelge 4.4 f-Re deney ortalaması verileri	73
•	
Çizelge 4.5 Q -h _K deney ortalaması verileri.....	73
•	
Çizelge 4.6 Q -h _K deney ortalaması verileri.....	74
•	
Çizelge 4.7 Q -h _K deney ortalaması verileri.....	74
Çizelge 4.8 f-Re deney ortalaması verileri	78
Çizelge 4.9 f-Re deney ortalaması verileri	79
Çizelge 4.10 f-Re deney ortalaması verileri	79
Çizelge 4.11 Debi ortalaması verileri	80
Çizelge 4.12 Debi ortalaması verileri	80
Çizelge 4.13 Debi ortalaması verileri	80

ÖNSÖZ

Tez konusu belirlerken özellikle kentsel yaşamın sorunlarından birinin üzerinde durulmakla birlikte daha evvel pratikte uygulanma imkânı olmamış yeni bir konunun araştırılması ve uygulanabilirliği için bir ön çalışma oluşturması planlanmıştır. Bu kapsamda “Ondüleli dairesel kesitli borularda su akışı hidrodinamiğinin deneysel olarak araştırılması” konusu benimsenmiştir. Bu tip boruların kullanılmasıyla atık suların eğimli arazilerde taşınmasında akıştaki yük kayıplarını maksimum yapan parametreler belirlenerek yatırım maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

Bu güncel çalışmanın gerçekleşmesinde büyük payı olan başta tez danışmanım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Oktay ÖZCAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın farklı aşamalarında verdiği bilgi ve önerileri ile çalışmama destek olan hocam Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE’ye katkısından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneyde kullanılan ondüleli boruların teminini sağlayan Fıratboru İnşaat Malzemeleri Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.’ye, tesisatın kurulmasında Detay Mühendislik İnş. Taahhüt L.T.D Şirketi çalışanları ve Sevgili amcam Hüsnü BİRECİKLİ’ ye, deney montaj işlemlerinde yardımlarını esirgemeyen Mak. Yük. Müh. Ömer YURDABAĞ’a ve Mak. Yük. Müh. Barlas TOKGÖZ’e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü problemimde yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma ve deney tesisatında bazı parçaların sağlanmasında yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Deniz ULUSARSLAN’a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeden, büyük özveride bulunarak beni yetiştiren ve bu günlere gelmemi sağlayan, başta sevgili ailem ve akrabalarım ve eşsiz can yoldaşlarıma en içten şükranlarımı sunarım.

Bahadır BİRECİKLİ, 2008

ONDÜLELİ BORU HİDRODİNAMIĞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ondüleli dairesel kesitli borularda su akışının hidrodinamiği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı, farklı debi ve boru çaplarında yük kayıplarını maksimum yapan parametreleri belirlemektir.

Tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmaya başlama nedenleri ve ulaşılmak istenen sonuçlar genel olarak açıklanarak konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde tez konusu kapsamındaki temel kavramlara değinilerek kullanılan analiz yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde konu ile ilgili daha önce yapılmış araştırmacıların yayınları değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde Y.T.Ü. Makine Fakültesi Yıldız kampüsü laboratuvarında gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Deneysel çalışmalar, iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, üç farklı çaptaki ondüleli borular boru akımında (cazibesiz akış) incelenmiş, boru giriş ve çıkış kesitleri arasında oluşan basınç kaybı ve Darcy sürtünme katsayısı farklı hacımsal debilerde bulunmuştur. İkinci kısımda, üç farklı çaptaki ondüleli borular açık kanal akımında (cazibeli akış) incelenmiş, boru boyunca aralarında aksel uzaklık yeterince büyük olan üç ayrı istasyondan elde edilen su seviye yükseklikleri ile Darcy sürtünme katsayıları farklı hacımsal debilerde ve farklı kanal eğim açılarında bulunmuştur.

Deneysel veriler ışığında, hem boru akımı (cazibesiz akış) hem de açık kanal akımı (cazibeli akış) için Reynolds sayısı “ Re ” nin Darcy sürtünme katsayısı “ f ” ile olan ilişkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sürtünmeden dolayı oluşan yük kayıpları incelenmiş ve sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Boru akımında (cazibesiz akış) basınç kaybı ve hacımsal debi önemli parametrelerken, açık kanal akımında (cazibeli akış) hacımsal debiyle birlikte su seviye yükseklikleri ve kanal eğimi önemli parametrelerdir.

Beşinci bölümde sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Ondüleli boru, sürtünme katsayısı, boru akımı, açık kanal akımı

EXPERIMENTAL STUDY OF CORRUGATED PIPE HYDRODYNAMICS

ABSTRACT

In this master thesis, hydrodynamics of water flow in corrugated pipes with circular cross-section are studied experimentally. The main purpose of this study, is determination of parameters which make head loss maximum at various flow rate and pipe diameter.

The thesis consist of five chapters. In the first chapter, the aim of the study and the results to be obtained have been explained generally. In the second chapter, fundamental concepts which are in scope of this thesis and the calculation method have been explained. In the third chapter, studies that are related to the subject in the literature have been reviewed.

In the fourth chapter, experimental studies have been explained which have been carried out at Yıldız Technical University of Mechanical Engineering Faculty on Yıldız campus laboratory. Experimental studies consist of two parts. In the first part, three corrugated pipes with various diameter have been employed in pipe flow, pressure loss between inlet-outlet of the system and Darcy friction factor have been found at various flow rates. In the second part, three corrugated pipes with various diameter have been used in open channel flow. Water level elevations at three distinct stations have been measured and Darcy friction factor have been found for various flow rates and channel slopes.

Relations between Darcy friction factor and Reynolds number have been indicated graphically for both pipe flow and open channel flow by using experimental data. According to the experimental results, head losses due to friction have been examined and results are found consistent with previous studies. Pressure loss and flow rate are major parameters for pipe flow and, flow rate, water level elavation and channel slope are major parameters for open channel flow.

In the fifth chapter, conclusions and suggestions has been presented according to the obtained results.

Key words: Corrugated pipe, friction factor, pipe flow, open channel flow

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi Akışkanlar Mekaniği, yel değirmenleri, akarsu değirmenleri, tarımsal sulama, temizlik ya da içme suyu temini, basit tekne yapımı gibi problemlerle daha ilk günlerden itibaren insanlıkla beraber olmuştur. Hareketli akışkanların değişen özelliklerini tahmin etmek ve bu değişimleri kullanarak yararlı sistemler kurmak her çağda tüm insanlığın ilgisini çekmiş ve deneysel ya da pratik gayretlerle bu amaca erişmek için harcanan çaba hiç bir zaman durmamıştır.

Akışkanlar mekaniği, akışkan hareketlerini ve bu hareketleri oluşturan ya da bu hareketler sonucunda ortaya çıkan hız, basınç, kuvvet, enerji ve bunun gibi fiziksel etkileri inceler. Günlük hayatta sıvı ya da gaz adı altında bildiğimiz bütün maddeler akışkandır. Özellikle su ve hava, mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan akışkanlardır. Akışkanlar Mekaniği'nin iki ana kolu vardır. Sıvıların Mekaniği veya Hidrodinamik, Gazların Mekaniği veya Aerodinamiktir. Akışkanlar Mekaniği'nin kullanım alanları gerek mühendislik uygulamalarında ve gerekse diğer bilimse teknolojik araştırmalarda gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Boru akımlarında enerji kayıpları iki şekilde olmaktadır. Sürekli kayıplar ve bölgesel kayıplardır. Sürekli kayıplar, akışkan ile boru iç çeperleri arasındaki sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıptır. Sürtünmenin neden olduğu kayıplar akışkan sistemde dolaşırken, sistemin cidarları ile sürtünme halinde olduğu için basınç düşmesi meydana gelmektedir. Bölgesel kayıplar ise akışkanın akmakta olduğu borunun boyut ve şeklinin değişmesi veya akışkan yolu üzerindeki hidrolik elemanlar (valf, dirsekler vb) üzerinde meydana gelen kayıplardır.

Endüstriyel uygulamalarda, basınç kaybı önemli bir tasarım parametresidir. Özellikle gerekli pompa kapasitesinin belirlenmesinde ve boru sisteminin tasarımında daha hassas analizlerin yapılması için bir esas teşkil eder. Basınç kaybının artırılması, akışkanın geçtiği boru ve kanal cidarlarının geometrik yapıları değiştirilerek yapılmaktadır. Dairesel kesit, üçgen, eşkenar dörtgen, yamuk, yarı-eliptik, sinüzoidal kanallar veya ondüleli kanallar ve türbülötörler her zaman için akışta düzensizlikler oluştururlar. Bu da sistemde oluşan basınç kaybını artırıcı yönde etkisi olmaktadır. Özellikle ondüleler akışa düzensizlik kazandırma eğilimindedirler. Bir kanal boyunca akışta ondüle genliği, ondüle uzunluğu, ondüle adedi, ondüle adım sayısı gibi parametreler akışta düzensizlikler oluşturur, basınç kaybı ve sürtünmeyi önemli oranda değiştirmektedirler.

Ondüleli borularda sürtünme katsayısının belirlenmesi, farklı debilerde boru boyunca oluşan basınç kaybı ölçülerek yapılmaktadır. Sistemdeki basınç kaybı ise gerekli pompa gücünü belirlemektedir.

Yaygın bir şekilde kullanılan iç içe borulu ısı değiştiricilerinin tasarımında bazen ondüleli borular tercih edilmektedir. Düz borular yerine ondüleli boruların kullanılmasıyla ısı değiştiricilerinin boyutları küçültülmektedir. Çoğu ısı transfer cihazlarında örneğin iç içe borulu ısı değiştiricilerinde, tabandan ve duvardan ısıtma sistemlerinde ve güneş kolektörlerinde ondüleli borular kullanılmaktadır. Isı transferinin iyileştirilmesi, basınç kaybındaki artış pahasına rağmen gerçekleştirilmektedir.

Basit geometrisi nedeniyle tercih edilen dairesel kesitli borular; Havacılıkta İnşaat, Makine, Kıyı ve Deniz Müh. uygulamalarında akışkan akımları ile etkileşim halinde olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ondüleli borular ise; kanalizasyon şebeke hatları, kolektörler ve drenaj hatları, deniz deşarj hatları, yağmur suyu hatları, tarımda istenmeyen suların uzaklaştırılmasında, çamurlu balçık arazilerin ıslahında, çim spor tesislerinin alt yapısında, karayollarının banket drenajında, temelinde su bulunan binaların temel suyunun atılmasında kullanılmaktadırlar.

Bu deneysel çalışmanın ana amacı, ondüleli cidarlara özellikler kazandıran sürtünme mekanizmalarını saptamak, atık su hatlarında büyük çaplı boruların kullanılmasında bir ön çalışma oluşturması düşünülmüş yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, farklı doluluk miktarı ve debilerde ondüleli borularda ondüle parametrelerinin basınç kaybı ve sürtünme katsayısında ne gibi değişiklikler oluşturduğu deneysel olarak araştırılmıştır.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK İNCELEME

Bu bölümde deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerinin değerlendirilebilmesi için, yapılan hesaplamalarda kullanılan temel kavramlara ve prensiplere değinilmiştir.

2.1 Boru Akımı (cazibesiz akış) Analizi

Uygulamada, dairesel ve dairesel olmayan borulardaki akış ile yaygın olarak karşılaşılır. Binalarda kullanılan sıcak ve soğuk su boruları, petrol ve doğalgaz gibi yakıtların yüzlerce kilometre uzunluğundaki boru hatlarıyla taşınması, vücudumuzdaki kanın damarlarla taşınması ve araç radyatörlerindeki soğutma suyunun borularla taşınması örnek olarak verilebilir.

2.1.1 Boru Akımına Giriş

Boru veya kanallardaki sıvı ve gaz akışından, yaygın olarak ısıtma ve soğutma uygulamaları ile akışkan dağıtım şebekelerinden yararlanır. Bu tür uygulamalarda akışkan çoğunlukla fan veya pompa ile bir akış bölümünde akmaya zorlanır. Boru akımında **basınç düşüşü** ve **yük kaybı** ile doğrudan bağlantılı olan **sürtünme** ayrı bir önem kazanır. Çünkü basınç düşüşü pompalama gücü ihtiyacını belirlemek için kullanılır. Boru hatlarında sıvıyı dolaştırmak için farklı çaplarda, birbirine çeşitli bağlantı elemanları veya dirseklerle bağlanmış borular, debiyi ayarlamak için vanalar ve akışkanı basınçlandırmak için pompalar vardır.

Ayrıca borudaki akışkan parçacıkları arasındaki sürtünme, mekanik enerjinin duyulur ısı enerjisiye dönüşmesinden dolayı, akışkanın sıcaklığında hafif bir artışa neden olur. Fakat sürtünme ısınmasından dolayı oluşan sıcaklık artışı, hesaplamalara dahil edilemeyecek kadar küçük etkilere yol açar ve bundan dolayı göz ardı edilebilir. Örneğin, herhangi bir ısı geçişi yok iken borudaki su akışında giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında dikkate değer bir fark tespit edilemez. Akışta sürtünmenin başlıca sonucu basıncın düşmesidir ve bu yüzden akışkanda oluşan önemli bir sıcaklık değişimi ısı geçişi ile gerçekleşir (Çengel ve Cimbala, 2007).

Akım yönündeki bir en-kesitteki ortalama hız V_{ort} , kütlelenin korunumu ilkesinin sağlanması şartından bulunur.

$$\dot{m} = \rho V_{ort} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (2.1)$$

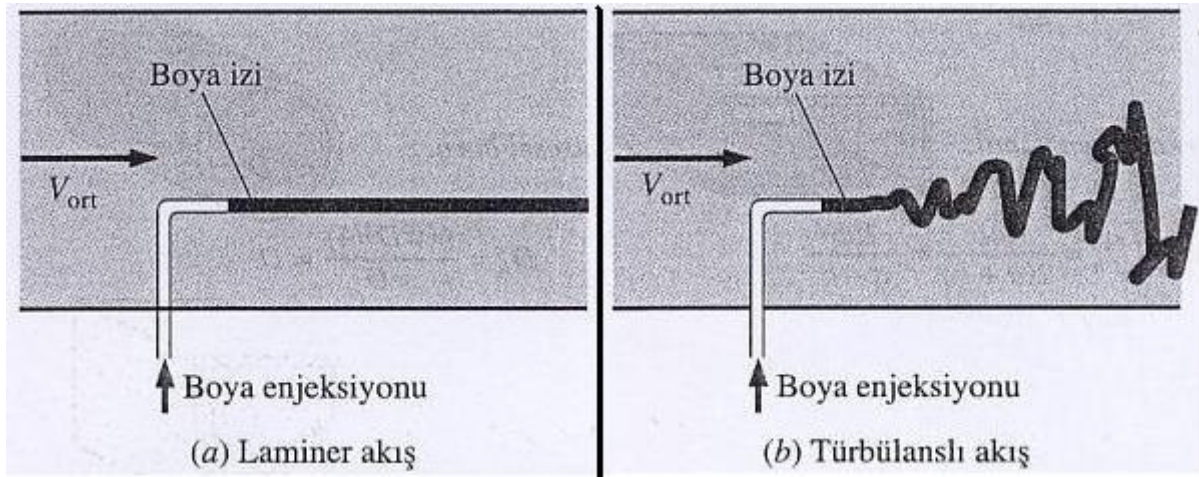
Burada m kütleli debi, ρ yoğunluk, A_c en-kesit alanı ve $u(r,x)$ hız profilidir. Bu durumda R yarıçaplı dairesel borudaki sıkıştırılmaz akışın ortalama hızı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{ort} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (2.2)$$

Dolayısıyla debi veya hız profili bilindiğinde, ortalama hız kolaylıkla hesaplanabilir.

2.1.2 Laminer ve Türbülanslı Akış

Borudaki akışın dikkatli bir şekilde incelenmesi şu sonucu ortaya çıkarır: Akış, düşük hızlarda akım çizgisi halindedir, fakat hız kritik bir değerin üstüne çıktığında karmakarışık bir hal alır (Şekil 2-1). Birinci durumdaki akış rejimine **laminer** denir ve düzgün akım çizgileri ve çok düzenli hareketi ile tanınır. İkinci duruma ise **türbülanslı** akış denir, hız çalkantıları ve çok düzensiz hareketi ile kendini belli eder. Laminerden türbülanslı akışa **geçiş** aniden olmaz. Daha çok, akış tamamen türbülanslı oluncaya kadar laminer ve türbülanslı akış arasında gider-gelir. Uygulamada karşılaşılan çoğu akışlar türbülanslıdır.



Şekil 2.1 Bir boru içerisindeki akışta renkli boyanın davranışı (Çengel ve Cimbala, 2007)

İngiliz mühendis Osborne Reynolds'un (1842-1912) laminer, geçiş ve türbülanslı akış rejimlerinin varlığını cam boru içindeki akışa boya enjekte ederek doğrulayabiliriz. Akış laminer iken, boyadan oluşan desenin düşük hızlarda düz ve pürüzsüz çizgi halinde olduğunu, geçiş rejiminde çalkantı patlamaları olduğunu görürüz. Boyanın bu zikzakları ve yayılımı, ana akıştaki değişimin ve komşu tabakalardan gelen akışkan parçacıklarının hızlı bir şekilde

karışığının göstergesidir.

Türbülanslı akıştaki hızlı değişimlerin sonucunda akışkanın yoğun bir şekilde karışması akışkan parçacıkları arasındaki momentum geçişini artırır. Bu da yüzeydeki sürtünme kuvvetini ve dolayısıyla gerekli pompalama gücünün artırır. Akış tam gelişmiş olduğundan sürtünme faktörü maksimum değerine ulaşır (Çengel ve Cimbala, 2007).

2.1.3 Reynolds Sayısı “Re”

Laminerden türbülanslı akışa geçiş geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, yüzey sıcaklığı, akışkan türü ve daha birçok şeye bağlıdır. Osborne Reynolds, yaptığı deneylerinde, akış rejiminin temelde akışkandaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranına bağlı olduğunu keşfetmiştir. Bu orana Reynolds sayısı denir ve dairesel borudaki iç akış için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{V_{ort} D}{\nu} = \frac{\rho V_{ort} D}{\mu} \quad (2.3)$$

Burada V_{ort} = ortalama akış hızı (m/s), D = çap (m) ve $\nu = \mu / \rho$ kinematik viskozite katsayısı olarak kullanılmıştır.

Laminer, geçiş ve türbülanslı akışlar için Reynolds sayısı:

$$2300 \leq \begin{cases} Re \leq 2300 & \text{laminer akış} \\ Re \leq 4000 & \text{geçiş akışı} \\ Re \geq 4000 & \text{türbülanslı akış} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.1.4 Basınç ve Yük Kaybı

Boru akışı analizinde ilgilendiğimiz diğer bir büyüklük de basınç düşümü “ ΔP ” dir. Çünkü bu ifade akışı sürdürebilmek için gereken pompa gücü ile doğrudan ilgilidir.

$dP/dx = \text{sabit}$, basıncın P_1 olduğu $x = x_1$ ’ den basıncın P_2 olduğu $x = x_1 + L$ ’ye kadar integre edilirse,

$$\frac{dp}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2.5)$$

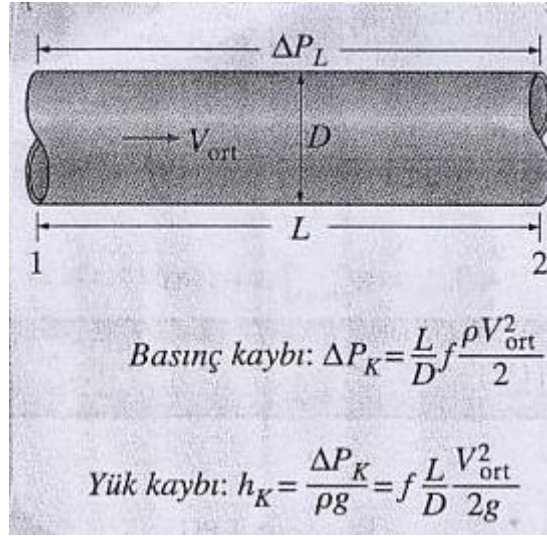
sonucu elde edilir. Basınç düşüşü, laminer akış için:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu LV_{ort}}{R^2} = \frac{32\mu LV_{ort}}{D^2} \quad (2.6)$$

biçiminde ifade edilebilir. “ Δ ” işareti genelde, $\Delta y = y_2 - y_1$ gibi son ve ilk değer arasındaki farkı göstermek için kullanılır. Fakat akışkan akışında “ ΔP ”, basınç düşüşünü belirtmek için kullanılır ve bundan dolayı $P_1 - P_2$ 'dir. Viskoz kuvvetlerden kaynaklanan basınç düşüşü tersinmez bir basınç kaybını temsil eder ve bunun bir kayıp olduğunu vurgulamak için **basınç kaybı** “ ΔP_K ” olarak adlandırılır (orantılı olduğu yük kaybı h_k gibi). P_1 'den P_2 'ye basınç düşüşü, bütünüyle viskoz etkilerden ileri gelir ve bir akışkanda V_{ort} ortalama hızı ile akarken uğradığı basınç kaybı “ ΔP_K ” yı temsil eder.

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

$$\Delta P_K = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{ort}^2}{2} \quad (2.7)$$



Şekil 2.2 Basınç kaybı ve yük kaybı ifadeleri (Çengel ve Cimbala, 2007)

biçiminde ifade edilmektedir (Şekil 2-2). Bu denklemde $\rho V_{ort}^2 / 2$ ifadesi dinamik basınç, “ f ” ise **Darcy sürtünme faktörüdür**:

$$f = \frac{8 \tau_w}{\rho V_{ort}^2} \quad (2.8)$$

Bu katsayıya **Darcy-Weisbach sürtünme faktörü** de denir. Katsayı, adını Fransız Henry Darcy (1803-1858) ve Alman Julius Weisbach (1806-1871)'dan almıştır.

Denklem 2-6 ve 2-7'yi birbirine eşitler ve buradan “ f ” çekilirse dairesel borudaki tam gelişmiş akış için sürtünme faktörünü elde ederiz. Dairesel boru, laminer akış:

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{ort}^2} = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

Bu denklem, laminer akışta sürtünme faktörünün sadece Reynolds sayısının fonksiyonu olduğunu ve boru yüzeyindeki pürüzlülükten bağımsız olduğunu gösterir.

Boru sistemlerinin analizinde, basınç kayıpları genelde yük kaybı “ h_k ” denen eşdeğer akışkan sütunu yüksekliği cinsinden ifade edilir. Akışkan statüğinden $\Delta P = \rho g h$ olduğu, basınç farkı “ ΔP ”, $h = \Delta P / \rho g$ akışkan yüksekliğine karşılıktır. Buna göre “ ΔP_K ” yı “ ρg ” ile bölerek boru yük kaybı elde edilir. Yük kaybı:

$$h_K = \frac{\Delta P_K}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{ort}^2}{2g} \quad (2.10)$$

Yük kaybı “ h_k ” borudaki sürtünmeden kaynaklanan kayıpları yenmek için akışkanın pompa tarafından çıkarılması gereken ilave yüksekliği temsil eder. Yük kaybı viskoziteden kaynaklanır ve doğrudan doğruya çeper kayma gerilmesi ile ilgilidir. Denklem 2-7 ve 2-10 dairesel ve dairesel olmayan borulardaki hem laminer hem de türbülanslı akış için geçerlidir, fakat Denklem 2-9 sadece dairesel borulardaki tam gelişmiş laminer akış için geçerlidir.

Basınç kaybı (veya yük kaybı) belirlendikten sonra basınç kaybını yenmek için gereken pompalama gücü,

$$\dot{W}_{pompa,K} = \dot{Q} \Delta P_K = \dot{Q} \rho g h_K = \dot{m} g h_K \quad (2.11)$$

denkleminde bulunur. Burada “ \dot{Q} ” hacimsal debi ve “ \dot{m} ” kütleli debidir.

2.1.5 Borularda Türbülanslı Akış

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan akışkanların çoğu türbülanslıdır. Türbülanslı akışta kütle, momentum ve ısı transferi büyük ölçüde artar. Sonuç olarak **türbülanslı** akış çok daha yüksek **sürtünme**, ısı ve kütle geçişi katsayıları anlamına gelir.

Tam gelişmiş türbülanslı boru akışındaki sürtünme faktörü Reynolds sayısına ve boru pürüzlülüğünün ortalama yüksekliğinin boru çapına oranı olan bağıl pürüzlülük ε/D 'ye bağlıdır. Bu ilişki ve sonuçlar, suni olarak pürüzlendirilmiş (çoğunlukla boruların iç yüzeylerine belirli büyüklükte kum taneciklerini yapışkan bir madde ile yapıştırarak) yüzeyler kullanılarak dikkatlice yapılan deneylerden elde edilmiştir. **Sürtünme faktörü**, debi ölçümlerinden ve basınç düşüşünden hesaplanmıştır.

Elde edilen deneysel verilere eğri uydurma işlemi, 1939'da Cyril F. Colebrook, pürüzsüz ve pürüzlü borularda geçiş ve türbülanslı akışlar için mevcut verileri birleştirmiş ve Colebrook denklemi olarak aşağıdaki bağıntıyı türbülanslı akış için elde etmiştir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (2.12)$$

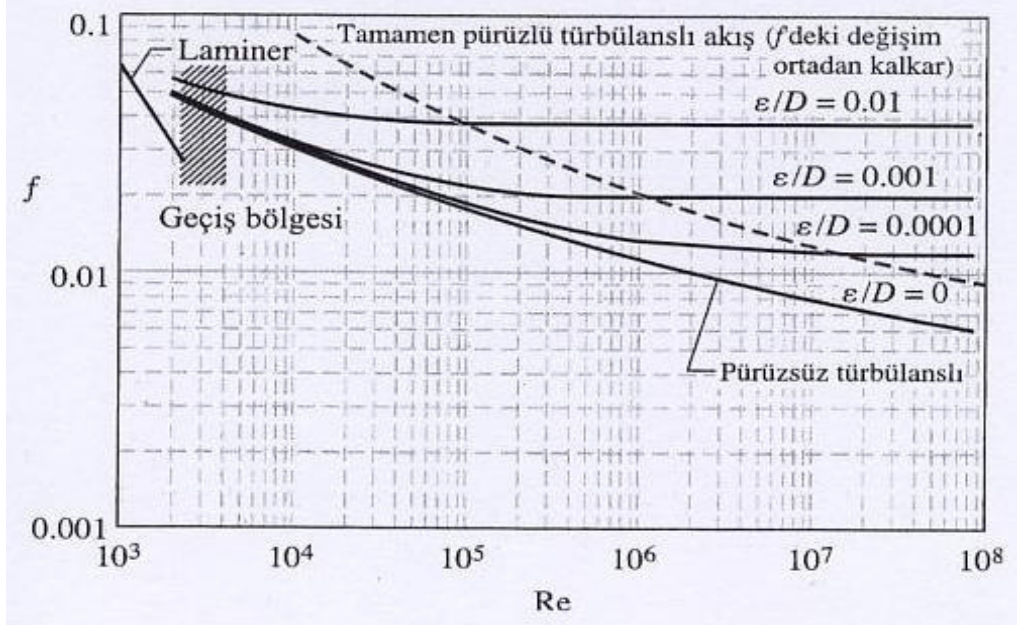
Çizelge 2.1 Eşdeğer pürüzlülük değerleri (Çengel ve Cimbala, 2007)

Yeni ticari borular için eşdeğer pürüzlülük değerleri*	
Malzeme	Pürüzlülük, ε (mm)
Cam, plastik	0 (pürüzsüz)
Beton	0.9-9
Tahta fiçı	0.5
Lastik (kaurçuk)	
Pürüzsüzleştirilmiş	0.01
Bakır veya pirinç boru	0.0015
Dökme demir	0.26
Galvalisli demir	0.15
İşlenmiş demir	0.046
Paslanmaz çelik	0.002
Ticari çelik	0.045

*Bu değerlerdeki belirsizlikler \pm yüzde 60'a kadar çıkabilir.

1842'de Amerikalı mühendis Hunter Rouse (1906-1996) ticari boru pürüzlülüğü tablosunu hazırladı. (Tablo 2.1) Lewis F. Moody (1880-1953), Rouse' un diyagramını bugün yaygın olarak kullanılan haliyle tekrar çizdi (Şekil 2.3). Bu diyagramda boru akışındaki Darcy

sürtünme faktörü, geniş bir aralıkta Reynolds sayısı ve ε/D 'nin fonksiyonu olarak verilmektedir. Bu diyagram, muhtemelen mühendislikte en yaygın olarak kabul edilen ve kullanılan diyagramlardan birisi olup dairesel borular için geliştirilmiş olmasına rağmen, çap yerine hidrolik çapın yazılmasıyla ile dairesel olmayan borular için de kullanılabilir.



Şekil 2.3 Moody diyagramı (Çengel ve Cimbala, 2007)

Ayrıca Moody diyagramı ve buna eşdeğer Colebrook denklemi birçok belirsizlik içerir (pürüzlülük büyüklüğü, deneysel hata, verilerin eğriye uydurulması vb.) ve bundan dolayı elde edilen sonuçlara “kesin” gözüyle bakılmamalıdır. Genellikle diyagramdaki tüm aralıkta doğruluktan yüzde ± 15 'e kadar sapma olduğu göz önüne alınır (Çengel ve Cimbala, 2007).

“ f ” nin yaklaşık açık bağıntısı 1983'te S. E. Haaland tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \quad (2.13)$$

Moody diyagramı incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar yapılabilir:

1. Laminer akışta Reynolds sayısının artması ile sürtünme faktörü azalma eğilimindedir ve sürtünme faktörü yüzey pürüzlülüğünden bağımsızdır.
2. Pürüzsüz bir boruda sürtünme faktörü minimum seviyededir ve pürüzlülük ile artar.
3. Laminerden türbülanslı rejime geçiş bölgesi (Şekil 2.3). ($2300 < Re < 4000$)'dir. Bu bölgedeki akış, laminer veya türbülanslı olabilir veya laminer ile türbülanslı arasında değişebilir.
4. Çok büyük Reynolds sayılarında, belirli bağıl pürüzlülük eğrilerine karşılık gelen sürtünme faktörü eğrileri hemen hemen yataydır ve dolayısıyla sürtünme faktörleri Reynolds sayısından bağımsızdır (Şekil 2.3). Bu bölgedeki akışa tamamen pürüzlü türbülanslı akış veya sadece tamamen pürüzlü akış denir.

Pürüzlülük göreceli bir kavramdır ve “ ϵ ” pürüzlülük yüksekliği, türbülanslı akışta önemli bir parametredir. Mikroskop altında yeteri kadar büyütüldüklerinde bütün malzemeler “pürüzlü” olarak görünür. Akışkanlar mekaniğinde, yüzeydeki pürüz tepeleri viskoz alt tabakanın dışına çıktığında o yüzey pürüzlü olarak tarif edilebilir. Öte yandan alt tabaka pürüzlülük elemanlarını örtüyorsa, o yüzeye pürüzsüz yüzey denir. Cam ve plastik yüzeyler genellikle hidrodinamik olarak pürüzsüz kabul edilir. Viskoz alt tabakanın kalınlığının az olmasına karşın (çoğunlukla boru çapının yüzde 1'inden çok daha az), bu tabakadaki akış karakteristikleri çok önemlidir çünkü borunun geri kalanındaki akışı bunlar tayin eder. Bu yüzeydeki herhangi bir düzensizlik veya pürüzlülük bu tabakayı alt üst eder ve akışı etkiler. Bu nedenle laminer akıştan farklı olarak, türbülanslı akışta **sürtünme faktörü** yüzey **pürüzlülüğünün** kuvvetli bir fonksiyonudur (Çengel ve Cimbala, 2007).

2.2 Açık Kanal Akımı (cazibeli akış) Analizi

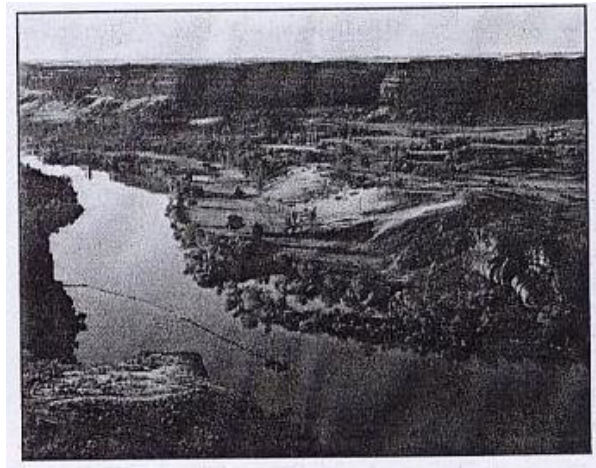
Açık kanal akımı, bir kanaldaki akışın atmosfere açık olmasını anlatmakla birlikte, akışkanın tam doldurmadığı bir borudaki akış da bir açık kanal akımı olarak adlandırılır. Boru akımı bir sıvı veya bir gazla dolu kapalı kanalları kapsarken, açık kanal akımı ise sadece üstü bir gaza (genellikle atmosfer basıncındaki havaya) açık olan sıvıları (su ya da atık su) kapsamaktadır.

Borularda akış yerçekimi veya bir basınç farkıyla gerçekleşirken, bir açık kanaldaki akış yerçekiminin etkisiyle doğal olarak gerçekleşir. Örneğin bir nehirdeki su akışı, yukarıakım ile aşağıakım seviyesi arasındaki yükseklik farkı nedeniyle gerçekleşirken debi ise; yerçekimi ile sürtünme arasındaki dinamik dengeye bağlı olarak gelişir.

Pratikte açık kanal problemlerinde akışkan olarak hemen hemen daima su söz konusudur. Akış, genellikle türbülanslı, üç boyutlu, bazen daimi değil ve geometrik etkiler nedeni ile karmaşıktır. Borulardaki daimi akışın pek çok kavramı hidrolik çap, sürtünme katsayısı, yük kayıpları açık kanal akımlarına da uygulanır.

2.2.1 Açık Kanal Akımına Giriş

Açık kanal akışı, sıvıların atmosfere açık kanallarda ya da kısmen dolu borulardaki akışıdır ve serbest yüzey olarak adlandırılan bir sıvı-gaz ara yüzeyinin varlığı ayırtıcı bir niteliktedir. Pratikte karşılaşılan doğal akışların çoğu örneğin; dereler, nehirler ve taşkınlardaki akışı ile yağmur suyunun ana yollar, araç park alanları ve çatılardan uzaklaştırılması birer açık kanal akışıdır. (Şekil 2.4). İnsan yapısı açık kanal akış sistemleri olan; sulama kanalları, kanalizasyonlar, drenaj kanalları ve yol kenarlarındaki yağmur kanalları ve benzerlerinin tasarımı mühendisliğin önemli bir uygulama alanıdır.



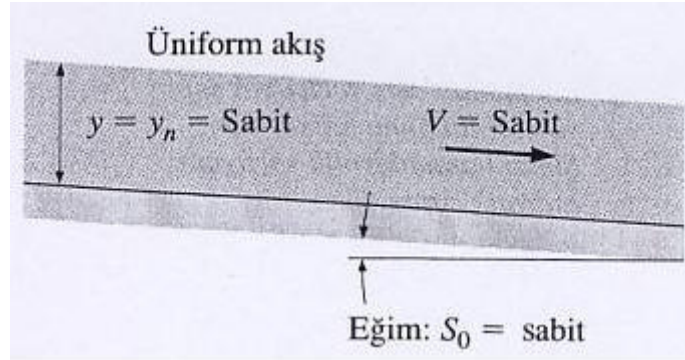
Şekil 2.4 Doğal açık kanal akımı (Çengel ve Cimbala, 2007)

Açık kanal akışları daimi ya da daimi olmayan şekilde sınıflandırılır. Zamana bağlı bir değişim yoksa akış **daimidir**. Açık kanal akışlarını tanımlayan büyüklük, kanal boyunca değişebilen **akış derinliği**dir. Kanal boyunca belirli bir yerdeki akış derinliği zamanla değişmiyorsa akışın daimi olduğu söylenebilir. Aksi takdirde akış daimi değildir.

2.2.2 Akış Bölgeleri

Açık kanallardaki akış ayrıca akış derinliği “ y ” nin (serbest yüzeyin kanalın tabanından itibaren düşey doğrultuda ölçülen yüksekliği) kanal boyunca nasıl değiştiğine bağlı olarak üniform ya da üniform olmayan şekilde de sınıflandırılır. Eğer akış derinliği (ve dolayısıyla ortalama hız) sabit kalıyorsa kanaldaki akış **üniform** akıştır. Aksi takdirde akış **üniform olmayan** ya da **değişken** olarak tabir edilir, bu da akış derinliğinin akış yönünde değiştiğini gösterir.

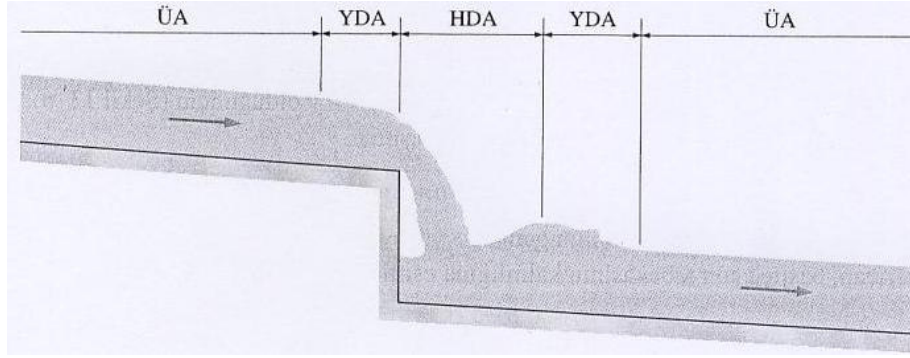
Akışkan; sabit eğimli, sabit pürüzlülüğe sahip ve sabit en-kesitli açık kanallarda sürtünmelerden kaynaklanan yük kaybı, yükseklik kaybı eşitleninceye kadar ivmelenir. Bu noktada limit hıza ulaşılır ve üniform akış yerleşmiş olur. Akış; kanalın eğimi, en-kesiti ve yüzey pürüzlülüğü değişmedikçe üniform olarak sürer. Açık kanal akışlarının önemli bir karakteristik büyüklüğü olan akış derinliği, üniform akışlarda normal derinlik “ y_n ” olarak adlandırılır (Şekil 2.5), (Çengel ve Cimbala, 2007).



Şekil 2.5 Üniform akış (Çengel ve Cimbala, 2007)

Kanalda, savak gibi bir engelin bulunması veya eğim ya da en-kesitin değişmesi akış derinliğinin değişmesine neden olur ve dolayısıyla akış değişken ya da üniform olmayan bir hal alır. Bu tür değişken akışlar; nehirler, sulama sistemleri ve kanalizasyon hatları gibi doğal ya da insan yapısı kanallarda yaygın olarak görülür. Eğer akış derinliği, akış yönünde kısa bir mesafede önemli ölçüde değişiyorsa akış, **hızlı değişen akış (HDA)** olarak adlandırılır. Eğer akış derinliği kanal boyunca uzun bir mesafede yavaşça değişiyorsa akış, **yavaş değişen akış**

(YDA) olarak adlandırılır. Yavaş değişen akış bölgesi, genellikle şekil 2.6’da gösterildiği gibi hızlı değişen ve üniform akış bölgelerinin arasında görülür.



Şekil 2.6 Bir açık kanaldaki akış bölgeleri (Çengel ve Cimbala, 2007)

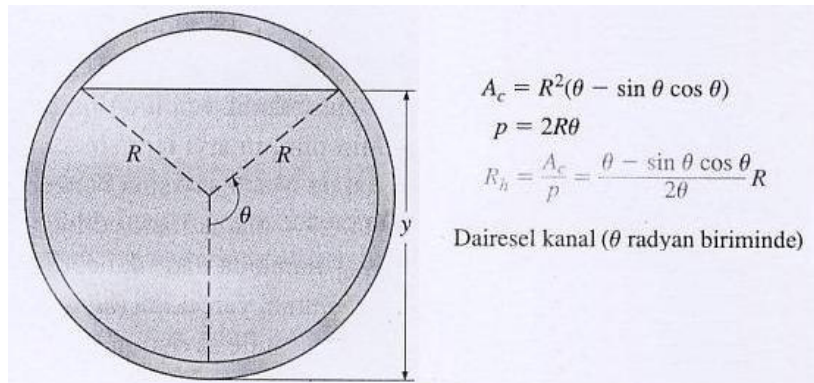
2.2.3 Laminer ve Türbülanslı Akış

Boru akımında olduğu gibi açık kanal akımında da Reynolds sayısına bağlı olarak; laminer, türbülanslı ya da geçiş akışı olabilir ve Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho V R_h}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (2.14)$$

olarak ifade edilir. Burada “V” ortalama sıvı hızı, “ν” kinematik viskozite ve “R_h” en-kesit alanı A_c’nin ıslak çevre uzunluğu “p” ye oranı olarak tanımlanan hidrolik yarıçaptır:

$$R_h = \frac{A_c}{p} \quad (m) \quad (2.15)$$



Şekil 2.7 Dairesel kanal (Çengel ve Cimbala, 2007)

Hidrolik yarıçap karakteristik bir boyut olarak kullanılabilir ve açık kanallarla ilgili işlemlere bir düzen getirir. Buradan hidrolik yarıçap ile hidrolik çap arasındaki ilişki,

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = 4R_h \quad (m) \quad (2.16)$$

olur. Islak çevrenin kanalın sıvı ile temas eden yan yüzeylerini ve tabanını kapsamaktadır. Serbest yüzey ve yan yüzeylerin havaya açık kısımları ıslak çevreye dahil değildir (Şekil 2.7).

2.2.4 Froude Sayısı “Fr”

Açık kanal akışı aynı zamanda, “g” yerçekimi ivmesi, “V” en-kesitteki ortalama sıvı hızı ve “ L_c ” karakteristik uzunluk olmak üzere;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g L_c}} \quad (2.17)$$

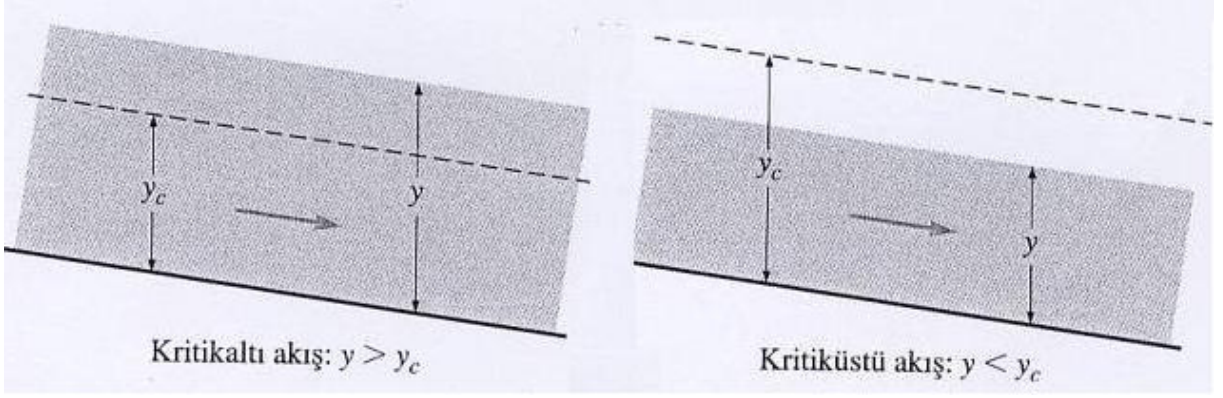
şeklinde tanımlanır. Boyutsuz **Froude sayısının** değerine göre kritikaltı, kritik ya da kritiküstü olarak sınıflandırılır. Geniş kanallar için “ L_c ” akış derinliği “y” alınır ve “ $Fr = V / \sqrt{g y}$ ” olur. Froude sayısı, açık kanallardaki akışın karakterini belirleyen önemli bir parametredir. Akış, aşağıdaki şekilde sınıflandırılır:

$$\begin{aligned} Fr < 1 & \quad \text{kririkaltı ya da sakin akış} \\ Fr = 1 & \quad \text{kritik akış} \\ Fr > 1 & \quad \text{kritiküstü ya da sel akışı} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Froude sayısı aynı zamanda, atalet (dinamik) kuvvetinin, yerçekimi (ağırlık) kuvvetine oranının kareköküdür. Bu, Froude sayısının karesi “ $V^2 / g L_c$ ” nin hem payı hem de paydası, “ ρ ” yoğunluk ve “A” temsili alan olmak üzere, “ ρA ” ile çarpılarak gösterilebilir:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{g L_c} \frac{\rho A}{\rho A} = \frac{2 \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A \right)}{m g} \approx \frac{\text{Atalet kuvveti}}{\text{Yerçekimi kuvveti}} \quad (2.19)$$

Burada “ $L_c A$ ” çarpımı hacmi, “ $\rho L_c A$ ” bu akışkan hacminin kütesini ve “ mg ” de ağırlığını temsil etmektedir.



Şekil 2.8 Kritikaltı ve kritiküstü akış (Çengel ve Cimbala, 2007)

En-kesit alanı “ A_c ” olan bir açık dikdörtgen kanaldan “ \dot{Q} ” hacimsel debisi olan bir sıvıda, akış kritik ise; “ $Fr = 1$ ” ve “ y_c ” **kritik derinlik** olmak üzere ortalama akış hızı ve debisi “ $V = \sqrt{g y_c}$ ”, “ $\dot{Q} = A_c V = A_c \sqrt{g y_c}$ ” şeklinde olur. Kritik derinlik ise aşağıda şekilde ifade edilir. Burada dikdörtgen bir kanal için “ $A_c = b y_c$ ” ve “ b ” kanal genişliğidir.

$$y_c = \frac{(\dot{Q})^2}{g A_c^2} \quad \text{ya da} \quad y_c = \left(\frac{(\dot{Q})^2}{g b^2} \right)^{1/3} \quad (2.20)$$

Kritikaltı akış için sıvı derinliği “ $y > y_c$ ” ve kritiküstü akış için “ $y < y_c$ ” dir (Şekil 2.8).

2.2.5 Basınç ve Yük Kaybı

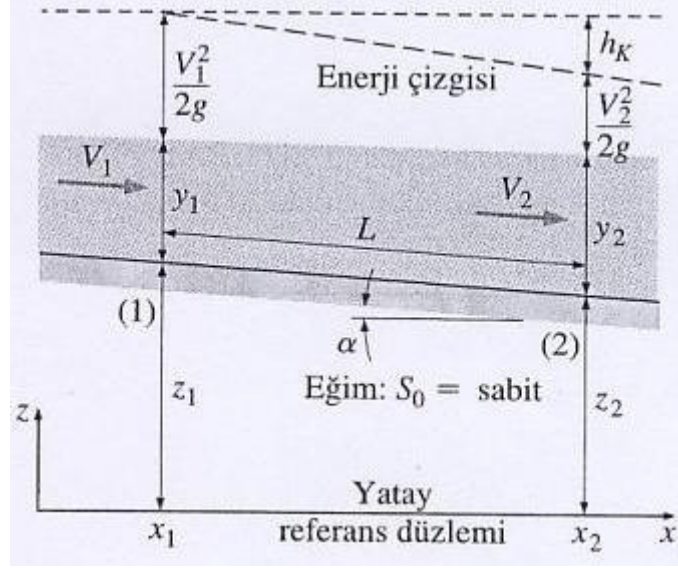
Açık kanal akışlarındaki akışkanların yoğunluğu yaklaşık olarak sabittir ve bu nedenle bir-boyutlu daimi akış için kütle korunumu ya da süreklilik denklemi,

$$\dot{Q} = A_c V = \text{sabit} \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir. Başka bir ifadeyle, akışın en-kesiti ile ortalama akış hızının çarpımının kanal boyunca sabit kaldığı söylenebilir. Kanal boyunca iki bölüm arasındaki süreklilik denklemi,

$$A_{c1} V_1 = A_{c2} V_2 \quad (2.22)$$

olarak ifade edilebilir ve bu, bir sıvının boru içindeki daimi akışı için yazılan süreklilik denklemi ile aynıdır.



Şekil 2.9 Açık kanal akımında akışkanın toplam enerjisi (Çengel ve Cimbala, 2007)

Dolayısıyla bir sıvının, açık bir kanalın herhangi bir en-kesitindeki, yükler cinsinden toplam mekanik enerjisi; “y” akış derinliği, “z” kanal tabanının yüksekliği ve “V” ortalama akış hızı olmak üzere,

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan, yukarıakım bölgesindeki 1 ve aşağıakım bölgesindeki 2 en-kesitleri arasındaki açık kanal akışı, bir-boyutlu enerji denklemi:

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_K \quad (2.24)$$

olarak elde edilir. Sürtünme etkileri nedeniyle oluşan yük kaybı “ h_K ”, boru akışındaki gibi ifade edilebilir:

$$h_K = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{R_h} \frac{V^2}{8g} \quad (2.25)$$

Yukarıdaki bağıntıda “ f ”, ortalama sürtünme faktörü ve “ L ”, kanalın 1 ve 2 en-kesitleri arasındaki uzunluğudur (Şekil 2.9).

Açık kanallardaki akış yerçekiminin etkisiyle gerçekleşir (Şekil 2.9). Bu yüzden kanal genellikle akış yönünde hafif eğimlidir. “ α ” kanal tabanının yatayla yaptığı açı olmak üzere, kanalın taban eğimi;

$$S_0 = \tan \alpha = \frac{z_1 - z_2}{x_2 - x_1} \cong \frac{z_1 - z_2}{L} \quad (2.26)$$

olarak yazılır. Çoğunlukla tabanın eğimi “ S_0 ” çok küçüktür, yani kanalın tabanı neredeyse yataydır, “ $L \cong x_2 - x_1$ ” dir. Düşey yönde ölçülen akış derinliği “ y ” ise, kanal tabanından dikey yönde ölçülen derinlik olarak alınır. Eğer kanalın tabanı düz ise tabanın eğimi de sabittir. Bu durumda 1 ve 2 en-kesitleri arasındaki düşey yükseklik farkı, “ $z_1 - z_2 = S_0 L$ ” olarak ifade edilir. Böylece enerji denklemi Denklem 2.24’den

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + S_0 L = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_K \quad (2.27)$$

şeklini alır.

Bu denklemin üstünlüğü, yükseklik bakımından bir referans düzlemine bağlı olmamasıdır. Dolayısıyla, yük kayıpları ile tabanın eğimi arasında yakın bir ilişki vardır ve yük kayıplarını bir eğim (açının tanjantı) olarak ifade etmek mantıklıdır (Çengel ve Cimbala, 2007).

Şekil 2.9 aynı zamanda enerji çizgisini de gösterir. Enerji çizgisi, genellikle sürtünme kayıplarının bir sonucu olarak kanal gibi akış yönünde eğimlidir ve düşeydeki fark yük kaybı “ h_K ” ye eşittir.

2.2.6 Chezy “C” ve Manning “n” Katsayıları

Açık kanal akımında, Darcy sürtünme katsayısının tarifi haricinde boru akımından farklı olarak Chezy ve Manning katsayıları da tarif edilir.

Eğimi “ S_0 ”, en-kesiti “ A_c ” ve yüzey sürtünme katsayısı “ f ” sabit olan açık kanal akışlarında, yük kayıpları yükseklik düşüşüne eşitlenince limit hız ulaşılır ve üniform akış oluşur. Bu nedenle,

$$h_K = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad \text{ya da} \quad S_0 L = f \frac{L}{R_h} \frac{V_0^2}{8g} \quad (2.28)$$

olur, çünkü üniform akışta, “ $h_K = S_0 L$ ve $D_h = 4R_h$ ” dir. İkinci bağıntı “ V_0 ” için çözümlerse,

üniform akış hızı ve debisi,

$$V_0 = C\sqrt{S_0 R_h} \quad \text{ve} \quad \dot{Q} = CA_c\sqrt{S_0 R_h} \quad (2.29)$$

şeklinde belirlenir. Bu bağıntılarda;

$$C = \sqrt{8g/f} \quad (2.30)$$

olarak tanımlanan “C” katsayısına, **Chezy katsayısı** adı verilir. Bu ilişki Fransız mühendis Antoine Chezy tarafından (1718-1798) verilmiştir. Chezy katsayısı, boyutlu bir büyüklüktür ve değeri, pürüzlü yüzeyleri olan küçük kanallar için $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ’den, düz yüzeyleri olan büyük kanallar için $90 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ’ye kadar değişmektedir.

Fransız Philippe Gaspard Gauckler (1826-1905) ve İrlandalı Robert Manning (1816-1897), Chezy denklemindeki sabit için aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir:

$$C = \frac{a}{n}(R_h)^{1/6} \quad (2.31)$$

Buradaki ”n” **Manning katsayısı** olarak adlandırılır ve değeri kanal yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlıdır.

Deneysel olarak belirlenen “n” değerleri, çok sayıda doğal ve yapay kanal için Tablo 2.2’de verilmiştir. “n” katsayısının değerindeki belirsizlik, özellikle doğal kanallarda fazladır. Bununla birlikte yine de “n” nin, kanalın boyutuna ve şekline bağlı olmadığı, yalnızca yüzey pürüzlülüğü ile değiştiği kabul edilir.

Çizelge 2.2 Manning katsayısı (Çengel ve Cimbala, 2007)

Manning katsayısı n'nin açık kanallardaki su akışı için ortalama değerleri*	
Chow (1959)'dan alınmıştır.	
Duvar Malzemesi	n
A. Yapay kanallar	
Cam	0.010
Pirinç	0.011
Çelik, pürüzsüz	0.012
Çelik, boyanmış	0.014
Çelik, perçinli	0.015
Dökme demir	0.013
Beton, perdahlı	0.012
Beton, perdahsız	0.014
Ahşap, düzeltilmiş	0.012
Ahşap, düzeltilmemiş	0.013
Kil döşenmiş	0.014
Tuğla döşenmiş	0.015
Asfalt	0.016
Oluklu metal	0.022
Moloz taş ile hazırlanmış	0.025
B. Kazılmış toprak kanallar	
Temiz	0.022
Çakıllı	0.025
Yabani otla kaplı	0.030
Düzgün taşlı	0.035
C. Doğal kanallar	
Temiz ve düz	0.030
Derin çukurlu	0.040
Büyük nehirler	0.035
Dağ dereleri	0.050
D. Taşkın yatakları	
Mera, tarım alanı	0.035
Seyrek çalılık	0.050
Sık çalılık	0.075
Ağaçlık	0.150

n'nin belirsizliği \pm % 20 ya da daha fazla olabilir.

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Daha önceki çalışmalarda, boru akımı (cazibesiz akış) şartlarında su ve hava gibi farklı akışkan türlerinde değişik geometrik cidar yapısına sahip dairesel kesitli borular ile kanallarda, basınç kaybı ve Darcy sürtünme katsayısı deneysel ve sayısal olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Genellikle laminer ve türbülanslı akış bölgelerinde çok fazla sayıda çalışma yapılmışken geçiş bölgesinde sınırlı sayıda yayın mevcuttur. Bu da geçiş bölgesinde, akış yapısındaki karmaşıklık ve deneysel zorluklardan kaynaklanmaktadır. Açık kanal akımı (cazibeli akış) şartlarında ise; farklı geometrik özelliğe sahip dairesel kesitli borularda gerek deneysel gerekse sayısal yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. Araştırmalar, üniform ve üniform olmayan akış şartlarında türbülanslı akım bölgesinde yapılmış olup doğal veya yapay kanallarda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, farklı akışkan debilerinde ve kanal eğiminde, kanal boyunca oluşan Darcy ve Manning katsayıları belirlenmiştir. Boru akımında Reynolds sayısı, açık kanal akımında Reynolds sayısı ile birlikte Froude sayısı önemli boyutsuz sayılardır.

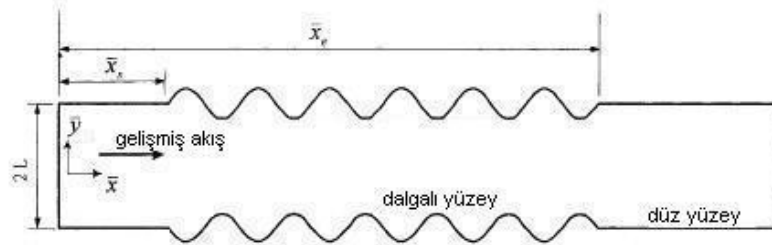
Anlatılanlar doğrultusunda, kaynak araştırması dört ana başlık altında gruplandırılmıştır:

1. Ondüleli veya benzer geometriye sahip borular içindeki akışta Darcy sürtünme katsayısı " f " nin Reynolds sayısı " Re " ile değişiminin nümerik veya deneysel olarak araştırılması.
2. Türbülatorlerde Darcy sürtünme katsayısı " f " nin Reynolds sayısı " Re " ile değişiminin araştırılması.
3. İki fazlı akışlarda Darcy sürtünme katsayısı " f " nin Reynolds sayısı " Re " ile değişiminin araştırılması.
4. Açık kanal akımında Darcy sürtünme katsayısı " f " nin Reynolds sayısı " Re " ile değişiminin araştırılması.

Hazırlanan bu tezde, ondüleli dairesel kesitli bir boruda türbülanslı akışta Darcy sürtünme katsayısı, boru akımı ve açık kanal akımı şartlarında deneysel olarak incelenmiştir. Bu konuda daha önceden yapılmış çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

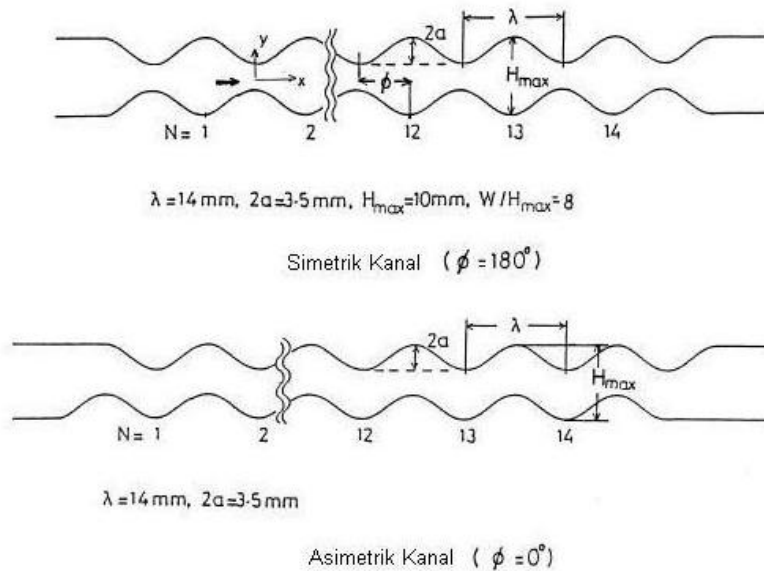
3.1 Ondüleli veya Benzer Geometriye Sahip Borular

(Wang ve Chen, 2000), dalgali yüzeyli kanallardaki akışı nümerik olarak incelemiştir. Dalgali kanaldaki sürtünme faktörü, daimi akış bölgesinde paralel-plakalı kanala göre hemen hemen 2 kat daha fazla olduğu ve geçiş bölgesinde ise sabit kaldığı bulunmuştur.



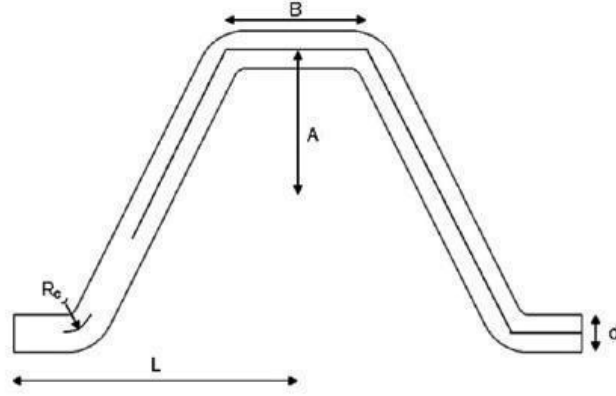
Şekil 3.1 Dalgali yüzeyli kanal (Wang ve Chen, 2000)

(Nishimura vd., 1998), sinüzoidal dalgali cidarlı simetrik ve asimetric kanallarda akış yapısını incelemiştir. Her iki kanal çeşidinde de vortekslerin oluşumu irdelenmiştir. Farklı debilerde akıştaki dalgalanma frekansı arttıkça kayma gerilmelerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu artış asimetric kanalda daha düşüktür. Böylece; kanal geometrilerinin akış karakteristiğine önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur.



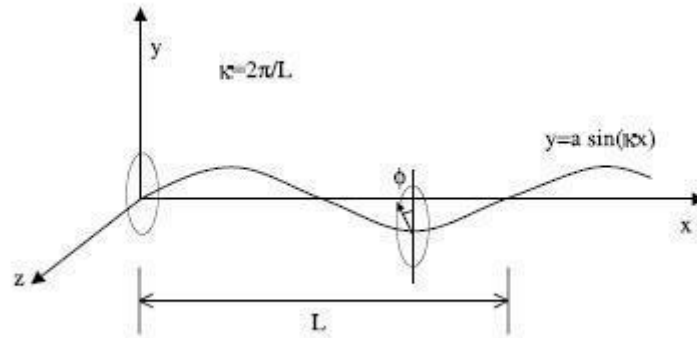
Şekil 3.2 Simetrik ve asimetric kanal (Nishimura vd., 1998)

(Geyer vd., 2007), yarı-dairesel kesitli bir trapezoid kanaldaki akış yapısını CFD (hesaplanabilir akışkanlar dinamiği) kullanarak incelemiştir. Trapezoid elemanlar; dalga boyu($2L$), kanal çapı(d), genlik($2A$), düz kesim uzunluğu(B), dirsek kavis yarıçapı(R_c) ile tanımlanır. Bu tip kanalda basınç kaybında önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir.

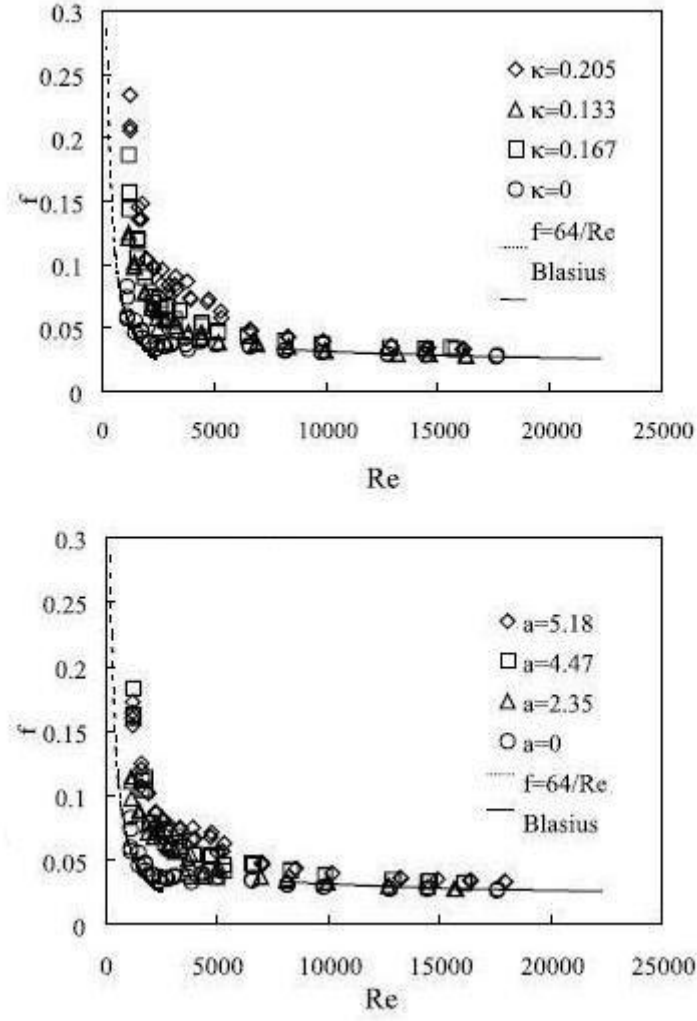


Şekil 3.3 Yarı-dairesel kesitli trapezoid kanal (Geyer vd., 2007)

(Yang vd., 2001), değişken kavisli eğimli bir boruda basınç düşümü ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştir. Basınç düşümünün düz bir boruya göre daha yüksek olduğu ve kavis parametresinin artmasıyla sürtünme faktörünün arttığı bulunmuştur. Burada “a” genlik, “ κ ” dalga sayısını göstermektedir.

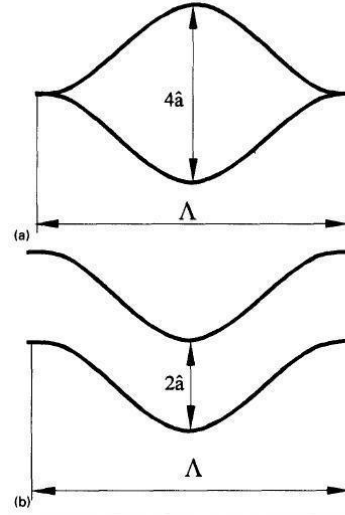


Şekil 3.4 Değişken kavisli eğimli boru (Yang vd., 2001)



Şekil 3.5 f-Re grafiği (Yang vd., 2001)

(Fischer ve Martin, 1996), paralel ondüveli cidarlı kanallarda tam gelişmiş laminer akışta sürtünme faktörünü incelemiştir. Farklı genliklerde ve eşit dalga boyunda iki tip kesit oluşturulmuştur. Sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybının kesit alanına ve Reynolds sayısına bağlı olduğu belirlenmiştir.

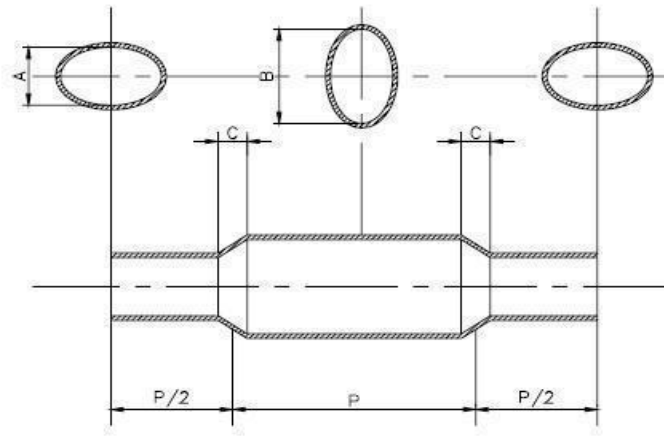


Şekil 3.6 Farklı genlikteki paralel ondüleli cidarlı kanallar (Fischer ve Martin, 1996)

(Li vd., 2006), dalgalı oval bir boruda oluşan sürtünme katsayısı sonuçlarını deneysel olarak belirlemişler ve nümerik sonuçlarla deneysel olarak elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Nümerik sonuçlar FLUENT yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu tip bir boruda laminar akımda “ $f = 84,7/Re$ ” çıkmıştır. Standart k-E modelde elde edilen sürtünme katsayısına ait nümerik sonuçlarla deney sonuçları hemen hemen birbirine yakın çıkmıştır. Fakat RNG k-E modelde önemli bir sapma olduğu görülmüştür (Şekil 3.8).

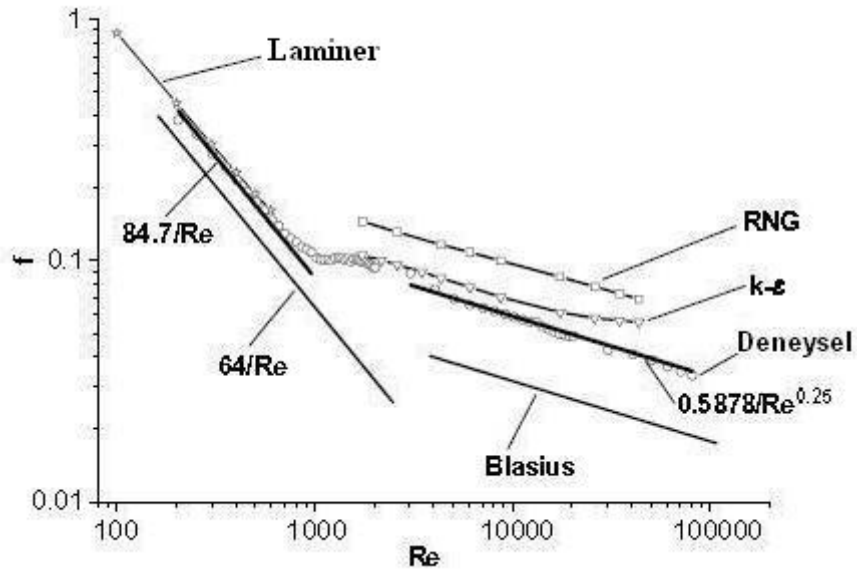


(a) dalgalı oval boru resmi



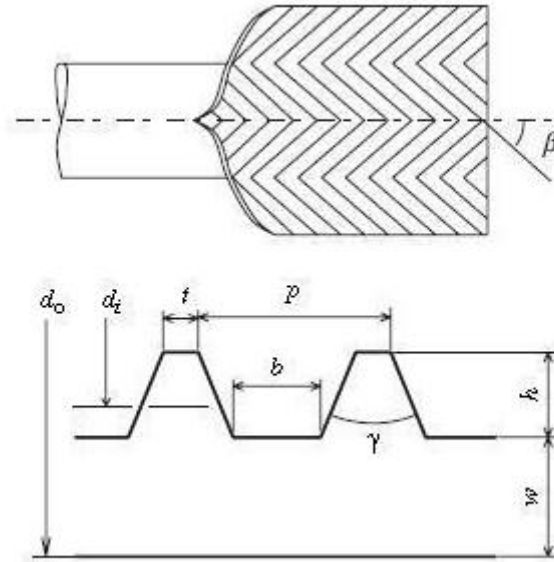
(b) dalgalı oval boru geometrisi

Şekil 3.7 Dalgalı oval boru (Li vd., 2006)



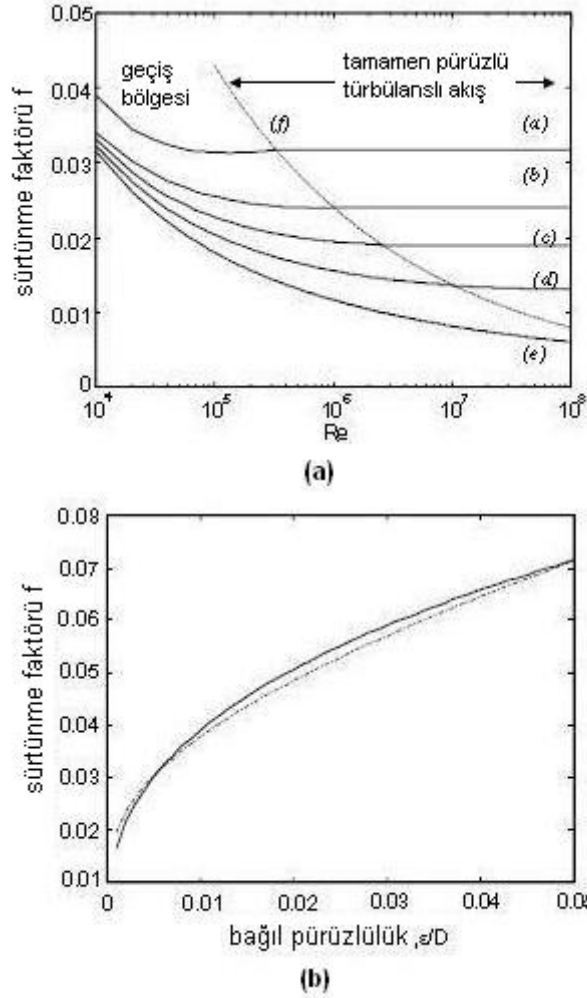
Şekil 3.8 f-Re grafiği (Li vd., 2006)

(Afroz ve Miyara, 2007), balıksırtı mikro kanatlı bir boruda basınç kaybı ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştirlerdir. Balıksırtı mikro kanatlı borudaki basınç kaybının helisel boru ve düz boruya göre oldukça yüksek çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.9 Balıksırtı mikro kanatlı boru (Afroz ve Miyara, 2007)

(Ceylan ve Kelbaliyev, 2002), tam gelişmiş türbülanslı akışta bir borudaki sürtünme katsayısı üzerine pürüzlülük etkisini incelemiştir. Pürüzlülük etkisinin sürtünme katsayısını artırdığı görülmüştür.



Şekil 3.10 (a) f - Re grafiği, (b) f -bağıl pürüzlülük grafiği (Ceylan ve Kelbaliyev, 2002)

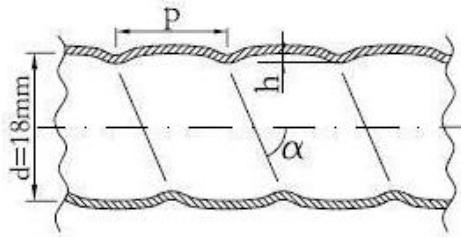
(Romeo vd., 2001), pürüzlü ve pürüzsüz borularda sürtünme faktörünün hesaplanması için geliştirilmiş çeşitli denklemler kullanmışlardır.

Bunlar:

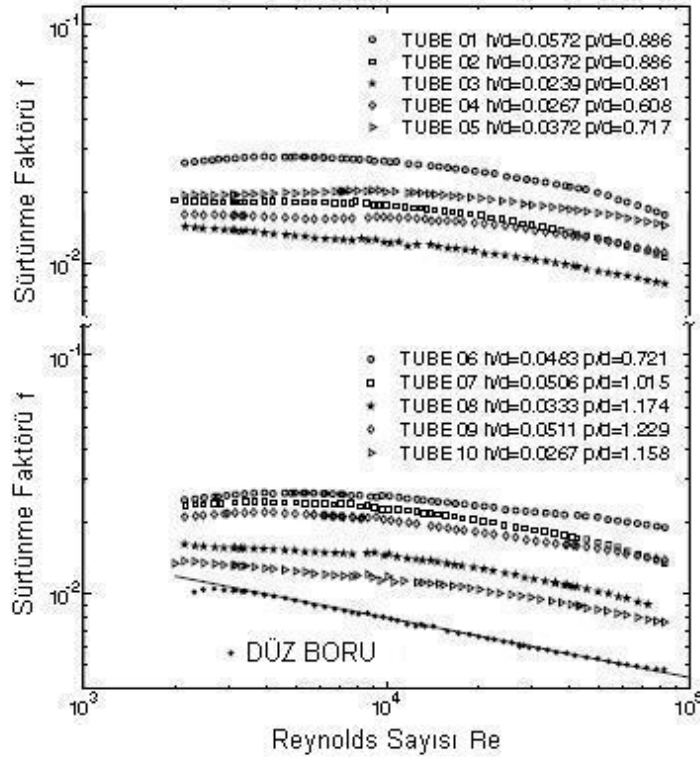
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7065} - \frac{5.0272}{Re} \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.827} - \frac{4.567}{Re} \log \left(\left(\frac{\epsilon/D}{7.7918} \right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.815 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right) \right)$$

Şekil 3.11 Sürtünme faktörü denklemi (Romeo vd., 2001)

(Vicente vd., 2003), türbülanslı akışta spiral ondüleli bir boruda sürtünme faktörü üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Fanning sürtünme katsayısı (Darcy sürtünme faktörünün $\frac{1}{4}$ ü) akış debisinden ve basınç ölçümlerinden bulunmuştur. Boru uzunluğu 5,2 m ve boru iç çapı 18 mm dir. Basınç kaybı deneyleri bir düz ve 10 adet farklı geometride spiral ondüleli boruda yapılmıştır. Akışkan olarak su kullanılıp türbülanslı akışa odaklanılmıştır. Reynolds sayısının artmasıyla sürtünme katsayısı “ f ” nin azaldığı görülmektedir. Spiral ondüleli borudaki basınç kaybı düz boruya göre oldukça yüksek çıktığı ve sürtünme faktörünün %20 ile %300 arasında bir artış olduğu bulunmuştur.

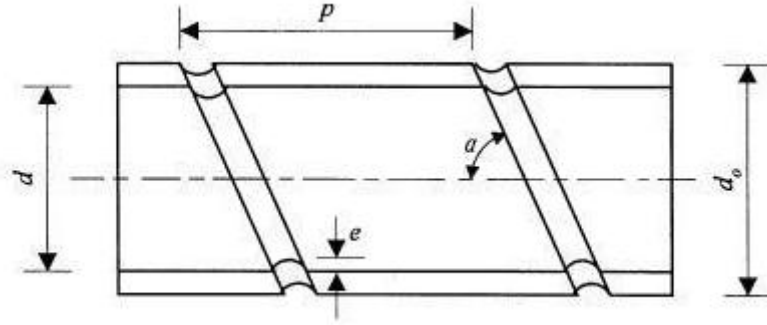


Şekil 3.12 Spiral ondüleli boru (Vicente vd., 2003)

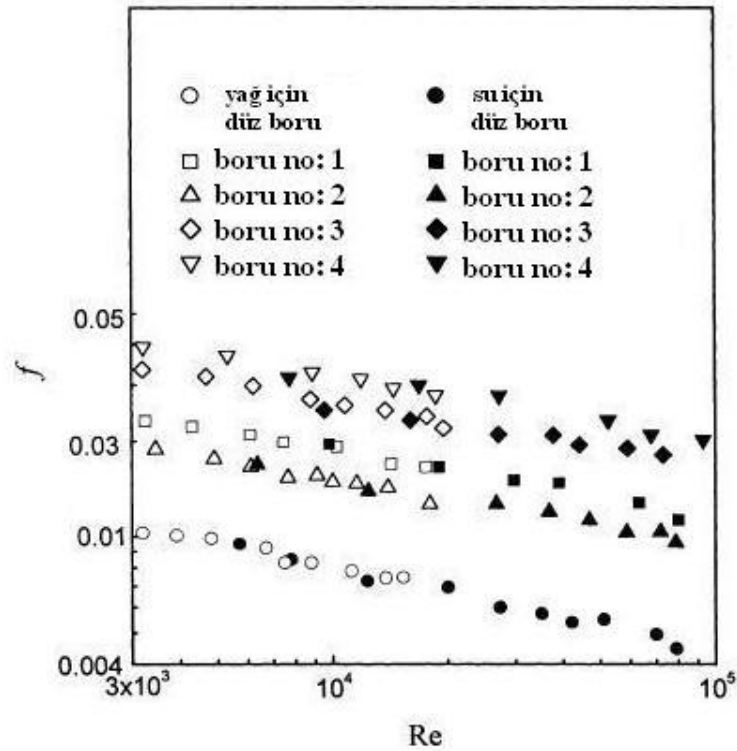


Şekil 3.13 Farklı geometrilerdeki f-Re grafiği (Vicente vd., 2003)

(Dong vd., 2001), spiral ondüleli bir boruda türbülanslı akışta sürtünmeden dolayı oluşan basınç kayıplarını incelemişlerdir. Aynı şartlar altında test borusunda elde edilen sürtünme faktörünün düz boruya göre oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısının artmasıyla “ f ” sürtünme faktörünün azaldığı ve bu azalmanın düz boruya göre daha yavaş bir şekilde olduğu ve test borusunun geometrik parametrelerindeki değişiklik sürtünme faktörünü düz boruya göre en az %120 en fazla %160 arttırdığı görülmüştür.

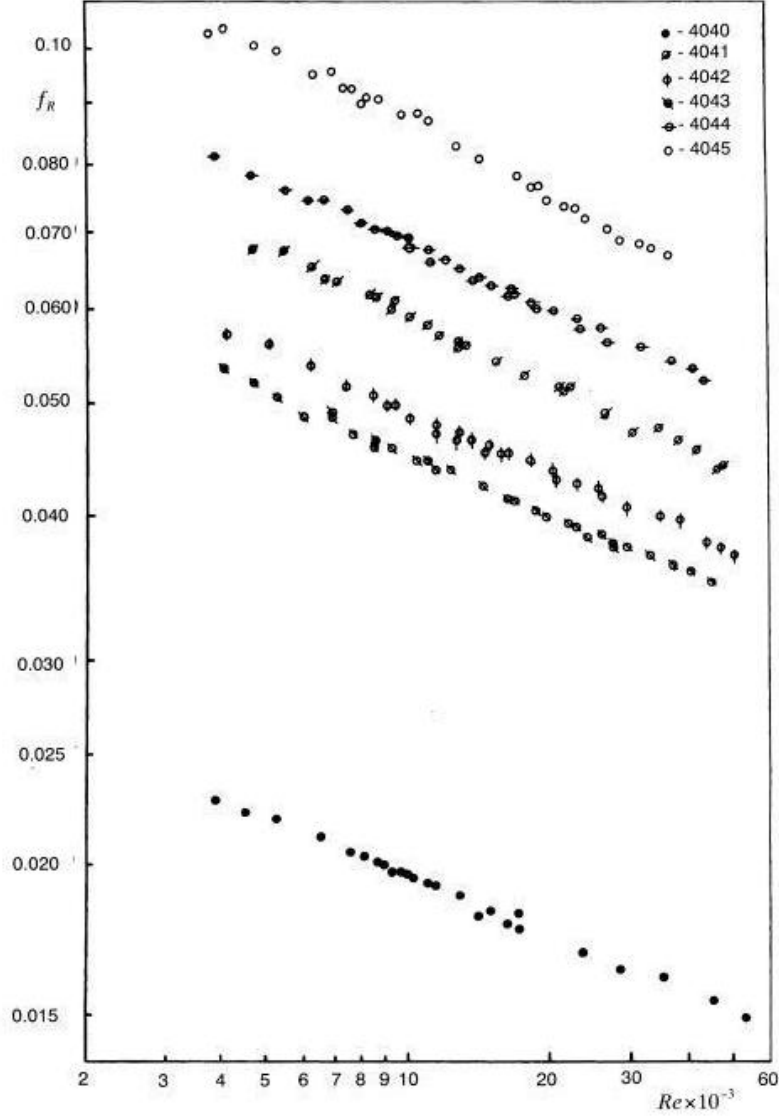


Şekil 3.14 Spiral ondüleli boru (Dong vd., 2001)

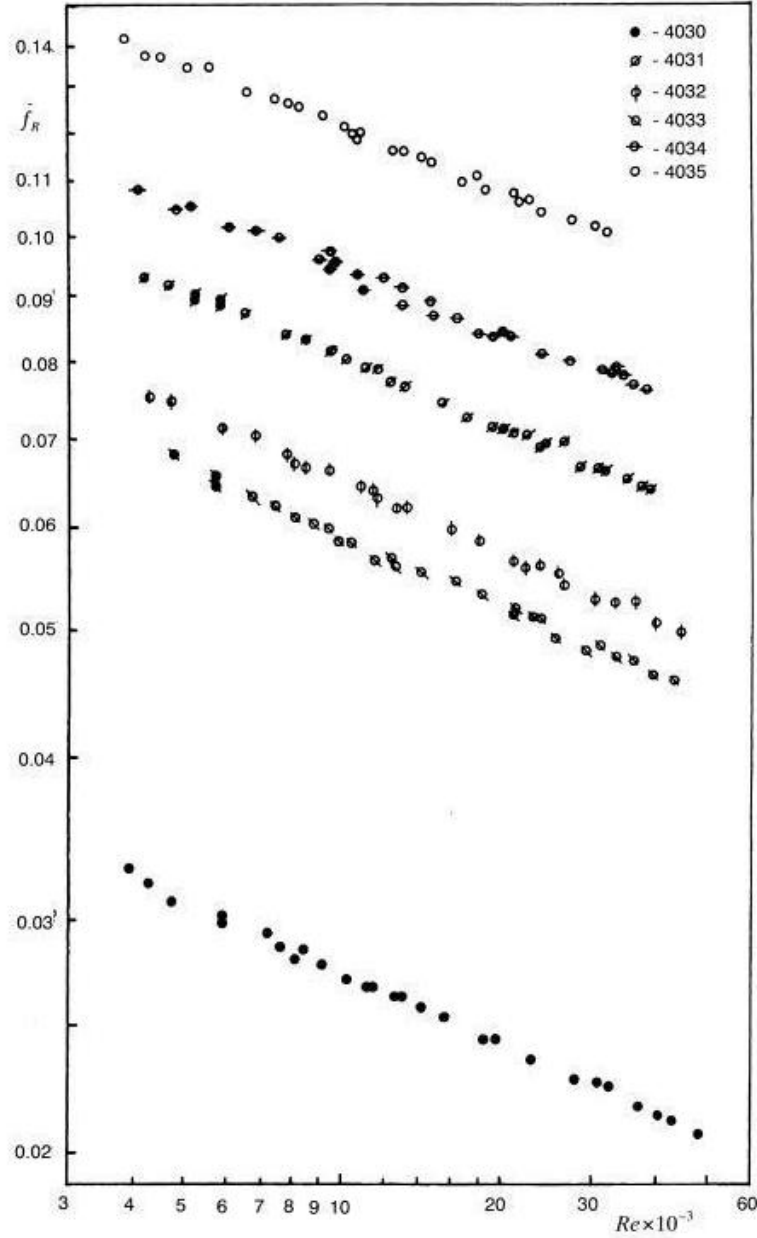


Şekil 3.15 f -Re grafiği (Dong vd., 2001)

(Zimparov, 2000), spiral ondüleli bir boruda sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybını deneysel olarak incelemiştir. Aynı şartlar altında ya da benzer koşullarda türbülanslı akışta spiral ondüleli borudaki sürtünme katsayısı düz borudakine göre daha fazla olduğu, düz boruda Reynolds sayısının artırılmasıyla sürtünme katsayısı “ f ” nin sürekli olarak hızlı bir şekilde azaldığı fakat test borusunda bu azalmanın daha yavaş gerçekleştiği görülmüştür.

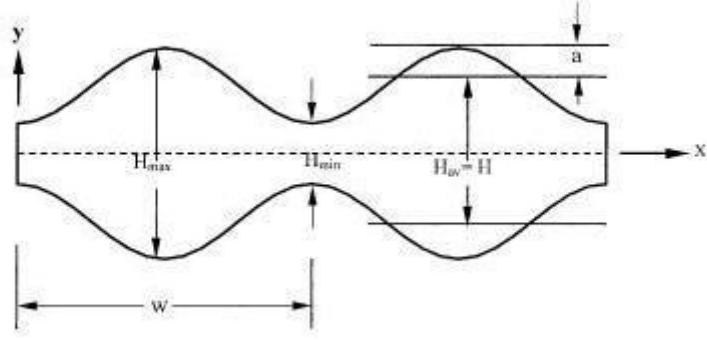


Şekil 3.16 Farklı geometrik parametrelili(4040-4045) f - Re grafiği (Zimparov, 2000)

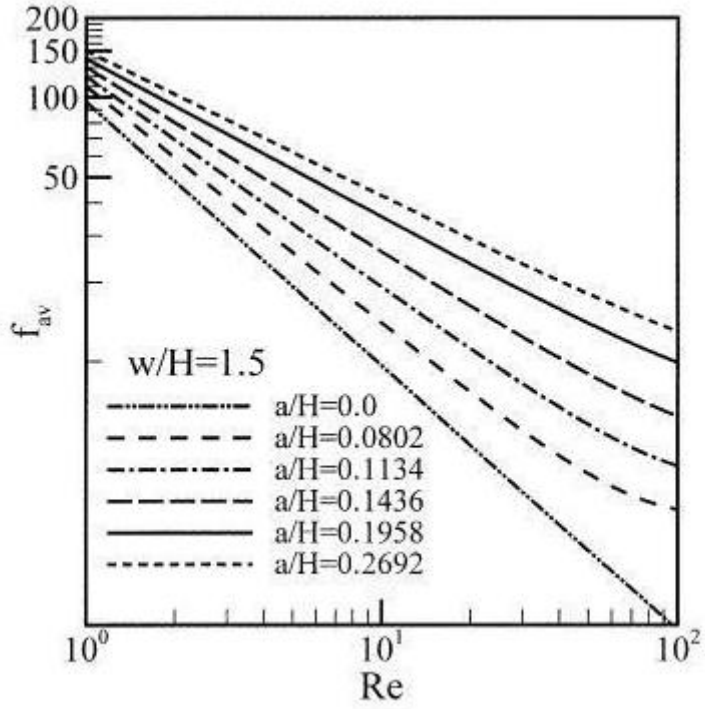


Şekil 3.17 Farklı geometrik parametrelilerle(4030-4035) f-Re grafiği (Zimparov, 2000)

(Mahmud vd., 2002), dalgalı yüzeyli iki paralel plaka içindeki bir akışta sürtünme katsayısını nümerik olarak araştırmışlardır. Şekil 3.19'da sabit bir hatve/çap (W/H) oranında ve farklı yüzey dalgasında (a/H) değerlerinde f-Re grafiği çizilmiştir. Aynı Reynolds sayısında daha büyük yüzey dalgası daha yüksek sürtünme kaybına neden olduğu görülmüştür.

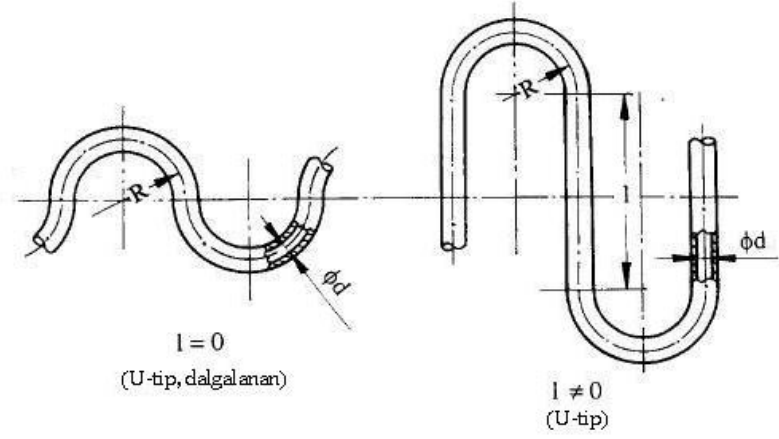


Şekil 3.18 Dalgalı yüzeyli paralel plaka (Mahmud vd., 2002)



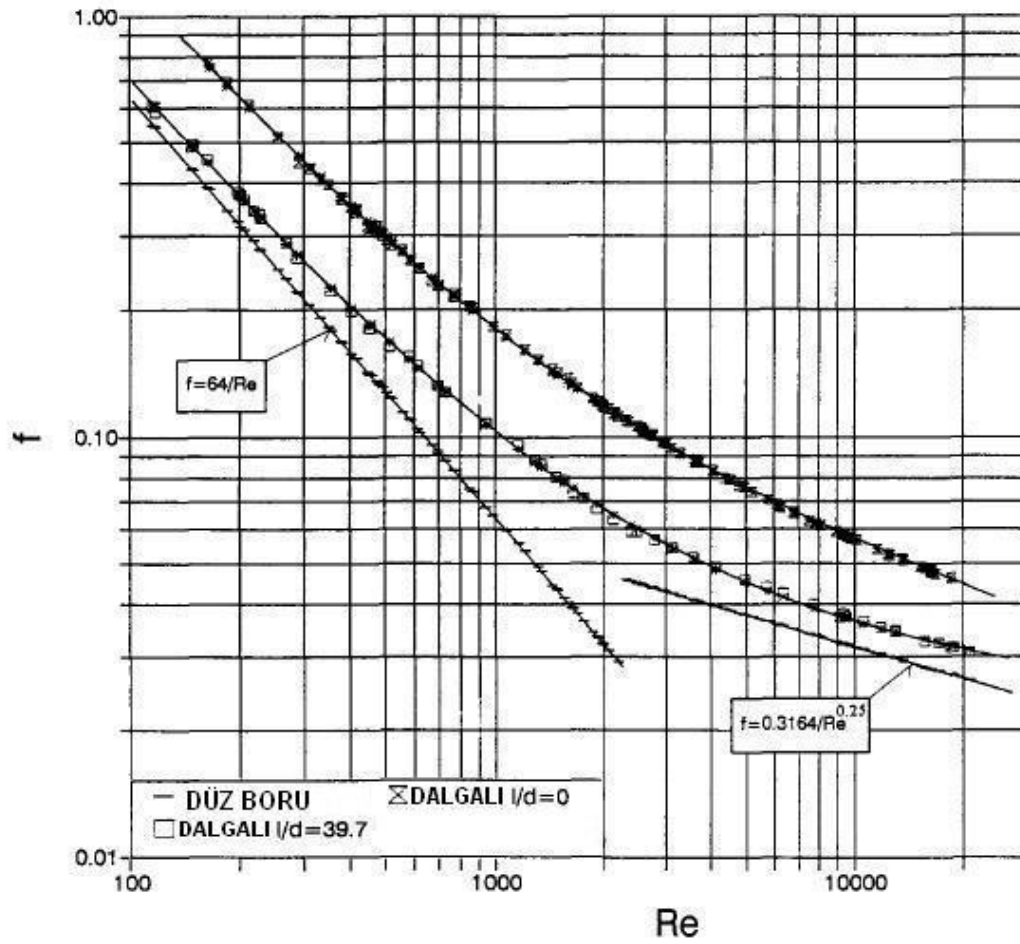
Şekil 3.19 Farklı geometrik parametrelili f -Re grafiği (Mahmud vd., 2002)

(Wojtkowiak ve Popiel, 2000), U-tip dalgalı bir boruda basınç kaybı ölçümlerinin sonuçlarını boyutsuz parametre olan boşluk uzunluğu ($l/d = 0$ ve $l/d = 39,7$) kullanılarak araştırmışlardır. Reynolds sayısının artmasıyla " f " sürtünme katsayısının azaldığı ve $l/d = 0$ için daha yüksek sürtünme katsayısının olduğu görülmüştür. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına karşı benzer bir davranışı helisel boruda ve sinüzoidal boruda da görülmüştür.



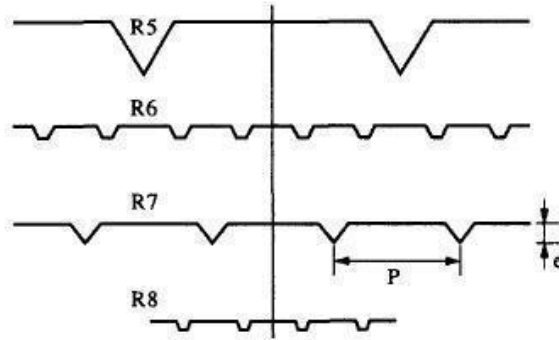
Şekil 1
U-tip dalgali borular ($\varphi = \pi$).

Şekil 3.20 U tip dalgali borular (Wojtkowiak ve Popiel, 2000)

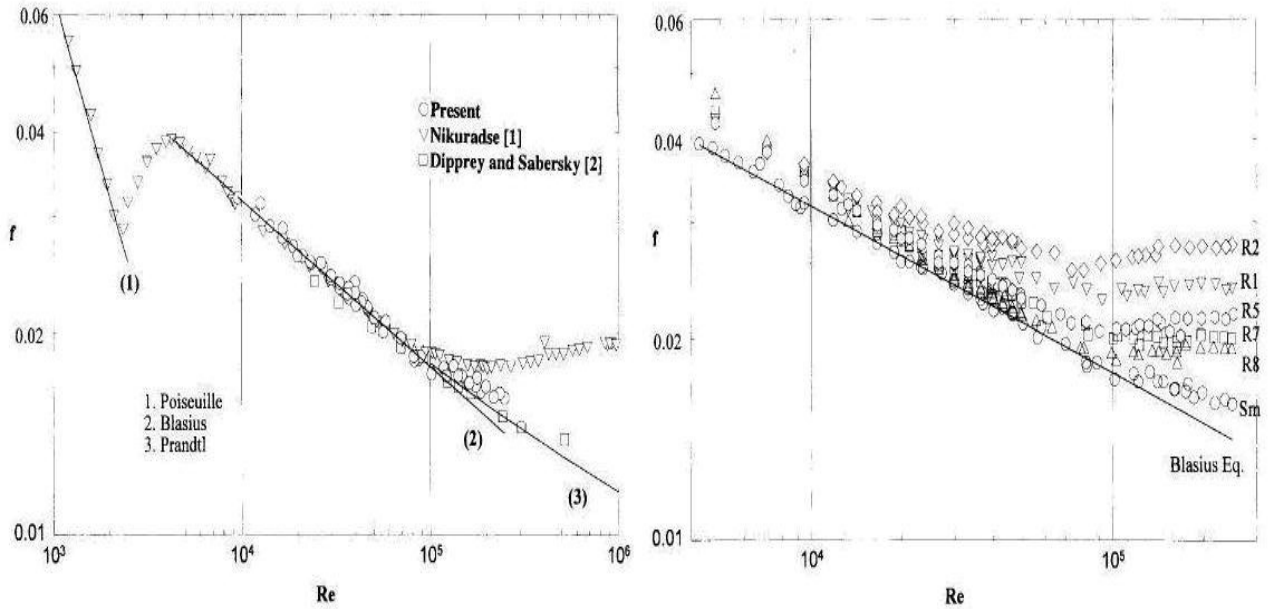


Şekil 3.21 f-Re grafiği (Wojtkowiak ve Popiel, 2000)

(Zhao ve Trass, 1996), boru akımında 4 pürüzlü ve 1 düz yüzey için sürtünme faktörünü basınç kayıplarını ölçerek belirlemiştirler. Düz yüzeyler için sonuçlar Nikuradze, Dipprey ve Sabersky'nin verileriyle karşılaştırılmıştır. Bilinen Blasius, Poiseuille ve Prandtl denklemleri de aynı grafikte gösterilmiştir. Pürüzlü yüzeylerde sürtünme katsayısı düz yüzeylere göre daha yüksek çıktığı ve farklı pürüzlülük değerlerinde sürtünme katsayısının değiştiği görülmektedir. Pürüzlü ve düz yüzeylerde gerek deneysel sonuçlar gerekse literatürdeki denklemler kullanıldığında Reynolds sayısının artmasıyla " f " sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir.

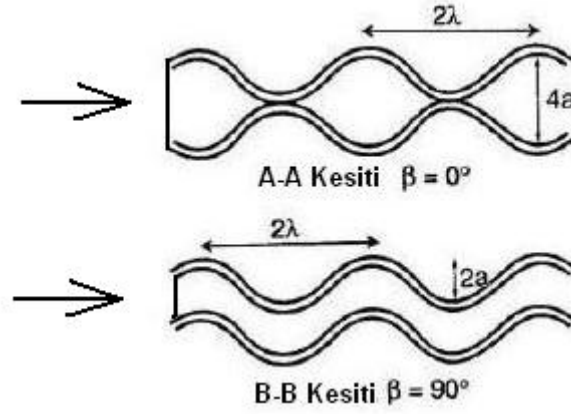


Şekil 3.22 Pürüzlü yüzey şekilleri (Zhao ve Trass, 1996)

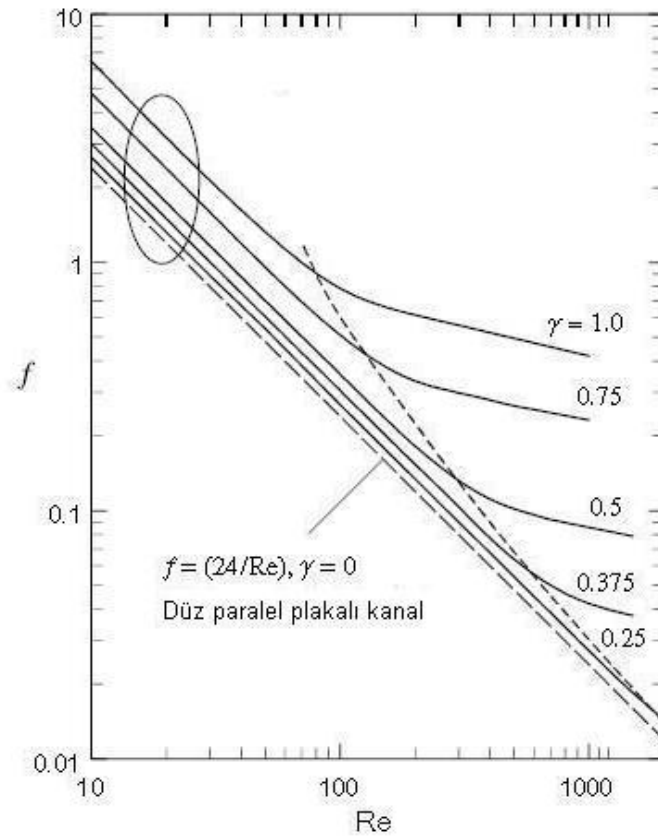


Şekil 3.23 f -Re grafiği (Zhao ve Trass, 1996)

(Metwally ve Manglik, 2003), sinüzoidal ondüleli-plakalı kanallarda sürtünmeden dolayı oluşan basınç kayıplarını nümerik olarak araştırmışlardır. Bu tip bir kanalda sürtünme faktörü " f " nin düz paralel-plakalı kanala göre %18 daha yüksek çıktığı görülmüştür.

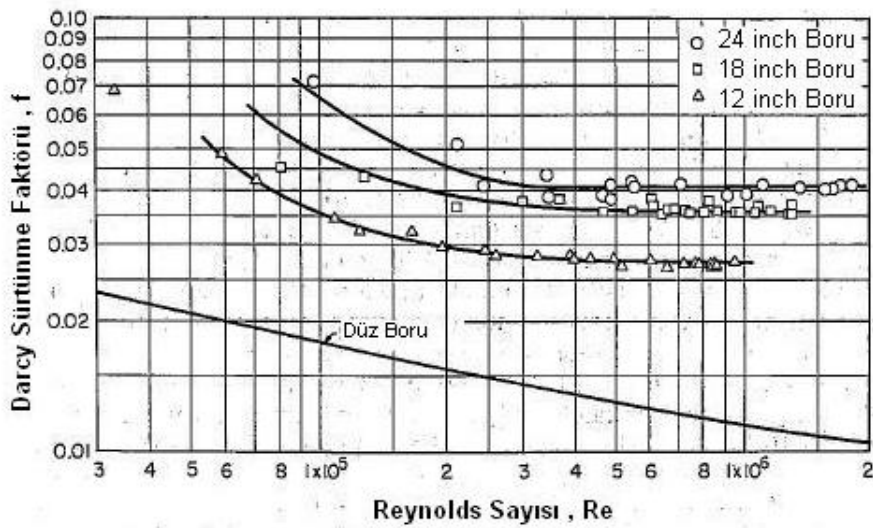
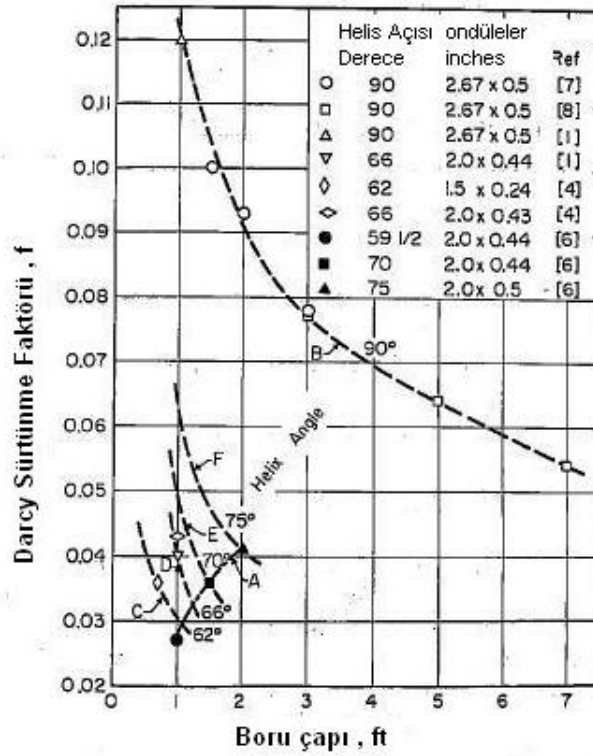


Şekil 3.24 Sinüzoidal ondüleli-plakalı kanal (Metwally ve Manglik, 2003)



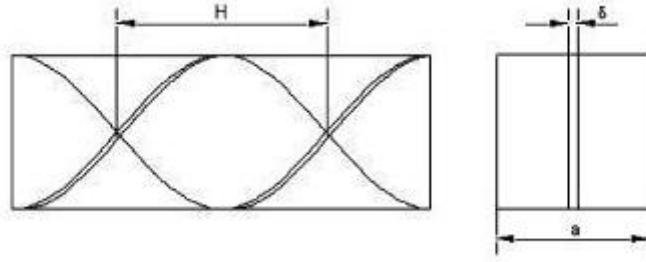
Şekil 3.25 f - Re grafiği (Metwally ve Manglik, 2003)

(Silberman, 1970), ondüleli borularda, helis açısının ve boru çapının sürtünme faktörüne olan etkisini incelemiştir. Sürtünme faktörü " f " nin helis açısının düşürülmesiyle azaldığı ve sabit helis açısında ise boru çapının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Diğer bir parametre olan bağıl pürüzlülük (ondüle yüksekliği/çap) sürtünme faktörü üzerinde helis açısı ve boru çapına göre küçük bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Aynı sonuçları standart ondüleli borularda da karşılaştırdığında benzer eğrilerin ortaya çıktığı görülmüştür.

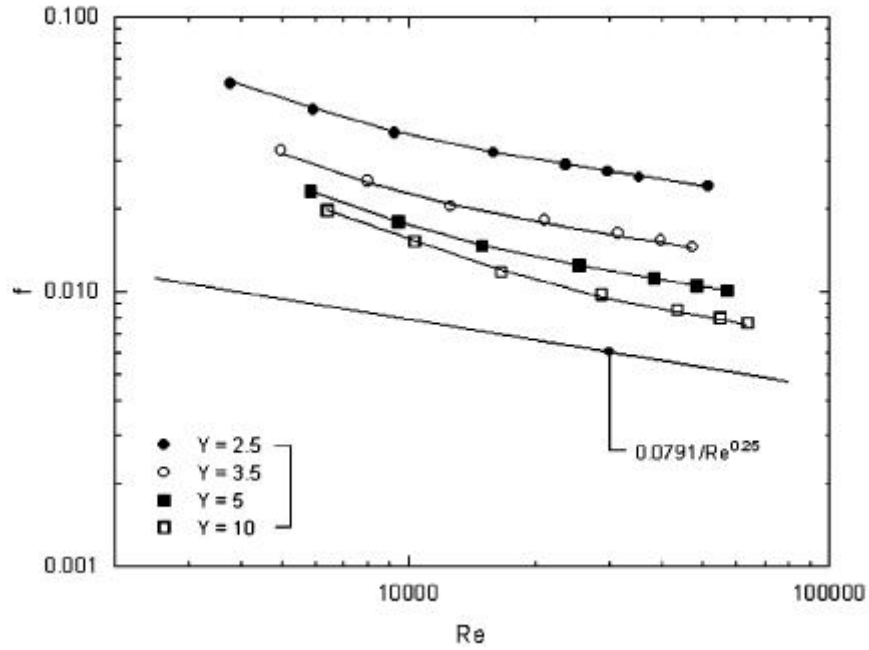


Şekil 3.26 f -boru çapı ve f -Re grafiği (Silberman, 1970)

(Roy ve Date, 2002), farklı büküm oranlarında (H/a) kare kesitli bir kanalda laminar ve türbülanslı akışta sürtünme faktörünün etkisini nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Türbülanslı akışta sabit Reynolds sayısında (Y) büküm oranı küçülünce sürtünme faktörü " f " artmaktadır. Bu çalışmada " f " Fanning katsayısı (Darcy sürtünme faktörünün $1/4$ ü) olarak gösterilmiştir.

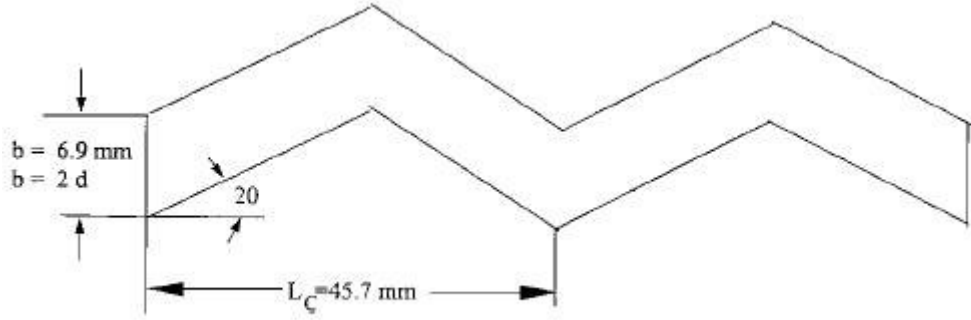


Şekil 3.27 Kare kesitli kanal (Roy ve Date, 2002)

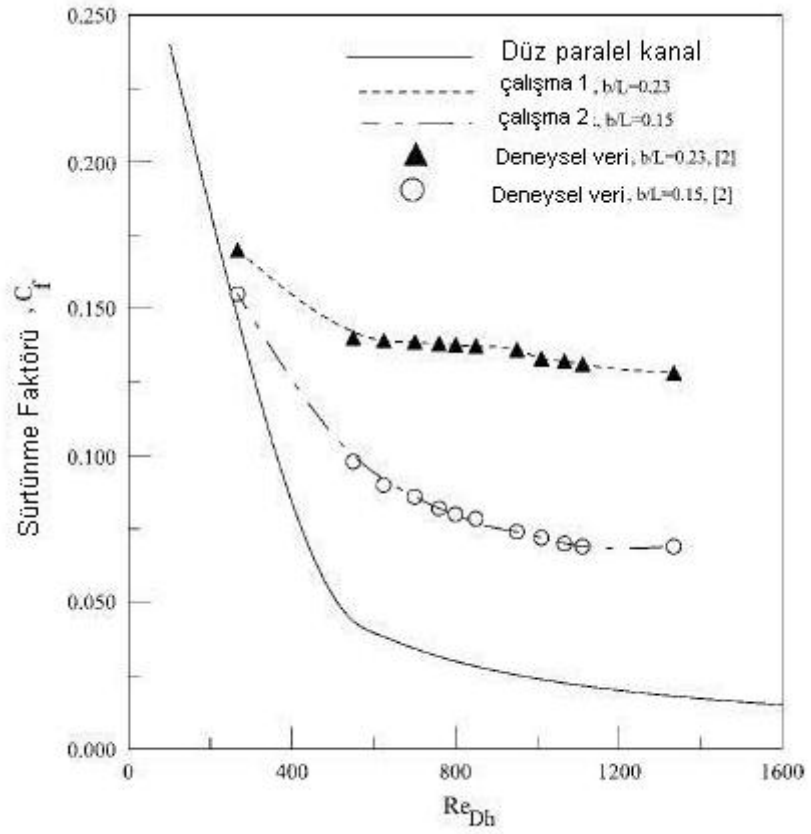


Şekil 3.28 Farklı büküm oranındaki f - Re grafiği (Roy ve Date, 2002)

(Ghaddar ve Hajj, 2000), ondüleli kanallarda viskoz akışta sürtünme faktörünü nümerik olarak araştırmışlardır ve düz plakalı kanalla karşılaştırmışlardır.



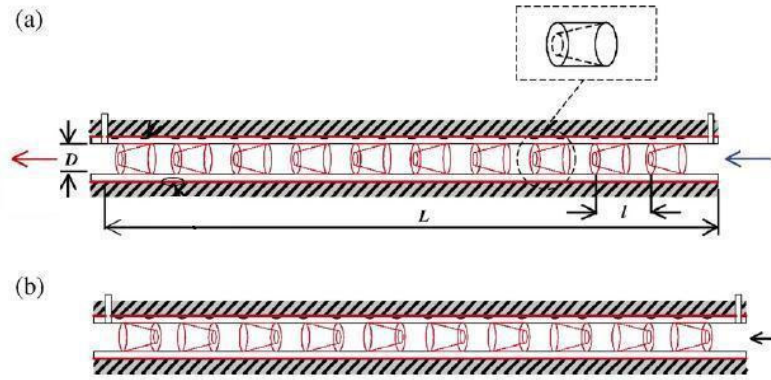
Şekil 3.29 Ondüleli kanal (Ghaddar ve Hajj, 2000)



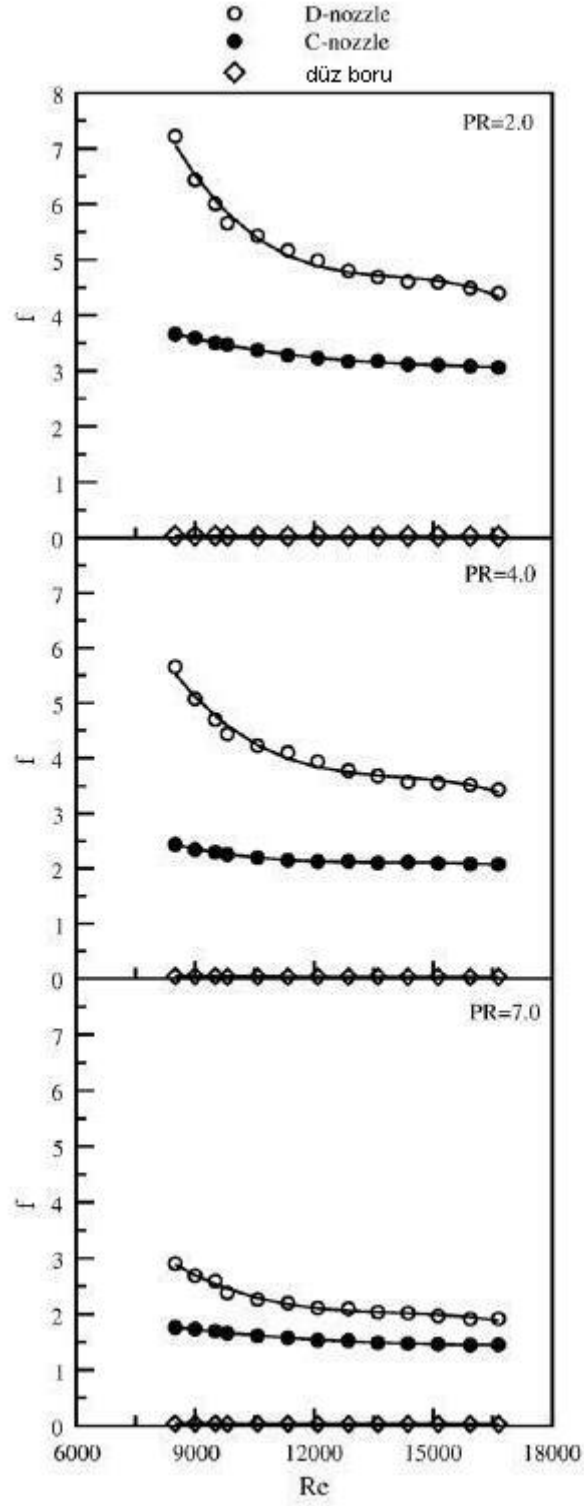
Şekil 3.30 Farklı kanal geometrisindeki f - Re grafiği (Ghaddar ve Hajj, 2000)

3.2 Türbülötörler

(Promvonge ve Eiamsa, 2006), konik-lüle türbülötörle donatılmış dairesel kesitli bir boruda türbülötörün sürtünme faktörü üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Türbülötörler test borusuna iki farklı tipte yerleştirilmiştir.(1) ıraksak lüle (2) yakınsak lüle. Türbülötörler farklı hatve oranlarında (PR) yerleştirildi ve deneysel sonuçlar düz borudaki değerlerle karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki; Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır. Ayrıca; aynı Reynolds sayısında (PR) azaldıkça “ f ” sürtünme katsayısının yine arttığı görülmüştür. ıraksak türbülötörlerde yakınsak olana göre daha yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

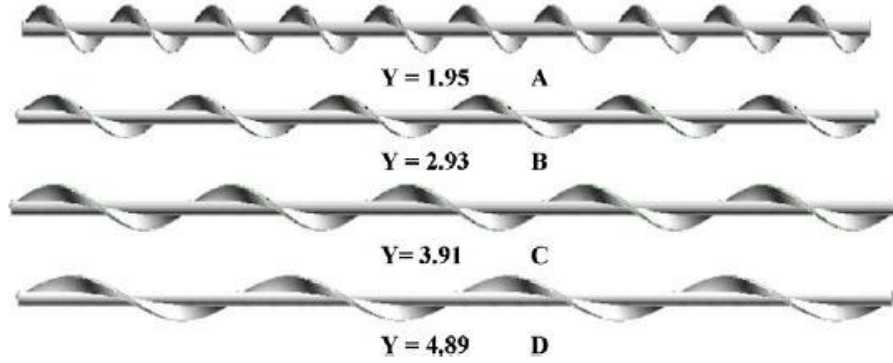


Şekil 3.31 (a) yakınsak türbülötör (b) ıraksak türb. (Promvonge ve Eiamsa, 2006)

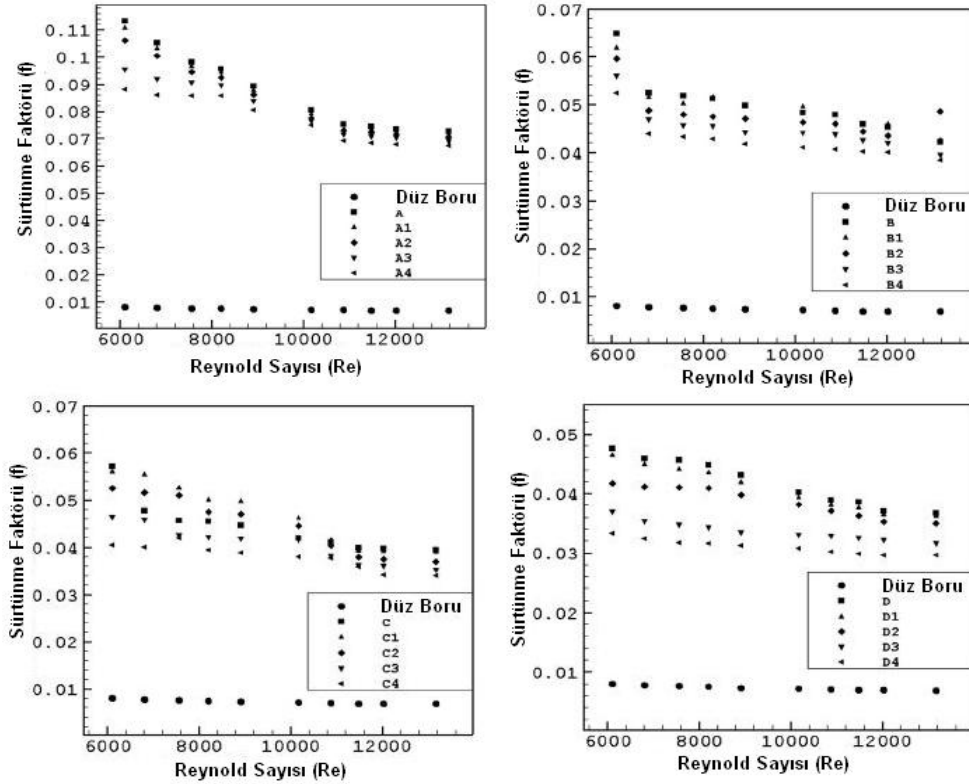


Şekil 3.32 Farklı PR lerde f - Re grafiği (Promvonge ve Eiamsa, 2006)

(Sivashanmugam ve Suresh, 2006), eşit aralıklarla yerleştirilmiş helisel dar sac tipi türbülantörli bir boruda türbülantlı akışta sürtünme katsayısı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. A-B-C ve D 4 farklı tip büküm oranına (Y) sahip ve her birinde de 4 farklı tip ara uzunluğa sahip türbülantörler kullanılmıştır. Elde edilen deneysel veriler düz boruda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Helisel dar sac tipi türbülantörli bir borudaki sürtünme katsayısının düz borudakine göre oldukça yüksek çıktığı görülmüştür.

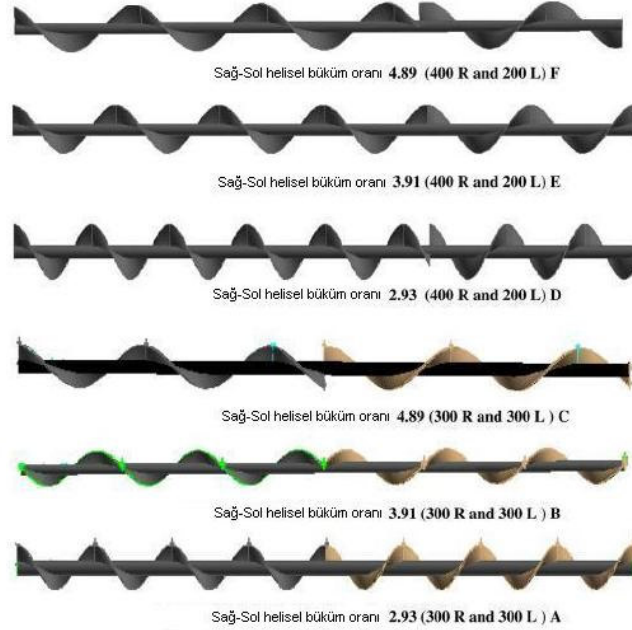


Şekil 3.33 A-B-C ve D tip türbülantörler (Sivashanmugam ve Suresh, 2006)

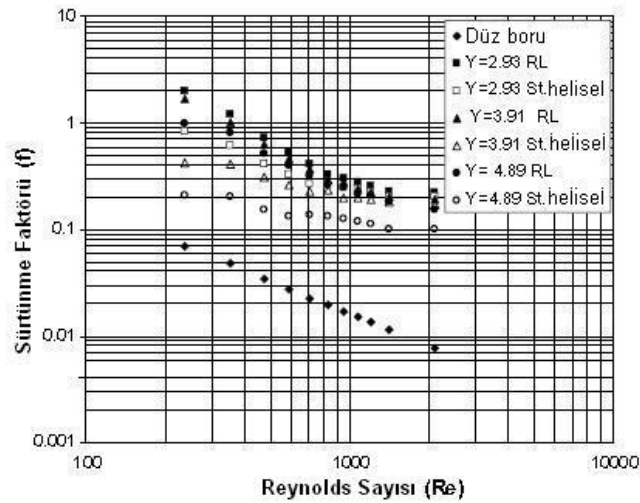


Şekil 3.34 A-B-C ve D tip türbülantörler f-Re graf. (Sivashanmugam ve Suresh, 2006)

(Sivashanmugam ve Nagarajan, 2007), A-B-C-D-E ve F olmak üzere 6 farklı sağ ve sol yönlü helisel dar sac tipi türbülantör bir boruda sürtünme katsayısı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen deneysel veriler daha önce yayınlanmış düz borudaki verilerle karşılaştırılmıştır. Bu tip bir borudaki sürtünme katsayısının düz borudan fazla çıktığı ve Reynolds sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Sürtünme katsayısının düz tip helisel dar sac tipli türbülantör borudakinden de fazla çıktığı görülmüştür.

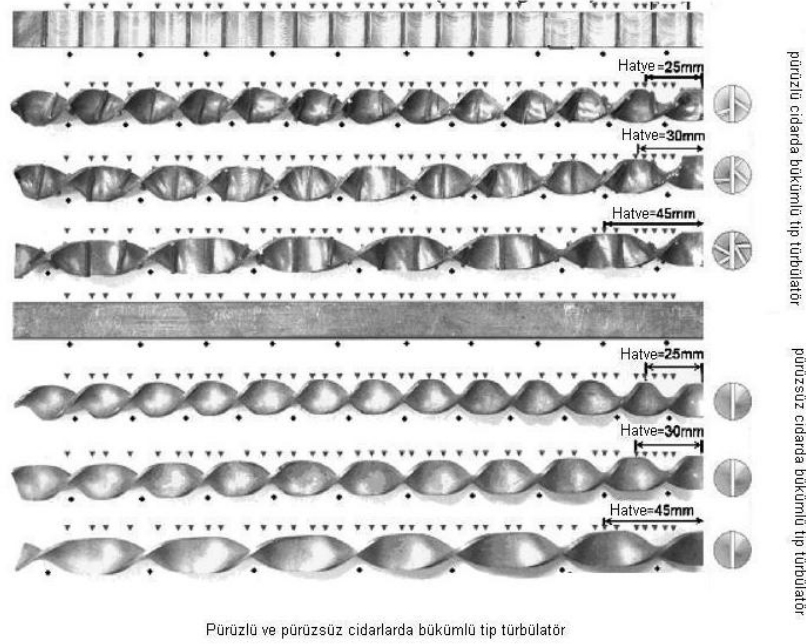


Şekil 3.35 Sağ-sol yönlü helisel dar sac tip türb. (Sivashanmugam ve Nagarajan, 2007)

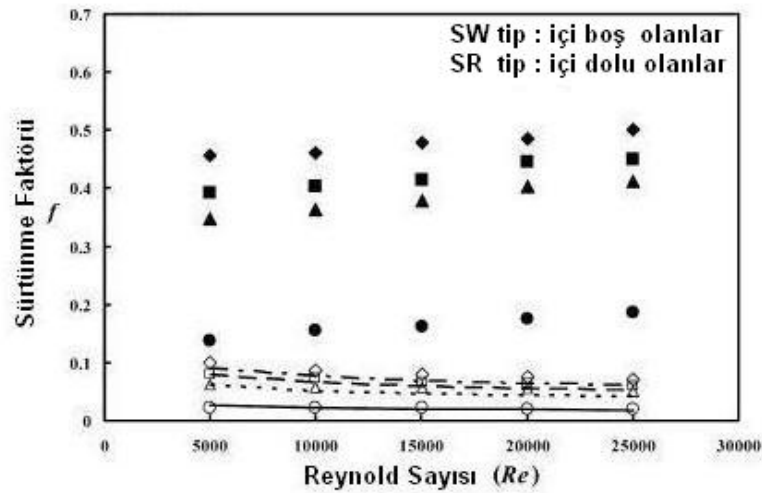


Şekil 3.36 f-Re grafiği (Sivashanmugam ve Nagarajan, 2007)

(Chang vd., 2006), pürüzlü ve pürüzsüz cidarlı bükümlü tip türbülator döşeli bir boruda türbülanslı akışta basınç kayıplarını deneysel olarak incelemiştir. Denejde iki çeşit türbülator kullanılmış: birincisi pürüzsüz cidarlı türbülator (sw), ikincisi pürüzlü cidarlı türbülator (sr). Sw tip boruda “ Re ” Reynolds sayısının artmasıyla “ f ” sürtünme katsayısının azaldığı diğer tip boruda ise bunun tam tersinin olduğu görülmüştür. Yani, “ Re ” arttıkça “ f ” artmaktadır.

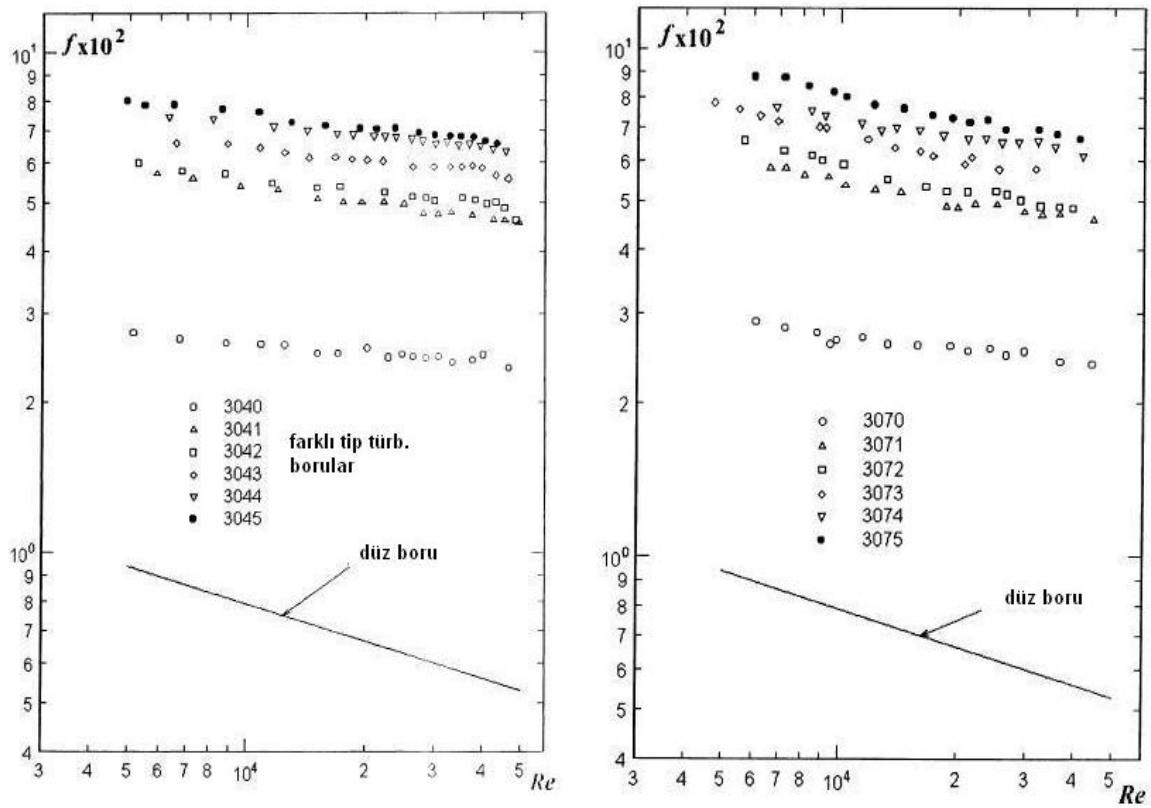


Şekil 3.37 Pürüzlü ve pürüzsüz cidarlı bükümlü tip türbülatorlar (Chang vd., 2006)



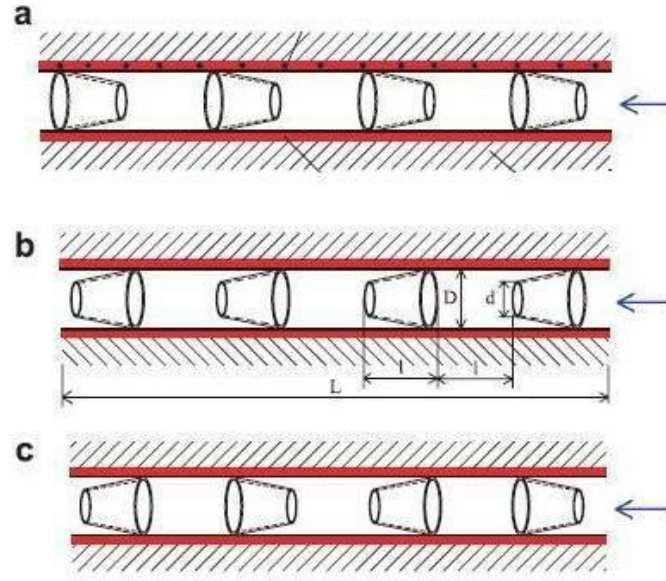
Şekil 3.38 f - Re grafiği (Chang vd., 2006)

(Zimparov, 2001), bükülmüş dar sac tip türbülantörlü spiral ondüleli bir boruda sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybını deneysel olarak incelemiştir. Türbülantlı akışta sürtünme katsayısı “ f ” aynı çalışma şartları altındaki düz boruda elde edilen sürtünme katsayısından önemli oranda daha yüksek çıkmıştır. Düz boruda Reynolds sayısının “ Re ” artmasıyla sürtünme faktörü “ f ” hızlıca azalmaktadır. Farklı geometrik özellikteki borularda Reynolds sayısının “ Re ” artması sürtünme faktörünü “ f ” devamlı olarak azaltmaktadır fakat düz borudaki kadar hızlı ve ani bir düşüş olmadığı görülmüştür. Bağlı hatve oranı “ H/D_i ” değerinin azalmasıyla ondüleli borudaki sürtünme faktörü “ f ” artmaktadır.”

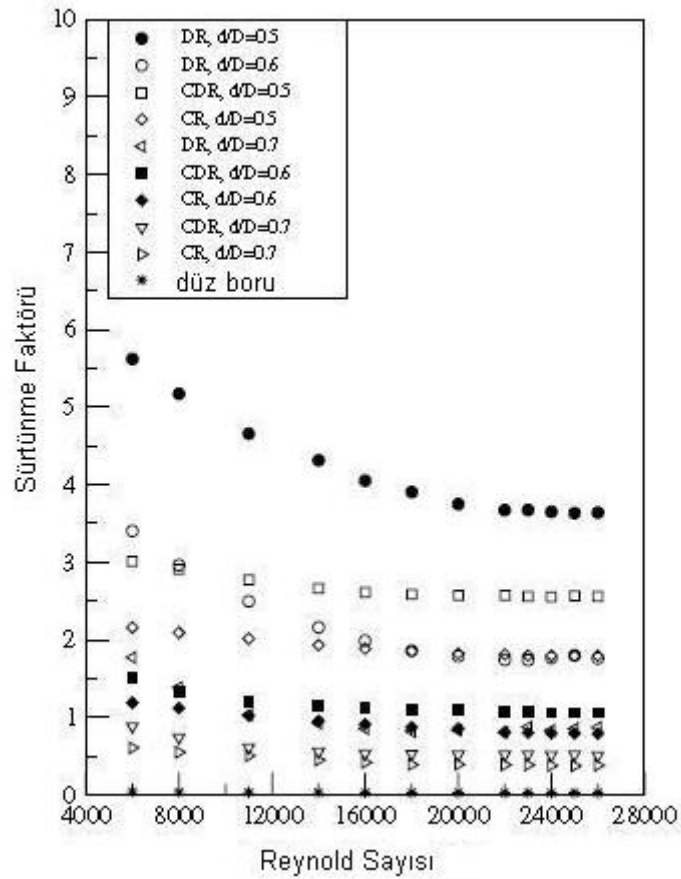


Şekil 3.39 f - Re grafiği (Zimparov, 2001)

(Promvonge, 2007), 3 farklı tip konik türbülantörlü dairesel bir boruda konik türbülantörlerin sürtünme faktörü üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlarında farklı (d/D) , (konik türb. çapı/boru çapı) oranlarındaki türbülantörlerin sürtünme faktörünü düz boruya göre önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir.

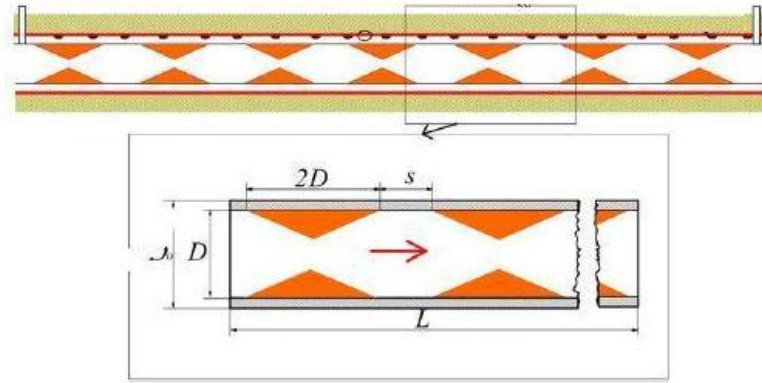


Şekil 3.40 (a)DR, (b)CR, (c)CDR tip konik türbülötörler (Promvonge, 2007)

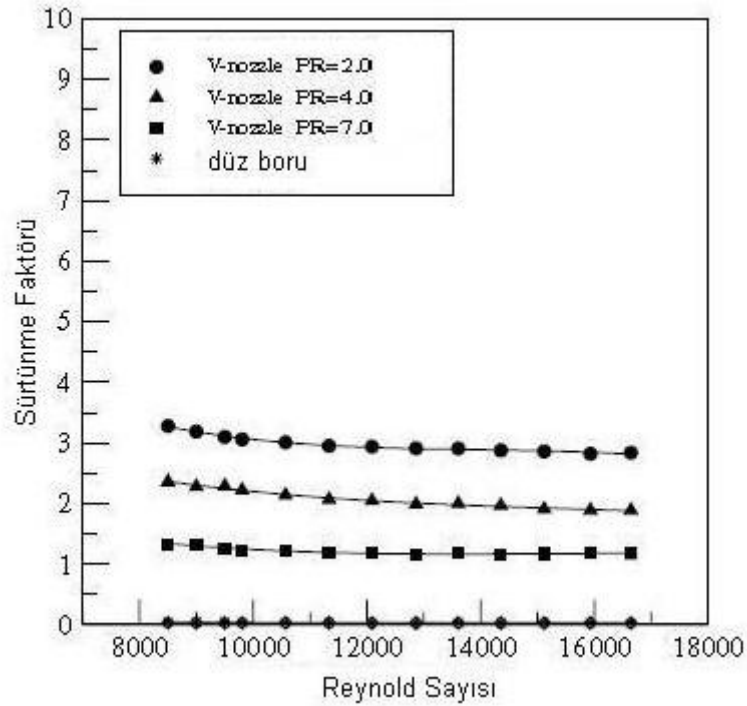


Şekil 3.41 f-Re grafiği (Promvonge, 2007)

(Promvonge ve Eiamsa, 2007), V-lüle türbülantörli dairesel kesitli bir boruda türbülantörün sürtünme kaybı üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştirlerdir. Üç farklı hatve oranında (PR) “ f ” sürtünme katsayısı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar düz boruyla karşılaştırılmış ve “ f ” sürtünme katsayısının bu tip borularda önemli ölçüde yüksek çıktığı görülmüştür. Ayrıca; PR oranı azaldıkça “ f ” sürtünme katsayısının yine arttığı görülmüştür.

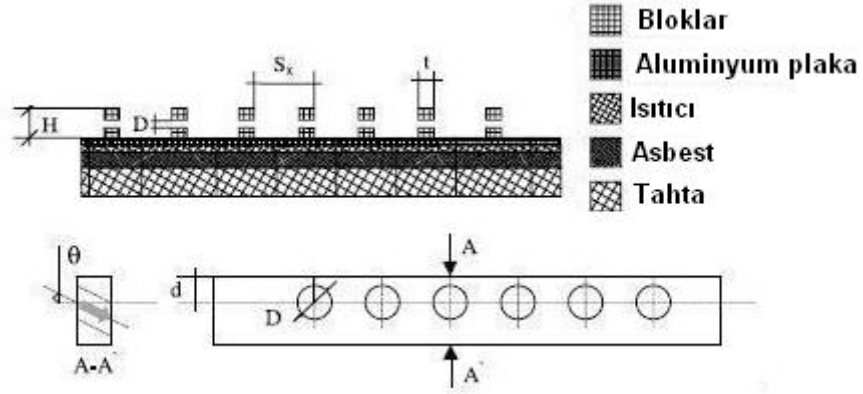


Şekil 3.42 V-nozzle türbülantörler (Promvonge ve Eiamsa, 2007)

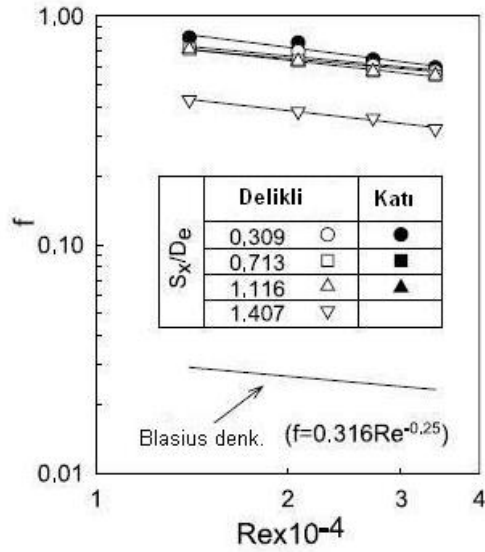


Şekil 3.43 f -Re grafiği (Promvonge ve Eiamsa, 2007)

(Sara vd., 2001), kanal yüzeyine bağlanmış dikdörtgen kesitli delikli-bloklı bir kanalda yüzey üzerindeki basınç düşümünü incelemiştirlerdir. Hem delikli hem de deliksiz bloklar düz yüzeye göre “ f ” sürtünme faktörünü önemli derecede arttırdığı ve “ Re ” Reynolds sayısının artmasıyla “ f ” sürtünme katsayısını azalttığı görülmüştür.

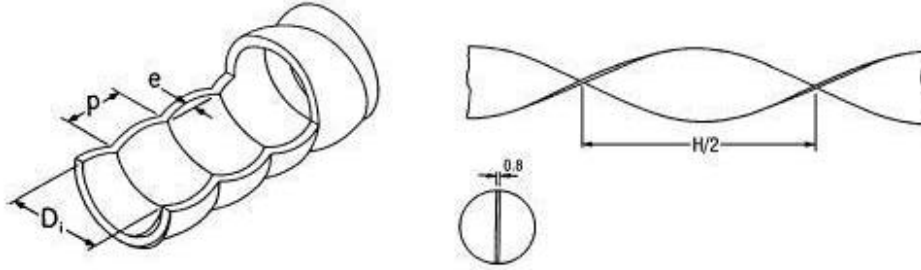


Şekil 3.44 Dikdörtgen kesitli delikli-katı bloklar (Sara vd., 2001)

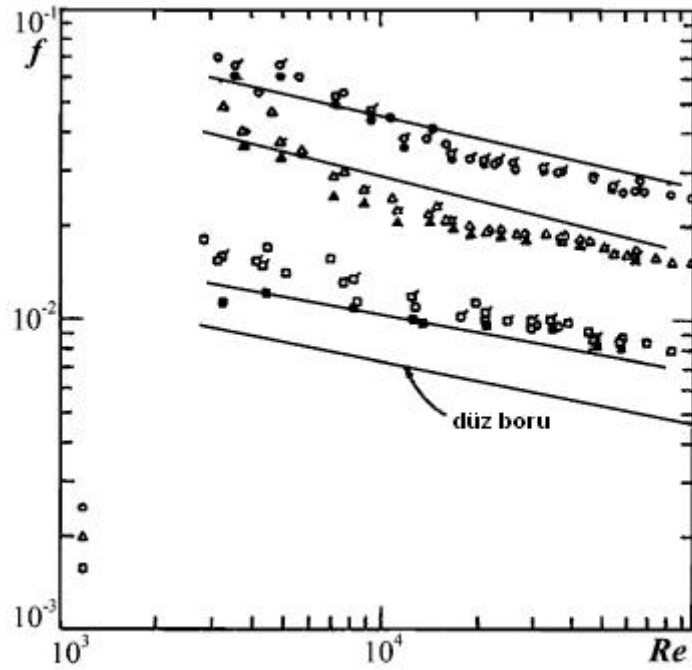


Şekil 3.45 f - Re grafiği (Sara vd., 2001)

(Zimparov, 2003), bükülmüş dar sac tip türbülantörlü spiral ondüleli bir boruda tam gelişmiş türbülantlı akışta sürtünme faktörünü incelemiştir. Farklı “ H/D_i ” (hatve/iç çap) oranlarında ve geometrilere deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneysel sonuçlar düz boruyla karşılaştırılmış olup “ f ” sürtünme faktörünün “ Re ” Reynolds sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür.

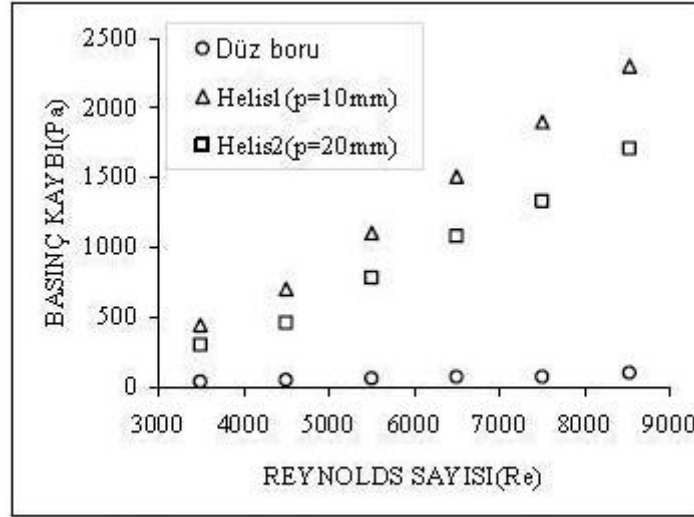


Şekil 3.46 Bükülmüş dar sac tipi türbülantör (Zimparov, 2003)



Şekil 3.47 Farklı geometriye sahip türbülantörler için f - Re grafiği (Zimparov, 2003)

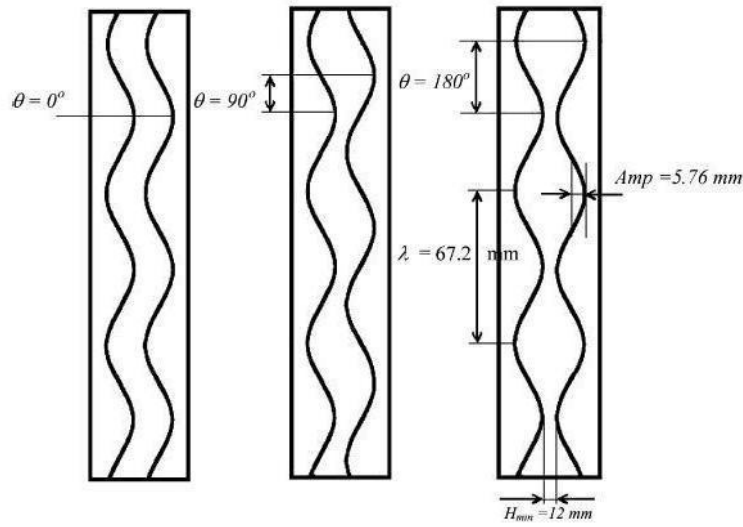
(Behçet ve İlkılıç, 2006), iç içe borulu ısı değiştiricisine yerleştirilen helisel yayların basınç düşümü üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Farklı adımlardaki helisel yaylar ısı değiştiricisine yerleştirilmiştir. Deney sonucunda “ Re ” sayısının artmasıyla basınç kayıplarının arttığı gözlemlenmiştir. Helisel yay elemanları yerleştirilmiş olan ısı değiştiricisinin basınç kayıpları ile karşılaştırıldığında aynı Reynolds sayısında 16 kata varan artışlar olduğu görülmüştür.



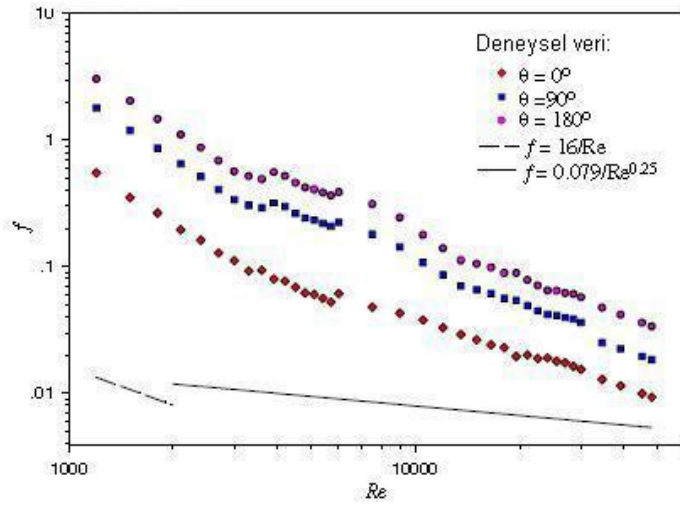
Şekil 3.48 Basınç kaybı- Re grafiği (Behçet ve İlkılıç, 2006)

3.3 İki Fazlı Akış

(Nilpueng vd., 2005), dikey sinüzoidal dalgalı kanallarda gaz-sıvı akıştaki boru boyunca oluşan basınç düşümünü incelemiştir. Tek fazlı akışta su hızının artmasıyla basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Yine tek fazlı akışta “ f ” sürtünme faktörünün, “ Re ” Reynolds sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Belirli Reynolds sayılarında ise sürtünme faktörünün helis açısının (θ) artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Sürtünme faktörü düz cidarlı kanala göre daha yüksek çıkmış olup helis açısının akış modeli ve basınç düşümü üzerine güçlü etkisinin olduğu anlaşılmıştır.

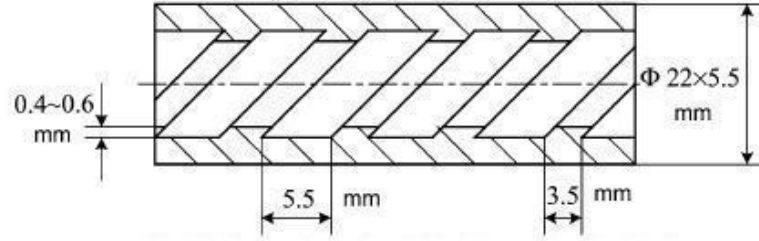


Şekil 3.49 Dikey sinüzoidal dalgalı kanal (Nilpueng vd., 2005)



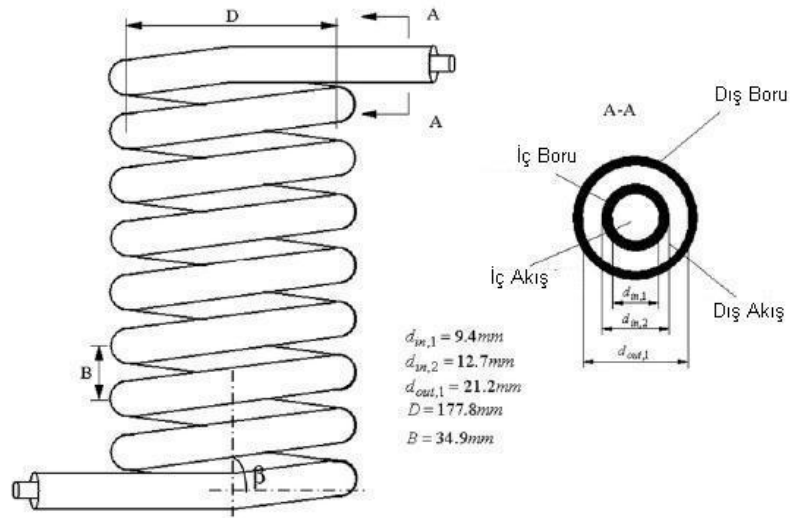
Şekil 3.50 f - Re grafiği (Nilpueng vd., 2005)

(Cheng vd., 2006), dikey bir boru içine spiral olarak yerleştirilmiş “ribbed boru” da iki fazlı akışta sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybını deneysel olarak incelemiştir. Deney sonuçların düz boruya göre 1,6-2,7 kat daha fazla basınç kaybına neden olduğu görülmüştür.



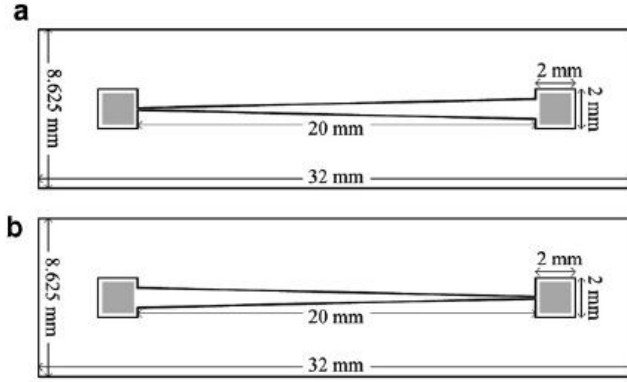
Şekil 3.51 Ribbed boru geometrisi (Cheng vd., 2006)

(Lin ve vd., 2007), dairesel helisel bir boruda yoğuşmadaki ısı transferini ve basınç kaybını deneysel olarak araştırmışlardır. Deney sonuçları düz boruyla karşılaştırılmıştır. Bu tip bir boruda basınç kaybının düz boruya göre 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

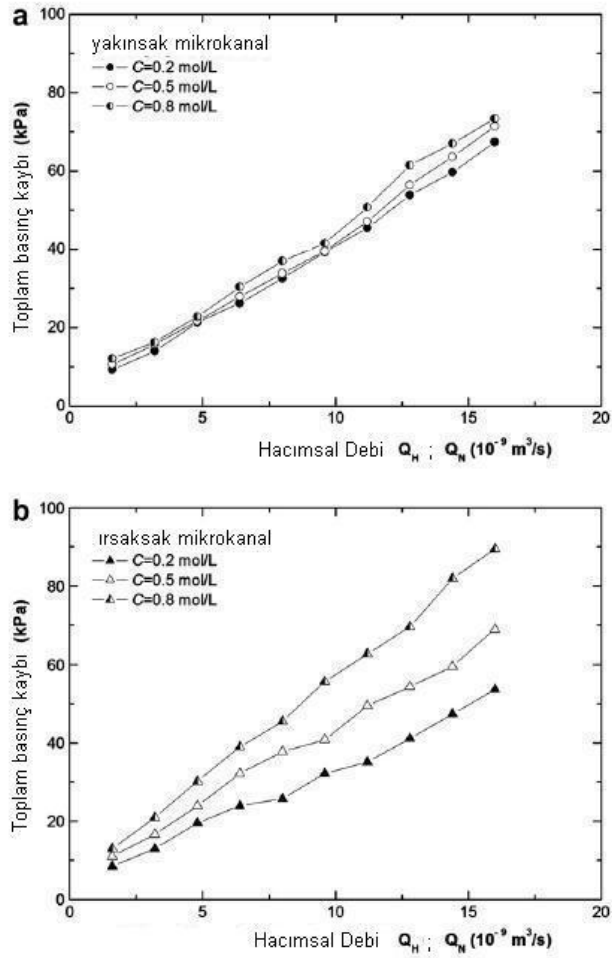


Şekil 3.52 Dairesel helisel boru (Lin vd., 2007)

(Fu vd., 2006), iki fazlı akış modelinde yakınsak ve ıraksak mikro kanallarda, basınç düşümü etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekilden görüldüğü üzere basınç kaybı artışı debinin artmasıyla artmakta ve yaklaşık olarak lineer olduğu görülmektedir.



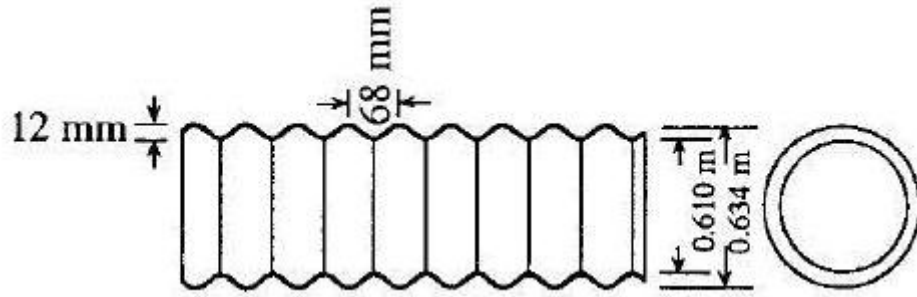
Şekil 3.53 (a) yakınsak, (b) ıraksak mikrokanal (Fu vd., 2006)



Şekil 3.54 Toplam Basınç Kaybı- Hacımsal Debi grafiği (Fu vd., 2006)

3.4 Açık Kanal Akımı

(Ead vd., 2000), dairesel kesitli ondüleli bir boru içinde türbülanslı akışta açık kanal akımını incelemiştir. 0.622 m ortalama çapında dairesel ondüleli bir boruda üç farklı boru eğiminde sırasıyla; 0.55, 1.14 ve 2.55% de deneysel çalışmalar yapmıştır. Gelişmiş akış oldukça düşük boru boyunda gerçekleşmiş olup yaklaşık 2D olarak belirlenmiştir. Manning katsayısı “n” 0.023 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.55 Dairesel ondüleli boru (Ead vd., 2000)

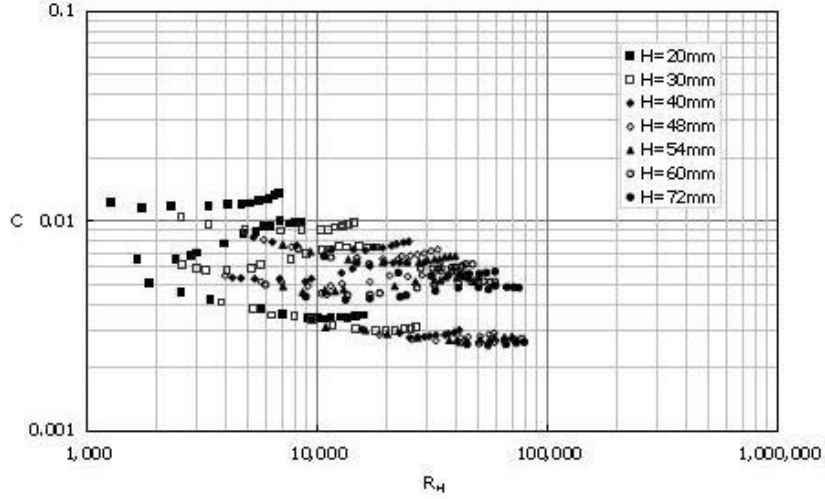
Çizelge 3.1 Deneysel veriler (Ead vd., 2000)

DENEY (1)	S (%) (2)	Q (L/s) (3)	y_c (m) (4)	y_0 (m) (5)	r (m) (6)	V (m/s) (7)	$2z_0$ (m) (8)	y_0/D (9)	y_0/y_c (10)	F_0 (11)	τ_{00} (N/m ²) (12)	u_{00} (m/s) (13)	R $\times 10^{-3}$ (14)
11	0.55	30	0.108	0.127	0.071	0.67	0.501	0.20	1.17	0.72	4.147	0.0644	191
12	0.55	60	0.153	0.181	0.096	0.82	0.565	0.29	1.18	0.72	4.610	0.0679	314
13	0.55	90	0.189	0.222	0.113	0.92	0.596	0.36	1.18	0.73	6.225	0.0789	418
14	0.55	120	0.219	0.254	0.125	1.03	0.611	0.41	1.16	0.75	8.742	0.0935	516
15	0.55	160	0.254	0.301	0.141	1.10	0.622	0.48	1.19	0.72	9.312	0.0965	619
21	1.14	30	0.108	0.120	0.067	0.73	0.491	0.19	1.11	0.81	5.685	0.0754	197
22	1.14	60	0.153	0.166	0.089	0.92	0.550	0.27	1.09	0.85	6.790	0.0824	329
23	1.14	90	0.189	0.210	0.108	1.00	0.588	0.34	1.11	0.81	7.448	0.0863	432
24	1.14	120	0.219	0.250	0.124	1.05	0.610	0.40	1.14	0.77	9.044	0.0951	520
25	1.14	160	0.254	0.286	0.136	1.17	0.620	0.46	1.13	0.80	11.172	0.1057	639
26	1.14	200	0.286	0.342	0.153	1.17	0.619	0.55	1.20	0.71	13.248	0.1151	713
31	2.55	30	0.108	0.094	0.054	1.03	0.446	0.15	0.87	1.29	9.683	0.0984	223
32	2.55	60	0.153	0.145	0.079	1.12	0.526	0.23	0.95	1.12	10.486	0.1024	355
33	2.55	90	0.189	0.176	0.094	1.28	0.560	0.28	0.93	1.15	12.973	0.1139	478
34	2.55	120	0.219	0.205	0.106	1.38	0.585	0.33	0.93	1.14	15.351	0.1239	585
35	2.55	160	0.254	0.232	0.117	1.55	0.601	0.37	0.91	1.20	20.707	0.1439	726
36	2.55	200	0.286	0.254	0.125	1.71	0.612	0.41	0.89	1.25	22.470	0.1499	859

(Yoo ve Lee, 2000), açık kanal akımında türbülanslı akış şartları altında pürüzlü ve düz yüzeylerde sürtünme faktörünü araştırmışlardır. Bu çalışmada, açık kanal akımındaki sürtünme katsayısı “c” Warwick (1945), Kırkgöz (1989), Jarret (1984), Colosimo-Copertino ve Veltri (1988) laboratuvar verileri kullanılarak belirlenmiştir.

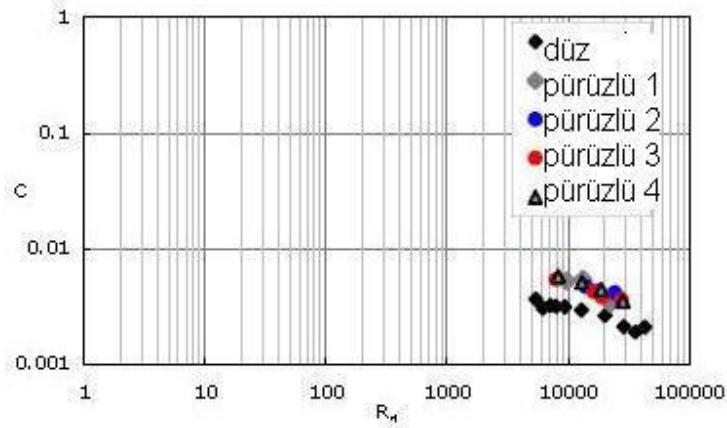
a-) (Warwick, 1945) “Zur Fließ formel für offene Kunstliche Gerine” adlı çalışmasında yapmış olduğu deneylerini, sabit hidrolik çapta akış debisini ve aynı zamanda eğimi değiştirerek yapmıştır. 20-72 mm arasında 7 farklı hidrolik yarıçapta deneyler yapmıştır. Şekil

3.56’da sürtünme katsayısı 0,0024-0,013 arasında değişmekte; Reynolds sayısı ise $1000 < Re_h < 90000$ arasındadır. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak azaldığı görülmüştür.



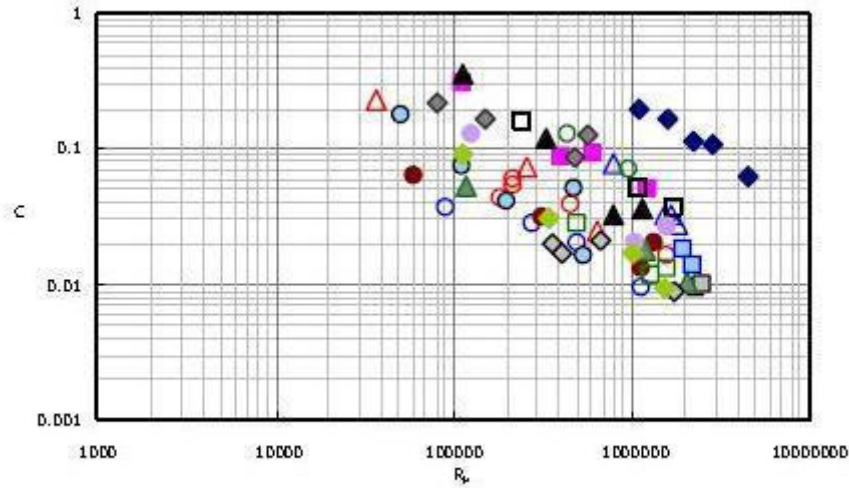
Şekil 3.56 Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Varwick, 1945)

b-) (Kırkgöz, 1989) “Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow” adlı çalışmasında yapmış olduğu deneylerini, 3*12*3 m lik bir kanalda yapmıştır. Şekil 3.57’de sürtünme katsayısı 0,002 ile 0,009 arasında olup Re sayısı $5000 < Re_h < 50000$ arasında değişmektedir. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile azalmakta olduğu fakat pürüzlülüğün etkisiyle arttığı görülmüştür.



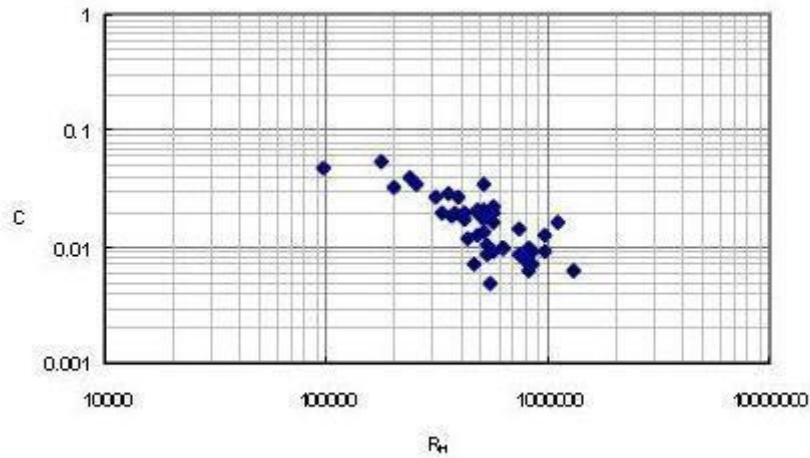
Şekil 3.57 Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Kırkgöz, 1989)

c-) (Jarret, 1984) “Hydraulics of High-Gradient Streams” adlı çalışmasında yapmış olduğu deneylerinde sürtünme faktörü 0,008 ile 0,04 arasında değişmekte, Reynolds sayısı ise $30000 < Re_h < 5000000$ arasında değişmektedir. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısıyla azaldığı buna karşılık pürüzlülük etkisiyle arttığı görülmüştür (Şekil 3.58).



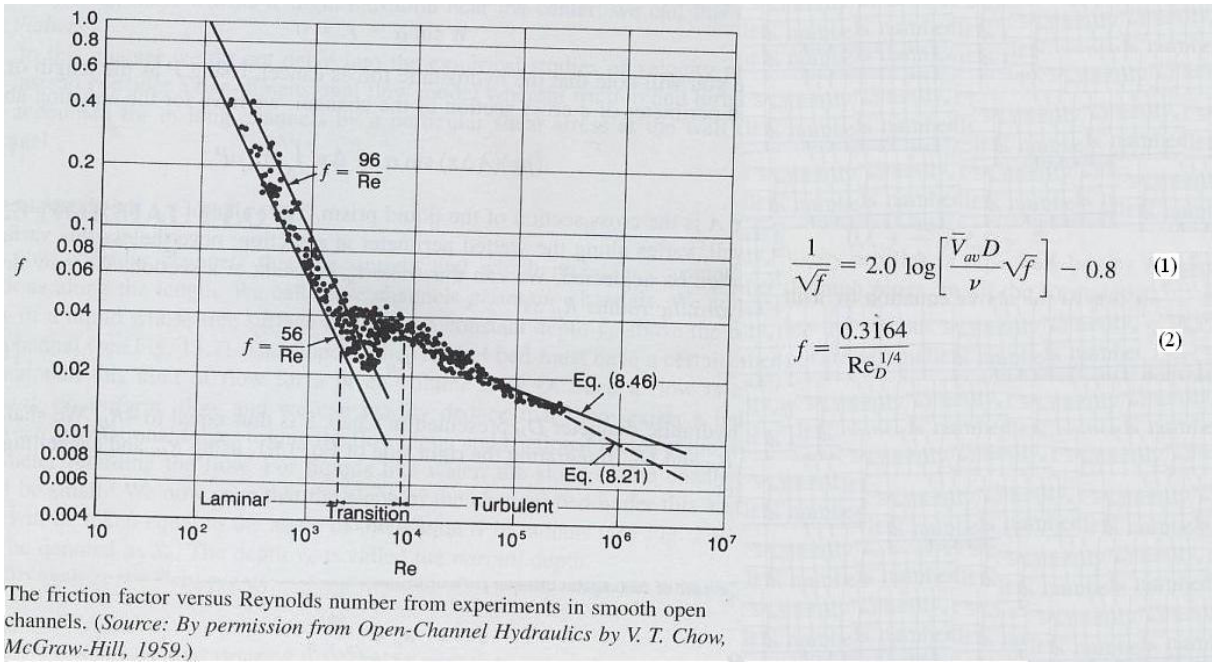
Şekil 3.58 Sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Jarret, 1984)

d-) (Colosimo-Copertino ve Veltri, 1988) “Friction Factor Evaluation in Gravel-Bed Rivers” adlı çalışmadaki deneylerinde sürtünme faktörü 0,004 ile 0,06 arasında değişmekte, Reynolds sayısı ise $90000 < Re_h < 1100000$ arasında değişmektedir. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısıyla azaldığı fakat pürüzlülüğün etkisiyle arttığı görülmüştür (Şekil 3.59).



Şekil 3.59 Sürtünme katsayısının Re ile değişimi (Colosimo, Copertino ve Veltri, 1988)

(Shames, 2003), Şekil 3.62’de pürüzsüz bir açık kanal akımından elde edilen deneysel sonuçlarla teorik sonuçları aynı grafikte göstermiştir (uzunluk parametresi olarak hidrolik yarıçap kullanılmıştır). Laminer akış bölgesinde, geniş kanallar için “ $f = 96/Re$ ” ve 90° üçgen kesitli kanallar için “ $f = 56/Re$ ” teorik sonuçları elde edilmiştir. Bu iki eğri arasında “ $f = 64/Re$ ” borulardaki akış için elde edilmiştir. Türbülanslı akış bölgesinde, $Re < 100.000$ için (1) ve (2) numaralı denklem boru akımı için kullanılmıştır. Noktalar deneysel sonuçları göstermektedir. Bu grafik boru akımı ile açık kanal akımı arasındaki benzerlikleri göstermektedir.



Şekil 3.60 f-Re grafiği (Shames, 2003)

Yukarıda bahsedilen literatür araştırmaları neticesinde, Darcy sürtünme katsayısının Reynolds sayısındaki artışla birlikte bir azalma gösterdiği anlaşılmaktadır. Düz cidarlı kesitlerle farklı geometrik cidar yapısına sahip kesitler karşılaştırıldığında, Reynolds sayısı artarken Darcy sürtünme katsayısı azalmakta, düz cidarlarda sürtünme katsayısı değeri oldukça düşük çıkmasına rağmen diğerlerinde çok yüksek sürtünme katsayısı değerine ulaşılmıştır. Buna ilave olarak, düz cidarlarda Reynolds sayısındaki artışla birlikte sürtünme katsayısı eğrilerinde ani ve hızlı bir düşme söz konusu iken, diğer kesitlerde ise daha yavaş bir düşme ve belli bir Reynolds değerinden sonra sabit kalma eğilimi görülmüştür. Bu da; farklı debi ve çaplarda çeşitli genlik, dalga boyu, pürüzlülük ve helis açısına sahip geometrik parametrelerin akış yapısını önemli ölçüde değiştirdiği ve sürtünme mekanizmalarını etkilediğini göstermektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deney sistemi, deneysel çalışmanın aşamaları ve kullanılan ölçü aletleri hakkında bilgi verildikten sonra, ilgili hesaplamalar açıklanarak, elde edilen deneysel ölçüm sonuçları sunulmuştur.

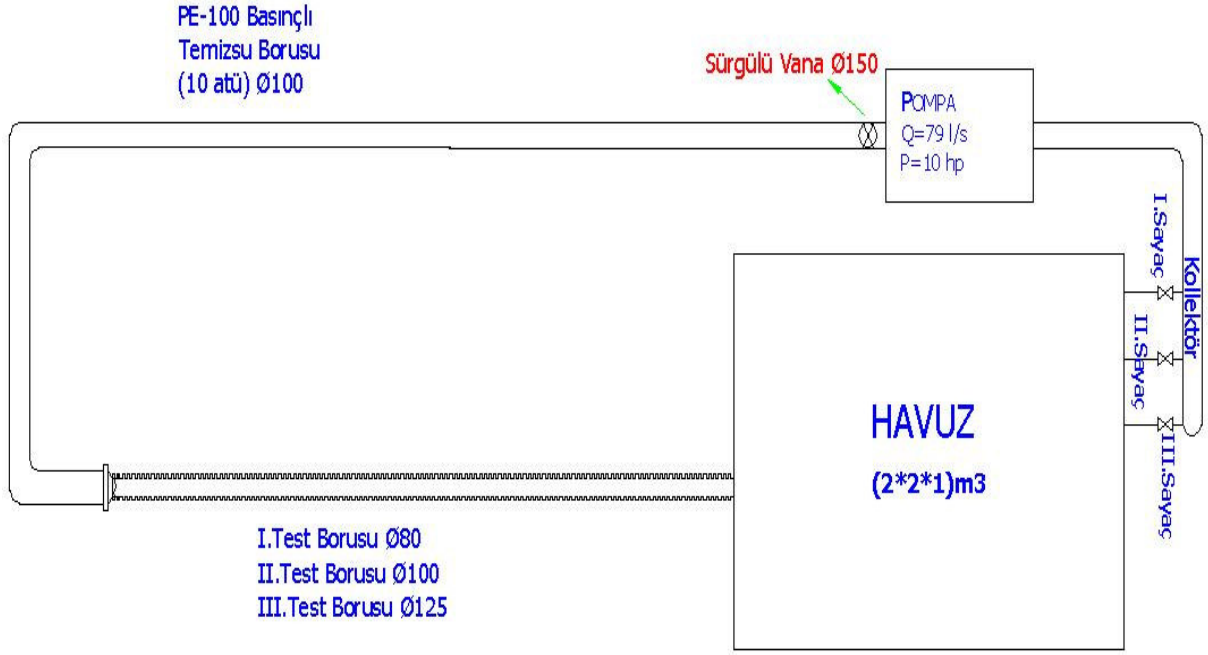
4.1 Deney Tesisatı

Deney tesisatı Y.T.Ü. Makine Fakültesi Yıldız kampüsü laboratuvarında kurulmuştur. Deney tesisatında “10 hp” gücünde, “ $\dot{Q} = 79 (l/s)$ ” sabit debili pompa, “Ø-150” sürgülü vana, su sayaçları, kollektör, “10 atü” lük PE-100 basınçlı temiz su borusu, Fıratboru İnşaat Malzemeleri Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.’den temin edilen “Ø-125, Ø-100, Ø-80” lik ondüleli borular ve “ $2x2x1 (m^3)$ ” lük su tankı kullanılmıştır. Deney tesisatının üst ve yan şematik görünüşleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

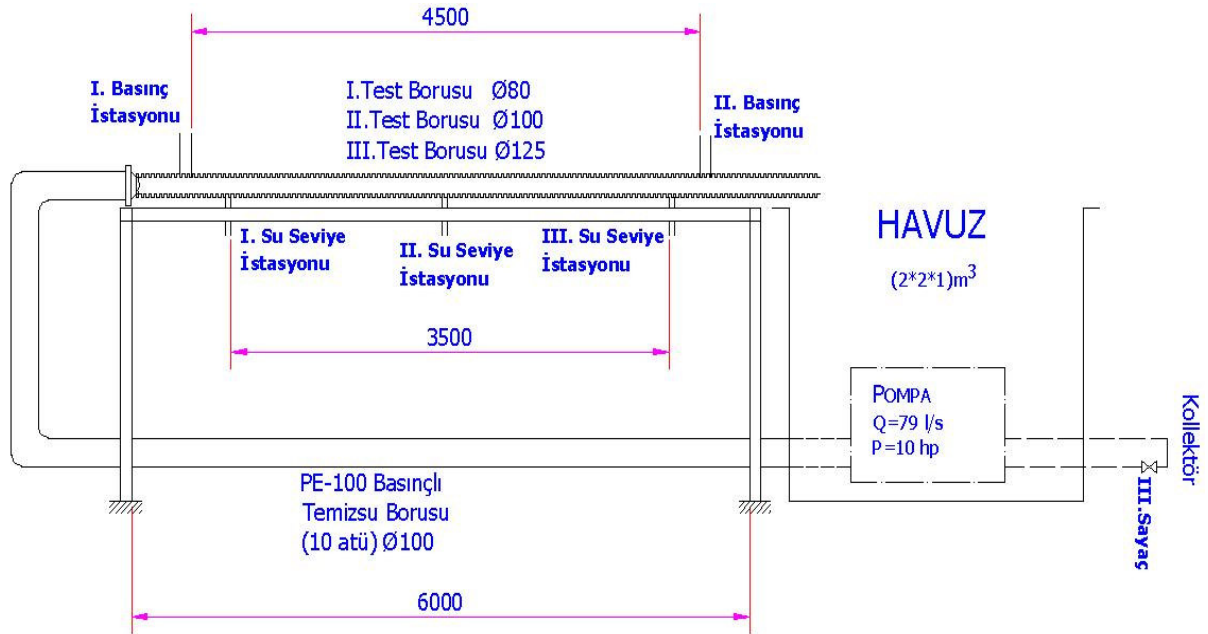
Tesisat kapalı bir çevrimde çalışmaktadır. Tankta bulunan su önce su sayaçlarından sonra kollektörden geçerek pompa emiş ağzına çekilir (Şekil 4.3). Su, pompa basma ağzındaki sürgülü vana vasıtasıyla sistemdeki debi ayarlanarak PE-100 basınçlı temizsu borusuna basılır. Test borusundan (ondüleli boru) geçirilen su tekrar tanka dökülür.

Boru akımında, giriş basınç ölçüm istasyonu test borusundan en az 100 cm uzaklığa, çıkış basınç istasyonu ise akışkanın tanka döküldüğü yerden en az 100 cm geriye monte edilmiştir. Böylece giriş etkileri önemsiz hale getirilir. Boru giriş ve çıkış kesitlerine yerleştirilen piezometrik hortumların uçları atmosfere açıktır. Piezometrik hortumlar sabit levha üzerine belirli bir referans yüksekliğinde yerleştirilmiş olup basınçlar su sütunu cinsinden okunur (Şekil 4.10).

Açık kanal akımında, akışın rejime daha kısa sürede girmesi ve boru boyunca aynı su seviye yüksekliklerinin elde edilmesi için test borusunun giriş kısmı biraz yükseltilir (Şekil 4.11). Test borusuna aralarında yeterince uygun bir aksel mesafe olacak şekilde üç ayrı su seviye istasyonu monte edilir. Piezometrik hortumlar test borusu tabanından bağlanarak ölçekli bir levhada belirli bir referans yüksekliğinde uçları atmosfere açık bir şekilde yerleştirilir. Boru içinden geçen su miktarı kadar su piezometrik hortumlarda yükselir (Şekil 4.12).



Şekil 4.1 Deney tesisatı üst görünüş şematik resmi



Şekil 4.2 Deney tesisatı yan görünüş şematik resmi



Şekil 4.3 Su sayaçları, kollektör ve debi ayar vanası resmi

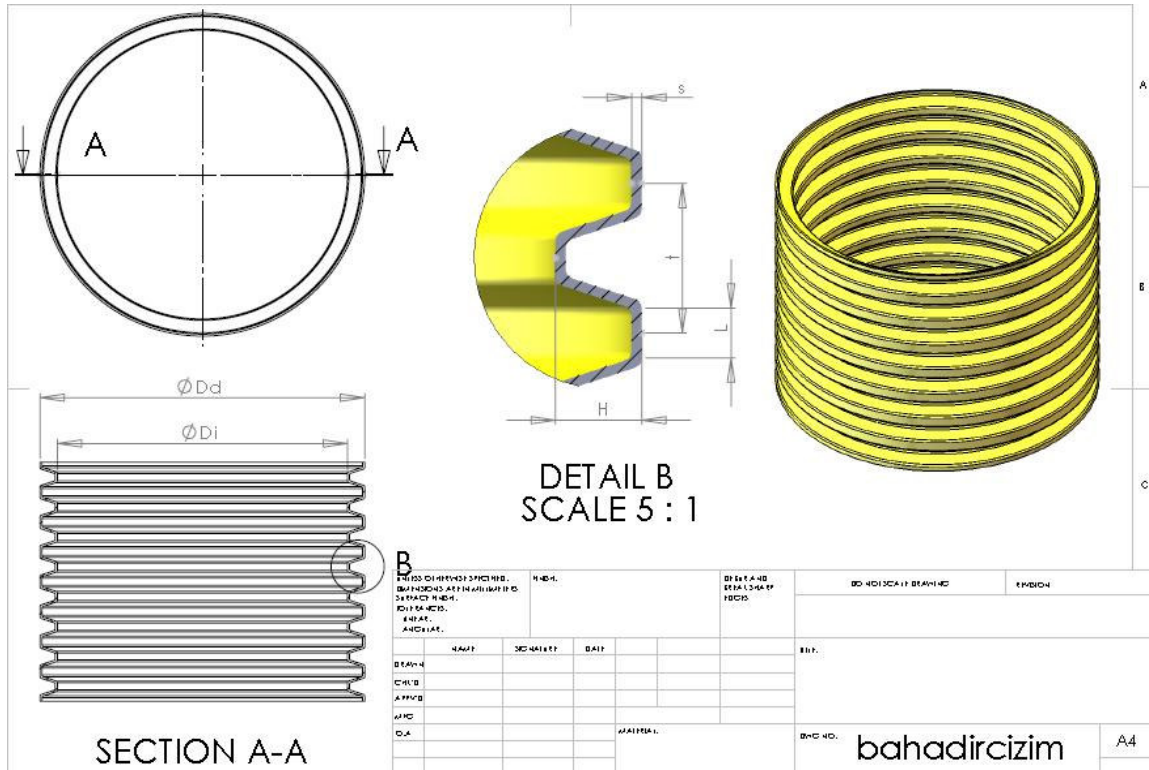
Deney tesisatında kullanılan ondüleli borular:



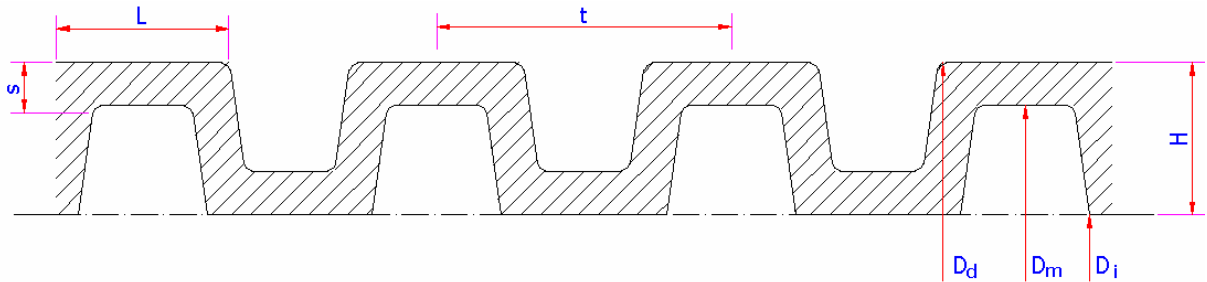
Şekil 4.4 Ondüleli boru iç ve dış yapısı



Şekil 4.5 Ondüleli borunun deney tesisatında görünümü



Şekil 4.6 Ondüleli boru teknik resmi

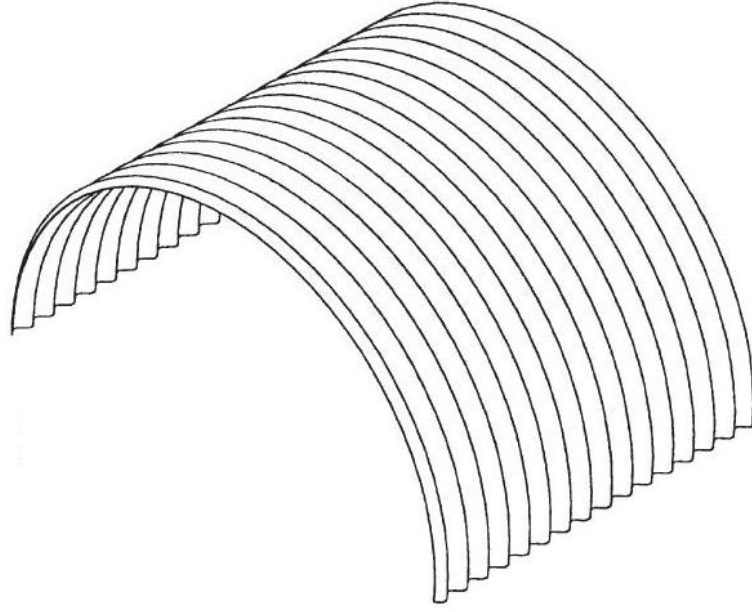


Şekil 4.7 Ondüleli boru kesit resmi

Çizelge 4.1 Ondüle boru ölçüleri, Fıratboru Ltd. Şti.

Anma Çapı	D_d	D_i	H	t	L	s	D_m ($D_d + D_i$)/2	R_m ($D_m/2$)	$2H/D_m$	t/D_m
80	80	71,5	4,2	7,401	3,5	0,5	75,75	37,875	0,1109	0,0977
100	100	91,5	4,2	7,686	4,09	0,5	95,75	47,875	0,0877	0,0803
125	125	115,5	5	7,9707	4,22	0,5	120,25	60,125	0,0832	0,0663

Standart : TS 9128 Malzeme: PVC



Şekil 4.8 Ondüleli boru kesit görünümü

4.2 Deneysel Süreç

Yapılan deneysel çalışmalar iki ana gruptan oluşmaktadır.

- Boru akımında (cazibesiz akış) yapılan deneyler
- Açık kanal akımında (cazibeli akış) yapılan deneyler

Boru akım deneylerinde, önce “Ø-125” lik ondüleli boru tesisata monte edilir (Şekil 4.9). Pompa devreye alınarak, pompa çıkışındaki debi ayar vanası en kısık konumdan itibaren deneysel veriler alınmaya başlanır. Sırasıyla akışkan debisi pompa girişindeki su sayaçlarından, test borusundaki basınç kaybı ise piezometrik hortumlardan okunur (Şekil 4.10). Deney bitiminde debi ayar vanası bir kademe daha açılarak yani debi arttırılarak deneylere yeniden başlanır. Vana maksimum açıklığa ulaşana kadar deneysel çalışmalara devam edilir ve tam açık konumda iken son veri alınır. Daha doğru sonuçlar elde etmek için; deneyler aynı şartlar altında tekrarlanarak deneysel ölçümlere devam edilir. Aynı işlemler sırasıyla diğer çaptaki borular “Ø-100” ve “Ø-80” için de yapılarak boru akım deneyleri tamamlanır.



Şekil 4.9 Boru akımı deney tesisatı resmi



Şekil 4.10 Basınç farkı ölçüm istasyonu

Açık kanal akımı deneylerinde ondüleli boru akış yönünde eğimlidir dolayısıyla önce “Ø-125” lik ondüleli boru maksimum eğim açısında tesisata monte edilir (Şekil 4.11). Pompa devreye alınarak, pompa çıkışındaki debi ayar vanası en kısık konumdan itibaren deneysel veriler alınmaya başlanır. Sırasıyla akışkan debisi pompa girişindeki su sayaçlarından, boru boyunca oluşan su seviye yükseklikleri ise üç ayrı istasyondaki piezometrik hortumlardan okunur (Şekil 4.12). Deney bitiminde debi ayar vanası bir kademe daha açılarak yani debi artırılarak deneylere yeniden başlanır. Böylece boru içerisinde farklı doluluk miktarları elde edilir ve daha yüksek su seviye yüksekliklerine ulaşılır. Eğim açısı düşürülerek deneysel çalışmalara yeniden başlanır. Daha doğru sonuçlar elde etmek için; deneyler aynı şartlar altında tekrarlanarak deneysel ölçümlere devam edilir. Aynı işlemler sırasıyla diğer çaptaki borular “Ø-100” ve “Ø-80” için de yapılarak açık kanal akım deneyleri tamamlanır.



Şekil 4.11 Açık kanal akımı deney tesisatı resmi



Şekil 4.12 Su seviye yüksekliği ölçüm istasyonu

4.3 Deneysel Verilerin Analizi

Bu bölümde, elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarıyla ilgili hesaplamalar açıklanmıştır. Hesaplamalar hem boru akımı hem de açık kanal akımı için ayrı ayrı ele alınmıştır.

4.3.1 Boru Akımı için Darcy “ f ” Sürtünme Katsayısının Bulunması

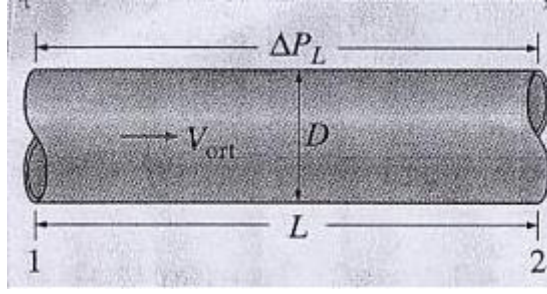
Bu çalışmada deneysel verilerin sayısal olarak çözümlenmesinde akışkanlar mekaniğinin iki temel denklemi kullanılmıştır. Bunlardan ilki Enerjinin Korunumu olarak bilinen “Enerji Denklemi” ikincisi ise Kütlenin Korunumu olarak bilinen “Süreklilik Denklemi”dir. Boru uzunluğu (L) ve boru çapı (d) hesaplamalardaki sabit değerler olup suyun fiziksel özellikleri 20°C su sıcaklığından alınmıştır. Deneyde test borusundaki giriş çıkış basınçları pizometrik hortumlardan debi ise su sayaçlarından okunmuştur. Farklı debilerde sistem giriş ve çıkışında oluşan basınç kayıpları, Reynolds sayısı ve sürtünme katsayısı araştırılmıştır.

Süreklilik Denklemi:

$$\dot{Q} = A \times V \quad (4.1)$$

Burada; \dot{Q} = hacımsal debi (m^3/s), A = boru kesit alanı (m^2) ve V = akışkan hızı (m/s), ifade

etmektedir.



Şekil 4.13 Basınç kaybı “ $\Delta P_L = P_1 - P_2$ ” ifadesi (Çengel ve Cimbala, 2007)

Enerji Denklemini 1 ve 2 noktası için uygularsak;

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_K \quad (4.2)$$

Burada;

$P_1, P_2 =$ basınçları (pa)

$V_1, V_2 =$ hızları (m/s)

$z_1, z_2 =$ kot farkları (m)

$\gamma_1, \gamma_2 =$ özgül hacimler ($\text{kg/m}^2 \text{s}^2$)

$g =$ yerçekim ivmesi (m/s^2)

$h_K =$ yük kayıp katsayısı (mSS)

ifade etmektedir. Boru çapı değişmediğinden ve sistemde potansiyel fark olmadığından bu terimler sıfıra eşittir. “ h_K ” tanımlanırsa:

$$h_K = f \frac{L}{D_m} \times \frac{V^2}{2g} \quad (4.3)$$

Bu ifade Darcy-Weisbach denklemi olarak bilinmektedir. Bu denklem, sıkıştırılamaz sürtümlü akışlarda boru akımı ve açık kanal akımı uygulamalarında her zaman için kullanılan güçlü bir denklemdir.

Denklem (4.2) düzenlenirse:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} = \frac{P_2}{\gamma_2} + h_K \quad \text{ve} \quad \gamma_1 = \gamma_2, \quad P = \rho \times g \times h \quad \text{olduğundan;} \quad (4.4)$$

$$h_1 - h_2 = h_K \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (4.5)$$

Burada “ h ” pizometrik borulardaki su sütunu cinsinden basınç ifadesidir.

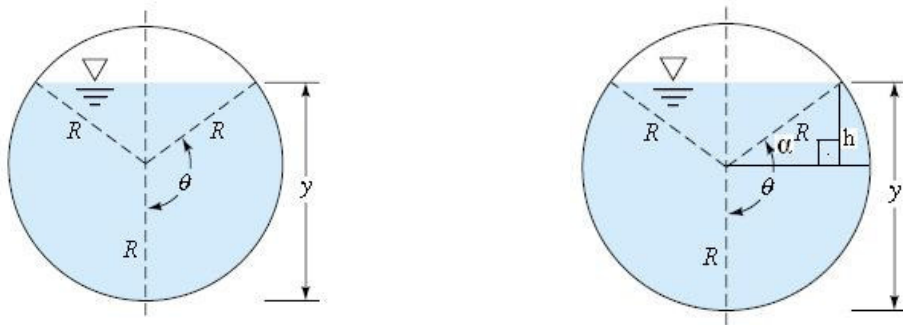
Denklem (4.2) ve (4.3) den Darcy sürtünme katsayısı “ f ” çekilerek düzenlenir.

$$f = \frac{h_K \times D_m \times 2 \times g}{L \times V^2} \quad (4.6)$$

4.3.2 Açık Kanal Akımı için Darcy “ f ” Sürtünme Katsayısının Bulunması

Bu bölüm, daimi ve bir boyutlu akış koşulları ile sınırlanan açık kanal akış analizini inceler. Temel analiz, süreklilik denklemi ile sürtünme kayıplarını içeren “Enerji Denklemi”nin bir araya getirilmesidir. Bu çalışmada dairesel kesitli ondüleli bir boruda açık kanal akımı incelenmiş olup farklı doluluk oranlarında çalışmalar yapılmıştır. Boru akımından farklı olarak dairesel kesit alan ifadesi yerine ıslak kesit alan ve ıslak çevre kullanılmıştır. Kanal eğimi ise ayrı bir parametre olarak sürtünme katsayısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Boru uzunluğu (L) ve boru çapı (d) hesaplamalardaki sabit değerler olup suyun fiziksel özellikleri 20⁰C su sıcaklığından alınmıştır. Deneyde test borusundaki su seviye yükseklikleri 3 ayrı istasyondan debi ise su sayaçlarından okunmuştur. Farklı debi ve kanal eğimlerinde Reynolds sayısının sürtünme katsayısı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Hesaplamalar 3 ayrı istasyondan elde edilen “ y ” su seviye yüksekliklerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. Dolayısıyla ıslak kesit alanları ayrı ayrı belirlenmiş olup akıştaki ortalama hız bu alanların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.14 İslak kesit alan ve ıslak çevre (Çengel ve Cimbala, 2007)

Sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılarak,

$$y = h + R_m \quad (4.7)$$

$$\sin \alpha = h / R_m \quad (4.8)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{y}{R_m} - 1\right) \quad (4.9)$$

$$\theta = \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (4.10)$$

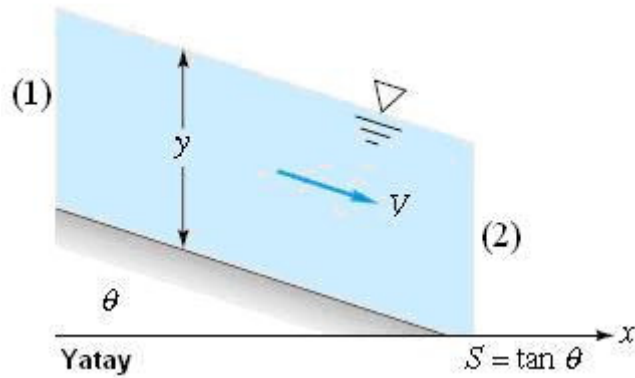
$$\text{Alan} = A_c = R_m^2 (\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (4.11)$$

$$\text{Çevre} = p = 2R_m \theta \quad (4.12)$$

$$\text{Hidrolik yarıçap} = R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{2\theta} R_m \quad (4.13)$$

$$\text{Hidrolik çap} = D_h = \frac{4A_c}{p} = 4R_h \quad (4.14)$$

ıslak kesit alan “ A_c ” ve hidrolik çap “ D_h ” bulunur.



Şekil 4.15 Eğimli kanal (Çengel ve Cimbala, 2007)

Süreklilik denkleminde,

$$V_{ort} = \frac{\dot{Q}}{A_{c,ort}} \quad (4.15)$$

Burada “ $A_{c,ort}$ ” ıslak kesit alanların ortalamasıdır ve ayrı ayrı su seviye yüksekliklerinden bulunur.

$$Re_{ort} = \frac{4 \times V_{ort} \times R_{h,ort}}{\nu} \quad (4.16)$$

Enerji Denklemini (1) ve (2) noktası için uygularsak;

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_K \quad (4.17)$$

şeklindedir. Sistem atmosfere açık olduğundan basınç terimleri sıfır olur.

$$z_1 - z_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_K \quad (4.18)$$

“ h_K ” tanımlanırsa:

$$h_K = f \frac{L}{R_{h,ort}} \times \frac{V_{ort}^2}{8g} \quad (4.19)$$

Denklem (4.18) ve (4.19) dan Darcy sürtünme katsayısı “ f ” çekilerek düzenlenir.

$$f = \left[(z_1 - z_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) \right] \times \frac{R_{h,ort} \times 8g}{V_{ort}^2 \times L} \quad (4.20)$$

Açık kanal akımında “ Fr ” Froude sayısına da bakılmaktadır. Böylece akım tipinin ne olduğuna karar verilir.

$$Fr = \frac{V_{ort}}{\sqrt{g y_{ort}}} \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada “ y_{ort} ” , “ $y_{ort} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$ ” şeklinde tarif edilip; üç ayrı su

seviye istasyonundan elde edilen sıvı derinliği ortalamasıdır. “ V_{ort} ” denklem 4.15’den bulunur ve “ g ” yerçekimi ivmesidir.

4.4 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

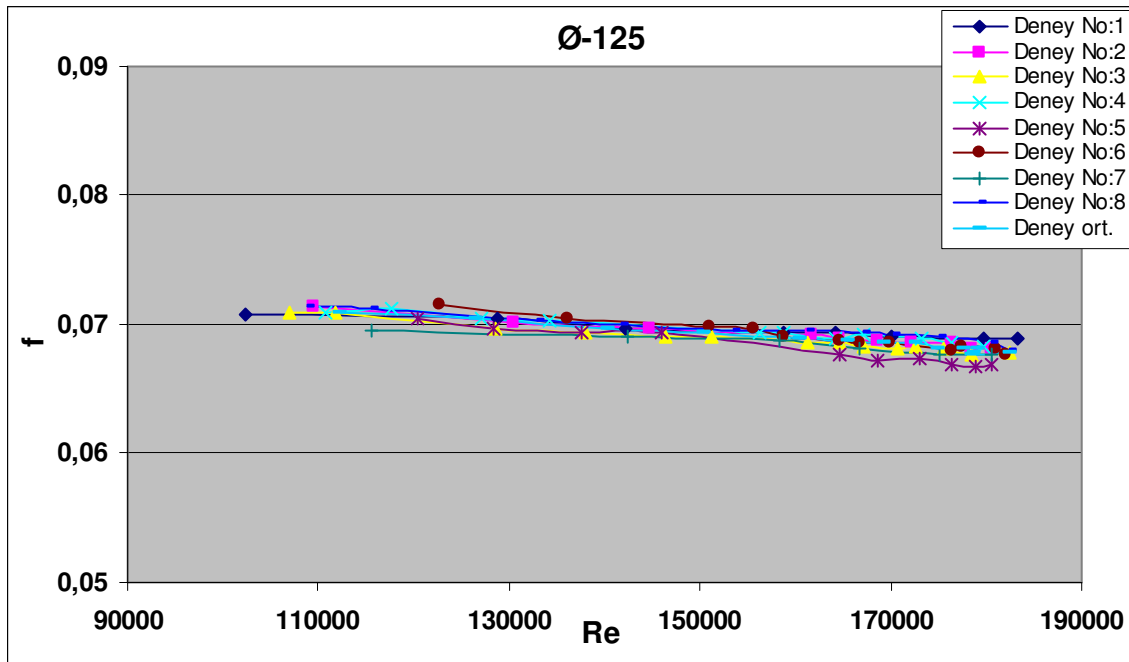
Üç farklı çaptaki ondüleli borularda yapılan deneyler iki ana gruptan oluşmaktadır.

- Boru akımında yapılan deneyler
- Açık kanal akımında yapılan deneyler

Akış kesitinin tamamen dolu olduğu ilk gruptaki deneylerde, debi ve basınç farkı ölçümleri yapılmıştır. Akış kesitinin tamamen dolu olmadığı ikinci gruptaki deneylerde, debi, su seviye yükseklikleri ve kanal eğimi ölçülmüştür. Bu bölümde deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar irdelenerek sonuçlar verilmiştir.

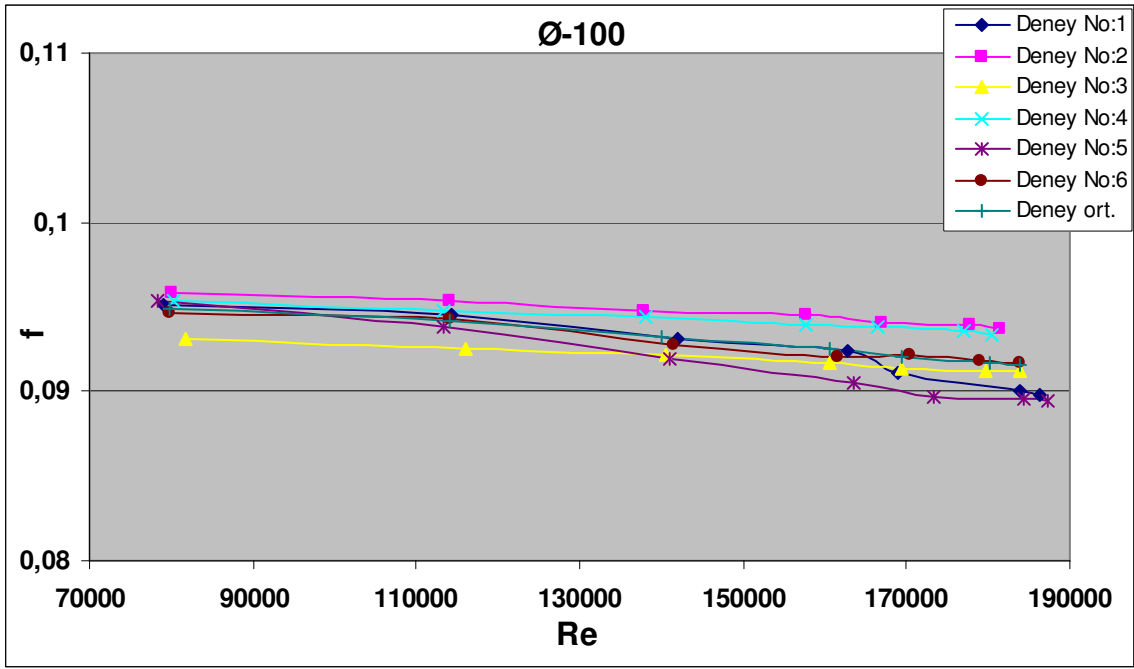
4.4.1 Boru Akımı Deneysel Sonuçları

“Ø-125” lik boru için Reynolds sayısı 100,000-190,000 arasında sürtünme katsayısı ise; 0,066-0,072 aralığında değişmektedir. Reynolds sayısındaki artışa karşın sürtünme katsayısı azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 4.16).

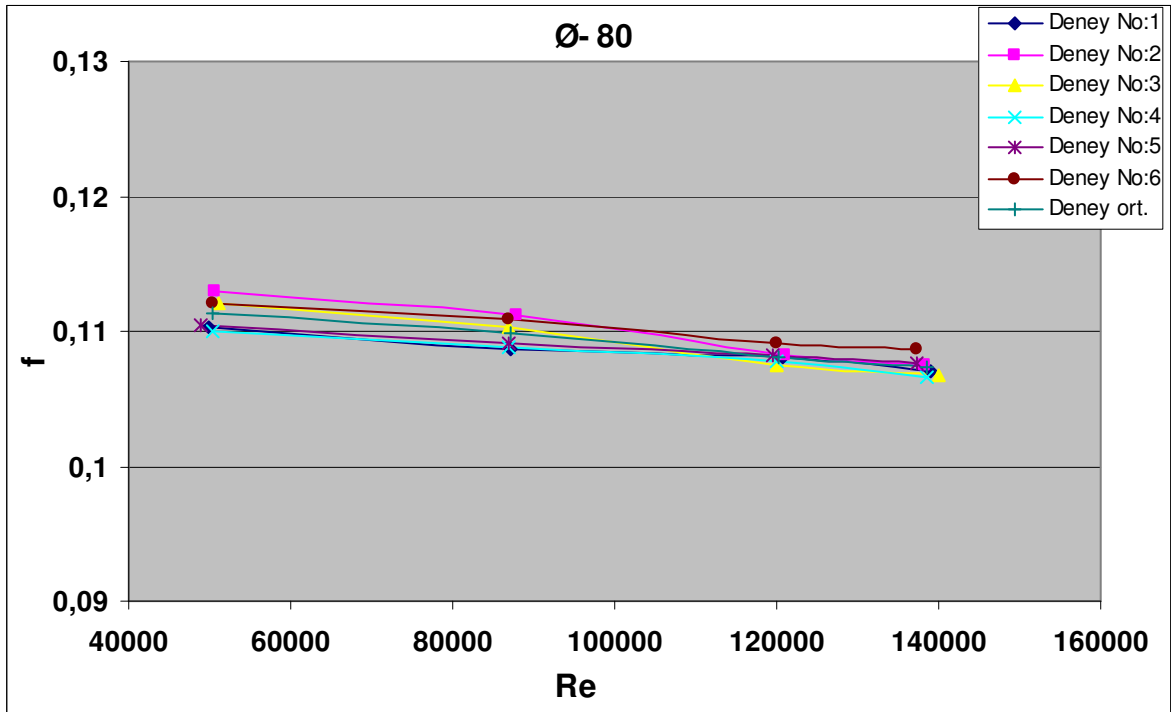


Şekil 4.16 f-Re deney ortalaması sonuçları

“Ø-100” lük boru için Reynolds sayısı 80,000-190,000 arasında sürtünme katsayısı ise; 0,088-0,096 aralığında değişmektedir. Reynolds sayısındaki artışa karşın sürtünme katsayısı azalma eğilimi göstermektedir. Boru çapındaki azalma sürtünme katsayısında artışa neden olmaktadır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 f-Re deney ortalaması sonuçları

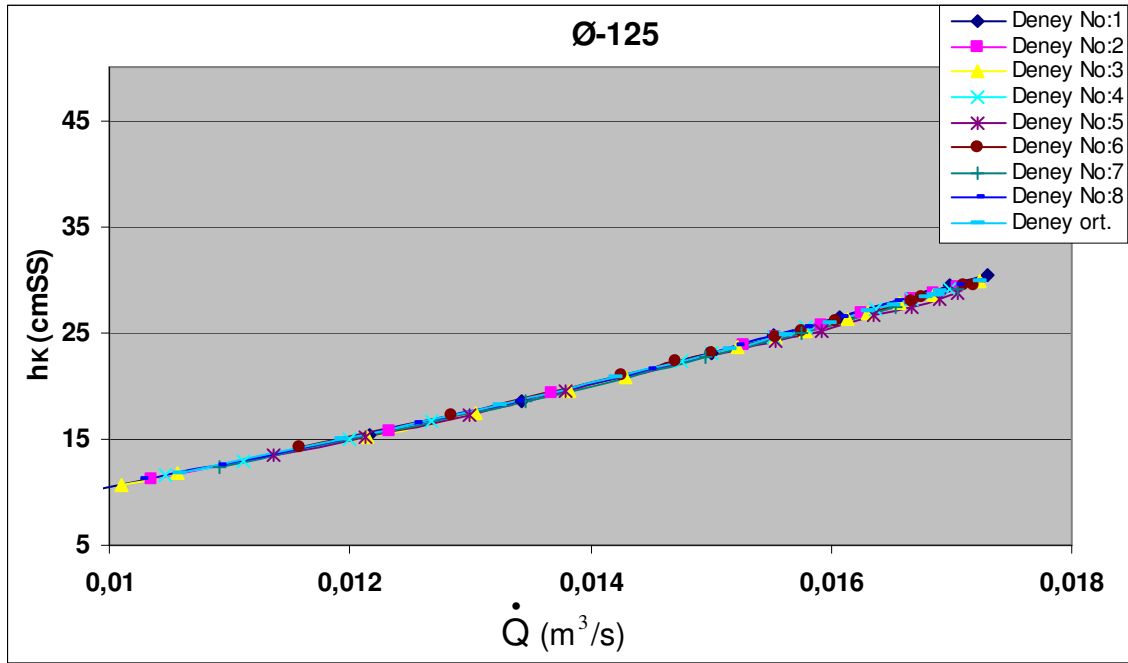


Şekil 4.18 f-Re deney ortalaması sonuçları

“Ø-80” lik boru için Reynolds sayısı 50,000-150,000 arasında sürtünme katsayısı ise; 0,106-0,114 aralığında değişmektedir. Reynolds sayısındaki artışa karşın sürtünme katsayısı azalma eğilimi göstermektedir. Boru çapındaki azalma sürtünme katsayısında artışa neden olmaktadır. En küçük çaplı boruda bu daha belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.18).

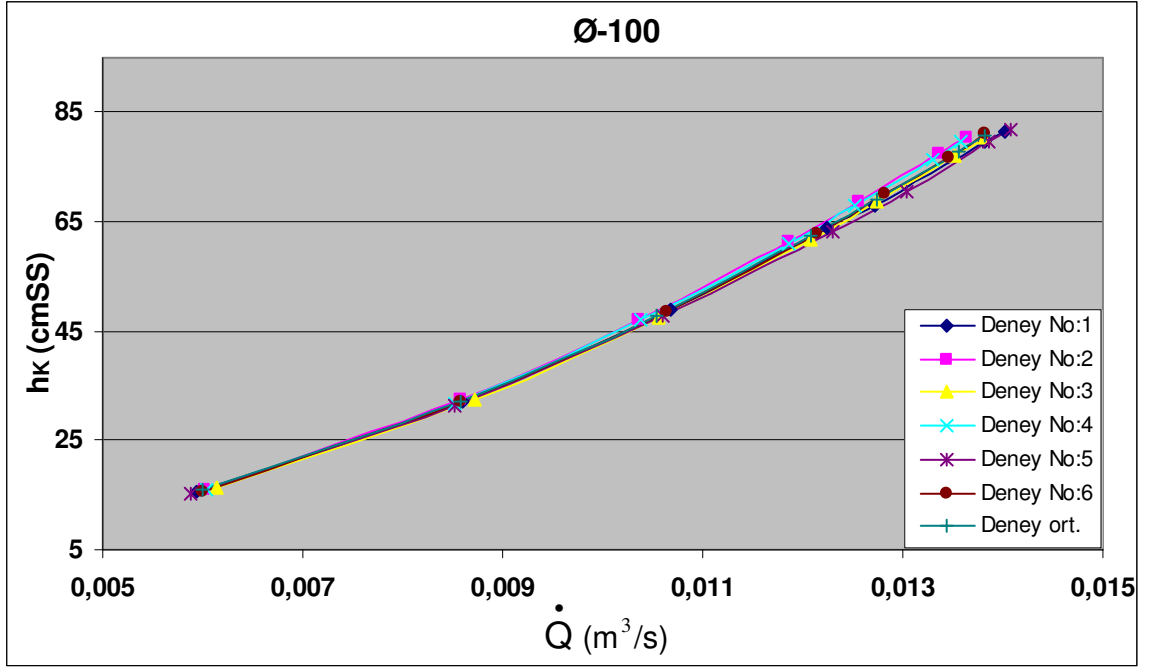
Sistemdeki debiye arttırarak boru boyunca oluşan yük kayıpları incelendiğinde:

“Ø-125” lik boru için debideki artış hızı arttırmakta dolayısıyla Reynolds sayısını da arttırmaktadır. Debi “0,1-0,018 m³/s” aralığında değişmektedir. Debinin artması yük kayıplarını da önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu artış grafiksel olarak görülmektedir (Şekil 4.19).

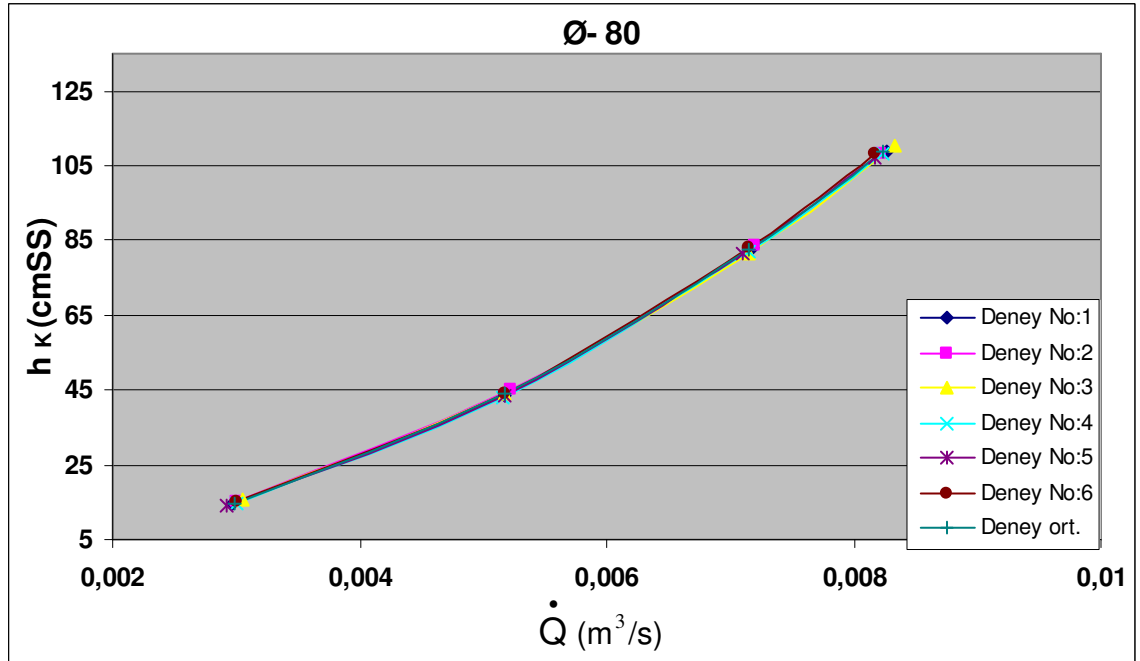


Şekil 4.19 $h_K - \dot{Q}$ deney ortalaması sonuçları

Boru çapındaki azalmaya karşın sistem debisinin arttırılmasıyla boru boyunca oluşacak olan yük kayıplarını incelediğimizde “Ø-100” lük boru için debideki artış hızı arttırmakta dolayısıyla Reynolds sayısını da arttırmaktadır. Debi “0,006-0,014 m³/s” aralığında değişmektedir. Debinin artması yük kayıplarını daha da arttırmaktadır. Bu artış grafiksel olarak görülmektedir (Şekil 4.20).

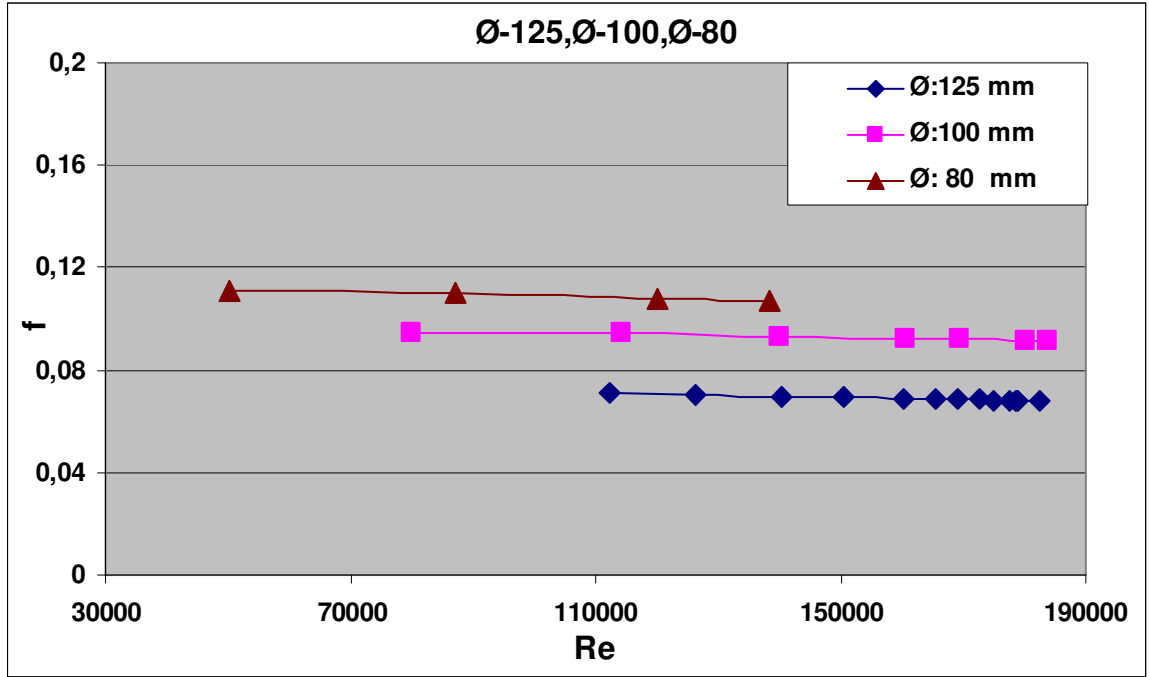


Şekil 4.20 h_K - \dot{Q} deneý ortalaması sonuçları



Şekil 4.21 h_K - \dot{Q} deneý ortalaması sonuçları

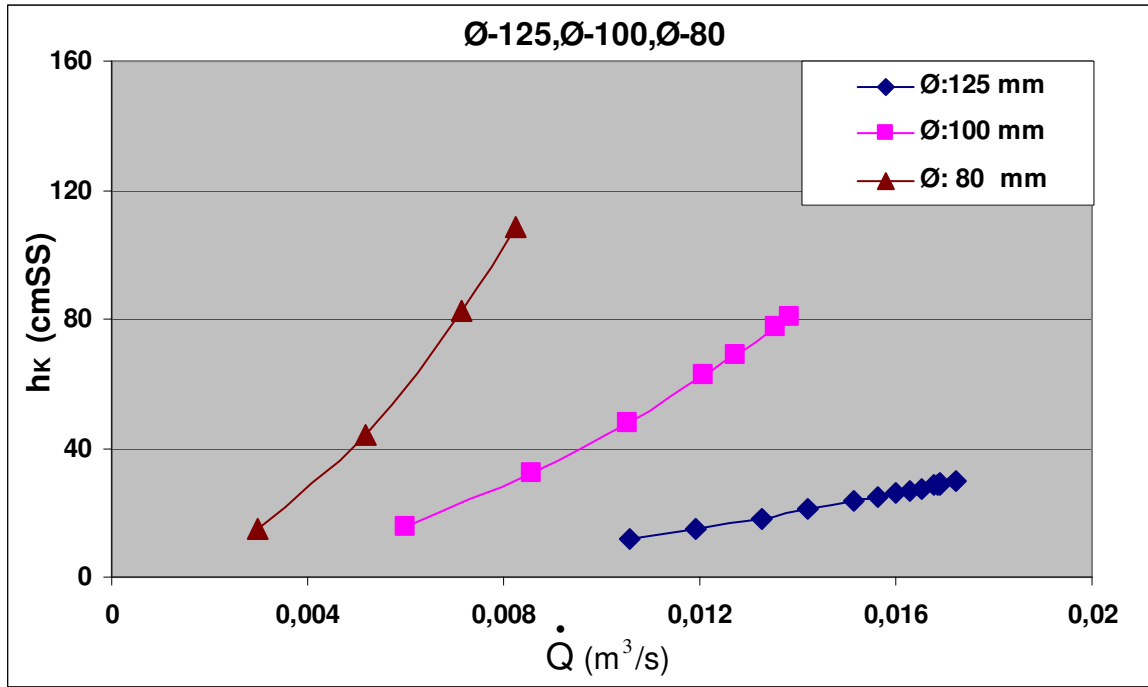
En küçük çaplı boruda, debi “0,003-0,009 m³/s” aralığında değişmektedir. “Ø-80” lik boru için debideki artış hızı arttırmakta dolayısıyla Reynolds sayısını da arttırmaktadır. Debinin artması yük kayıplarını daha da belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Bu artış grafiksel olarak görülmektedir (Şekil 4.21).



Şekil 4.22 f-Re deney ortalaması sonuçları

Üç farklı çaptaki borular karşılaştırıldığında, gerek sürtünme katsayısındaki değişim gerekse de yük kayıplarında değişimin benzer sonuçları verdiği görülmektedir. Sürtünme katsayısı en küçük çaplı boruda daha yüksek çıktığı bu da; sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile beraber boru çapının da bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir (Şekil 4.22).

Yük kaybı ise; üç farklı çapta akış hızının karesiyle doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Bu artışın en küçük çaplı boruda daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 h_K - \dot{Q} deney ortalaması sonuçları

Çizelge 4.2 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-80													
DN-1		DN-2		DN-3		DN-4		DN-5		DN-6		DN-Ort.	
Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f
49926	0,110	50577	0,113	51193	0,112	50425	0,110	49004	0,110	50375	0,112	50250	0,111
87090	0,109	87849	0,111	86940	0,110	86791	0,109	86940	0,109	86940	0,111	87092	0,110
120635	0,108	120924	0,108	120060	0,107	120060	0,108	119491	0,108	120060	0,109	120205	0,108
138913	0,107	138152	0,107	140070	0,107	138531	0,107	137399	0,108	137399	0,109	138411	0,107

Çizelge 4.3 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-100													
DN-1		DN-2		DN-3		DN-4		DN-5		DN-6		DN-Ort.	
Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f
78995	0,095	79945	0,096	81747	0,093	80267	0,095	78221	0,095	79785	0,095	79827	0,095
114306	0,094	113979	0,095	115967	0,090	113331	0,090	113331	0,090	113979	0,094	114149	0,094
141967	0,093	137798	0,095	140467	0,092	138037	0,094	140963	0,092	141463	0,093	140116	0,093
162827	0,092	157678	0,095	160534	0,092	157678	0,094	163494	0,091	161509	0,092	160620	0,093
169037	0,091	166915	0,094	169395	0,091	166566	0,094	173446	0,090	170481	0,092	169307	0,092
183837	0,090	177695	0,094	179696	0,091	176907	0,094	184262	0,090	178891	0,092	180215	0,092
186414	0,090	181330	0,094	183837	0,091	180510	0,093	187289	0,089	183837	0,092	183870	0,092

Çizelge 4.4 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-125													
DN-1		DN-2		DN-3		DN-4		DN-5		DN-6		DN-7	
Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f	Re	f
102467	0,071	109534	0,071	106952	0,071	110807	0,071	120321	0,070	122644	0,072	115508	0,070
128776	0,070	130451	0,070	111848	0,071	117647	0,071	128343	0,070	136038	0,070	142443	0,069
142231	0,070	144714	0,070	128602	0,070	127059	0,070	137510	0,069	150902	0,070	158428	0,069
158824	0,069	161653	0,069	138108	0,069	134218	0,070	146045	0,069	155710	0,070	166744	0,068
164301	0,069	164585	0,069	146382	0,069	156220	0,069	164585	0,068	158824	0,069	175013	0,068
170169	0,069	168514	0,069	151261	0,069	158824	0,069	168514	0,067	164585	0,069	180482	0,068
179801	0,069	172167	0,069	161243	0,069	164301	0,069	173105	0,067	166744	0,069		
183259	0,069	176471	0,069	164585	0,069	167183	0,069	176471	0,067	169865	0,069		
		178454	0,068	167183	0,068	173263	0,069	178957	0,067	176471	0,068		
		180482	0,068	170779	0,068	176471	0,069	180482	0,067	177457	0,068		
				178454	0,068	179801	0,068			180996	0,068		
				182556	0,068					182033	0,068		
DN-8		DN-Ort.											
Re	f	Re	f										
108784	0,071	112127	0,071										
115508	0,071	126382	0,070										
132907	0,070	140294	0,070										
141807	0,070	150389	0,069										
153453	0,070	160420	0,069										
161243	0,070	165449	0,069										
167183	0,069	169221	0,069										
170321	0,069	172594	0,069										
175013	0,069	174890	0,068										
180482	0,069	177692	0,068										
182556	0,068	178765	0,068										
		182556	0,068										

Çizelge 4.5 \dot{Q} - h_k deney ortalaması verileri

Ø-80													
DN-1		DN-2		DN-3		DN-4		DN-5		DN-6		DN-Ort.	
\dot{Q} (m ³ /s)	h_k (cmSS)	\dot{Q}	h_k	\dot{Q}	h_k	\dot{Q}	h_k	\dot{Q}	h_k	\dot{Q}	h_k	\dot{Q}	h_k
0,0030	14	0,0030	15	0,0030	15	0,0030	14	0,0029	14	0,0030	15	0,0030	14
0,0052	43	0,0052	45	0,0050	44	0,0050	43	0,0050	43	0,0052	44	0,0052	43
0,0072	83	0,0072	83	0,0071	81	0,0071	82	0,0071	81	0,0071	83	0,0072	82
0,0083	109	0,0082	108	0,0083	110	0,0082	108	0,0082	107	0,0082	108	0,0082	108

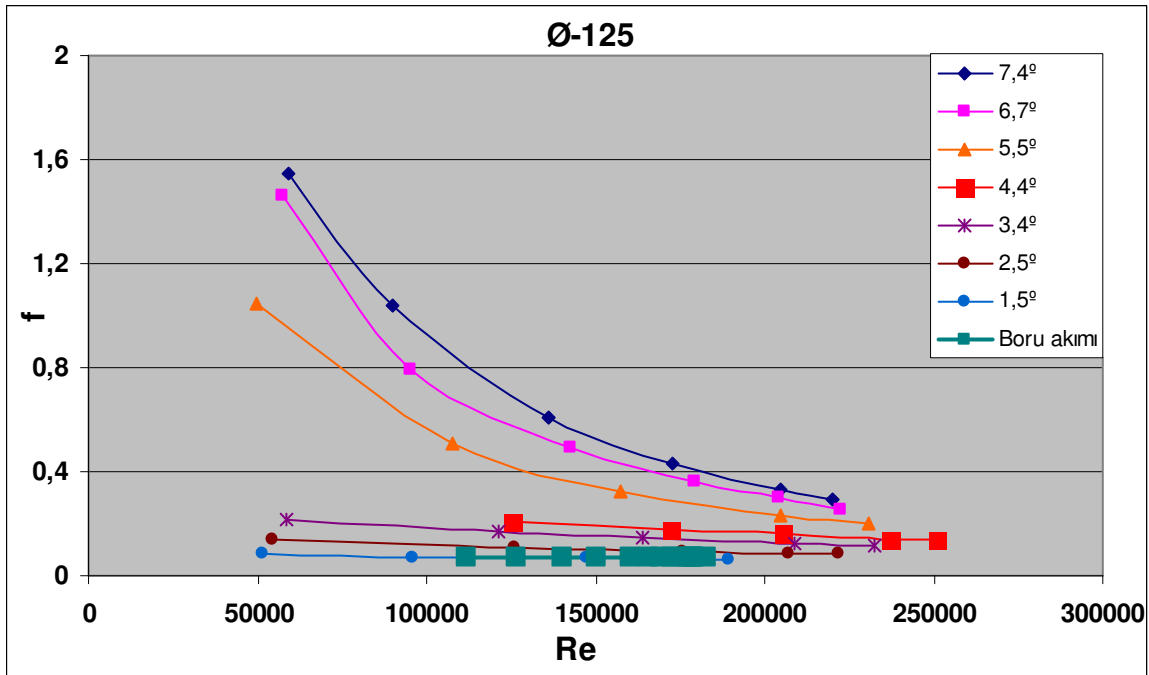
4.4.2 Açık Kanal Akımı Deney Sonuçları

Deneysel her bir eğim açısı için en az dört defa tekrarlanmıştır. Grafikteki eğriler bütün deneylerin ortalamasını göstermektedir.

Şekil 4.24'de "Ø-125" lik boru için Reynold sayısının sürtünme katsayısına etkisiyle birlikte kanal eğiminin de sürtünme katsayısına nasıl bir etkisinin olduğu ve boru akımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması görülmektedir. Reynolds sayısı 50,000 ile 250,000 arasında değişmektedir. Reynolds sayısındaki artış sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Bu azalmanın düşük Reynolds sayılarında daha çok olduğu ve yüksek Reynolds sayılarında ise sürtünme katsayısında çok küçük değişimlerin olduğu görülmektedir.

7 farklı eğim açısında deneyler yapılmıştır. Eğim açıları "7,4° " ile "1,5° " arasında değişmektedir. Büyük eğimlerde daha yüksek sürtünme katsayısı çıktığı düşük eğimlerde sürtünme katsayısının daha düşük değerlerde kaldığı bu da; eğimin sürtünme katsayısında önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir (Şekil 4.24).

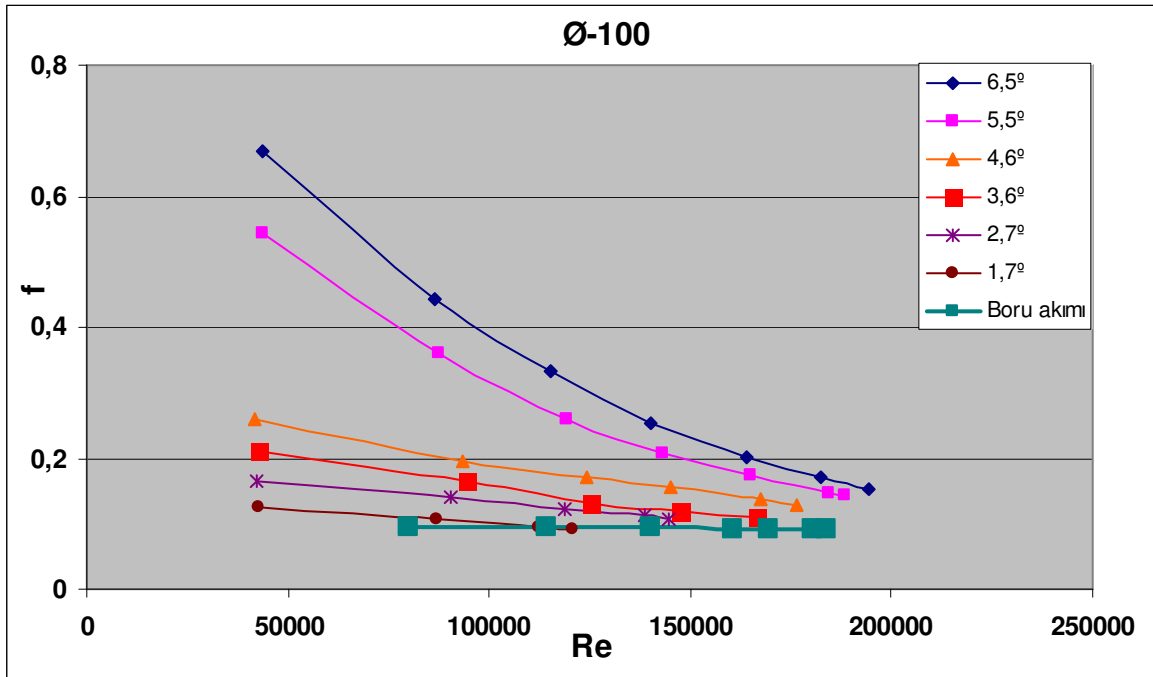
En düşük eğim açısı değerinde elde edilen sonuçla boru akımı sonuçlarının benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 4.24 f-Re deney ortalaması sonuçları

Boru çapındaki değişimin sürtünme katsayısına olan etkisine bakıldığında “Ø-100” lük boru için Reynolds sayısı 40,000 ile 200,000 aralığında olup Reynolds sayısındaki artış sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Bu azalmanın düşük Reynolds sayılarında fazla olduğu ve yüksek Reynolds sayılarında ise sürtünme katsayısında çok küçük değişimler oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4.25).

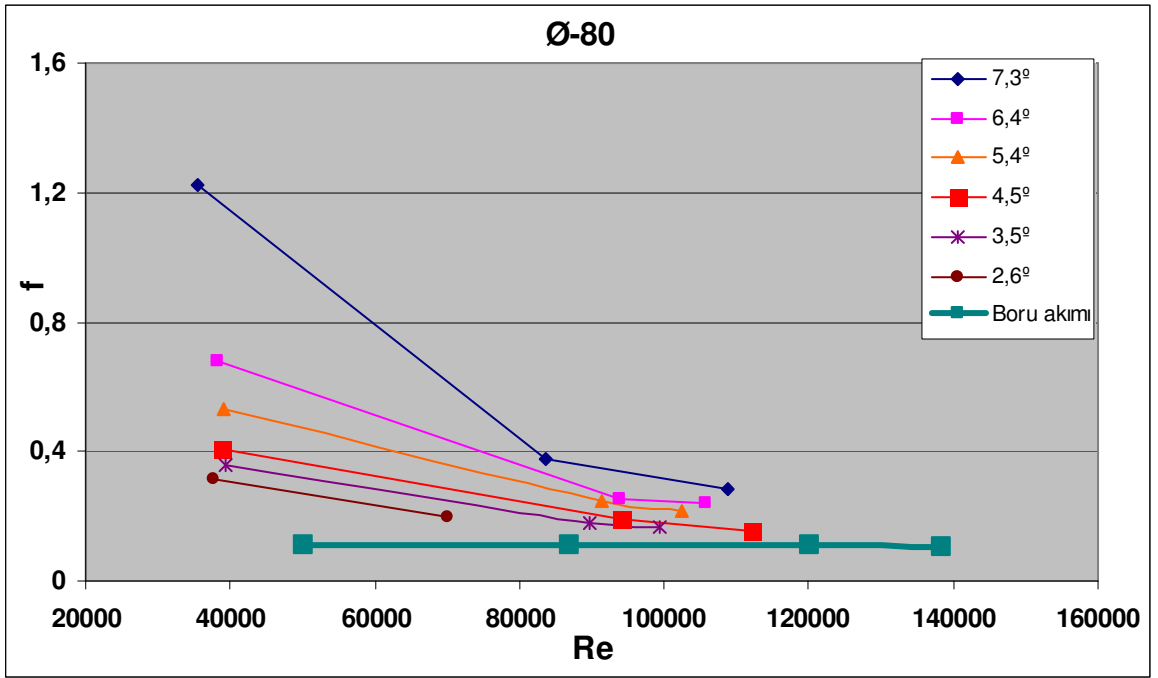
6 farklı eğim açısında deneyler yapılmıştır. Eğim açıları “6,5° ” ile “1,7° ” arasında değişmektedir. Düşük eğim açılarında sürtünme katsayısındaki değişimin az yüksek eğim açılarında ise sürtünme katsayısındaki değişimin fazla olduğu ve en düşük eğim açısı değerinde elde edilen sonuçla boru akımı sonuçlarının benzer olduğu görülmektedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 f-Re deney ortalaması sonuçları

En küçük çaplı boruda sürtünme katsayısına bakıldığında, “Ø-80” lik boru için Reynolds sayısı 35,000 ile 120,000 aralığındadır. Reynolds sayısındaki artış sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Bu azalmanın düşük Reynolds sayılarında fazla olduğu ve yüksek Reynolds sayılarında ise sürtünme katsayısında çok küçük değişimler oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4.26).

6 farklı eğim açısında deneyler yapılmıştır. Eğim açıları “7,3° ” ile “2,6° ” arasında değişmektedir. Düşük eğim açılarında sürtünme katsayısındaki değişimin az yüksek eğim açılarında ise sürtünme katsayısındaki değişim fazla olmaktadır. En düşük eğim açısı “2,6°” dir. Dolayısıyla boru akımında elde edilen sürtünme katsayısı değeri bu eğim açısından elde edilen sürtünme katsayısı değerinden daha düşük olmaktadır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 f-Re deney ortalaması sonuçları

Açık kanal akımında akım tipinin belirlenmesi için “Fr” Froude sayısına bakılmaktadır. Boyutsuz Froude sayısı, açık kanallardaki akışın karakterini belirleyen önemli bir parametredir. Akış, aşağıdaki şekilde sınıflandırılır:

$$\begin{aligned} Fr < 1 & \quad \text{kririkaltı ya da sakin akış} \\ Fr = 1 & \quad \text{kritik akış} \\ Fr > 1 & \quad \text{kritiküstü ya da sel akışı} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Deneysel veriler ışığında ve Denklem 4.21’den elde edilen sonuçlarla, hemen hemen bütün boru çaplarında Froude sayısı 1’den büyük çıkmıştır ve değeri 1 ile 2 arasında değişmektedir. Akım tipini farklı çaptaki borularda ayrı ayrı incelersek:

- “Ø-80” lik boru için akım tipi, bütün eğim açıları ve akış hızlarında sel akımı çıkmıştır; sadece “7,3° ” eğim açısının ilk değerinde akım tipi sakin akım olarak çıkmıştır. Bu da çok düşük Reynolds sayısından dolayıyla akış hızının çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır.
- “Ø-100” lük boru için akım tipi, bütün eğim açıları ve akış hızlarında sel akımı çıkmıştır.
- “Ø-125” lik boru için akım tipi, bütün eğim açıları ve akış hızlarında sel akımı çıkmıştır; sadece “7,4°-6,7°-5,5° ” eğim açısının ilk değerlerinde akım tipi sakin akım olarak çıkmıştır. Bu da çok düşük Reynolds sayısından dolayıyla akış hızının çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.8 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-80											
7,3 °				6,4 °				5,4 °			
Re	f	y _{ort} (mm)	V _{ort} (m/s)	Re	f	y _{ort}	V _{ort}	Re	f	y _{ort}	V _{ort}
35617	1,2253	33,667	0,5592	38235	0,6774	29,778	0,5967	39176	0,5295	29,333	0,6184
83697	0,3771	39,667	0,8514	93936	0,2525	45,333	1,1181	91381	0,2461	46,889	1,0698
108846	0,2866	52,333	1,2190	105823	0,2407	51,556	1,1906	102573	0,2192	51,556	1,1539
4,5 °				3,5 °				2,6 °			
Re	f	y _{ort}	V _{ort}	Re	f	y _{ort}	V _{ort}	Re	f	y _{ort}	V _{ort}
38863	0,4047	28,111	0,6335	39495	0,3607	29,778	0,6164	37840	0,3154	31,111	0,5738
94034	0,1892	46,111	1,1098	89798	0,179	49,222	1,0287	70004	0,1983	45,556	0,8312
112133	0,1532	54,000	1,2423	99462	0,1666	56,889	1,0880				

Çizelge 4.9 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-100											
6,5 °				5,5 °				4,6 °			
Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}
43545	0,6679	31,083	0,6239	43730	0,5441	30,417	0,6375	41974	0,2589	24,083	0,7436
86402	0,4420	47,333	0,9092	87522	0,3609	46,667	0,9292	93464	0,1969	41,667	1,0718
115547	0,3333	56,250	1,0985	119173	0,2597	54,917	1,1476	124211	0,1696	51,667	1,2380
140239	0,2547	61,750	1,2753	143107	0,2085	61,500	1,3034	145297	0,1571	60,167	1,3366
163796	0,2023	68,000	1,4377	165050	0,1753	68,417	1,4456	167593	0,1360	68,250	1,4691
182644	0,1720	74,333	1,5722	184575	0,1461	74,167	1,5889	176642	0,1280	73,500	1,5229
194395	0,1535	79,500	1,6698	188505	0,1422	78,583	1,6177				
3,6 °				2,7 °				1,7 °			
Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}
42867	0,2101	24,833	0,7397	42474	0,1646	25,833	0,7088	42670	0,1265	28,917	0,6484
94198	0,1638	42,500	1,0654	90639	0,1403	45,333	0,9811	87014	0,1063	48,667	0,8995
125473	0,1322	51,75	1,2495	118897	0,1235	56,083	1,1322	112242	0,0952	61,083	1,0253
147594	0,1185	59,833	1,3611	138543	0,1125	65,583	1,2304	120632	0,0906	67,333	1,0618
166291	0,1095	69,583	1,4499	144781	0,1061	69,083	1,2647				

Çizelge 4.10 f-Re deney ortalaması verileri

Ø-125											
7,4 °				6,7 °				5,5 °			
Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}
59241	1,5487	50,833	0,5522	57143	1,4628	50,333	0,5365	49977	1,0443	42,000	0,5379
89672	1,0359	62,667	0,7267	95363	0,7885	61,333	0,7832	107876	0,5088	61,167	0,8875
136316	0,6088	75,333	0,9997	142331	0,4934	74,333	1,0503	157680	0,3193	72,333	1,1792
173052	0,4312	83,833	1,2161	179404	0,3614	83,833	1,2608	204983	0,2301	84,667	1,4360
204620	0,3293	90,833	1,4082	204106	0,2985	91,333	1,4032	230509	0,1987	98,667	1,5751
220228	0,2900	95,500	1,5059	222613	0,2559	95,667	1,5219				
4,4 °				3,4 °				2,5 °			
Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}	Re	f	y_{ort}	V_{ort}
125382	0,2103	50,333	1,1771	58746	0,2179	30,000	0,8345	54567	0,1368	27,083	0,8468
172177	0,1800	63,222	1,3879	121012	0,1703	49,833	1,1447	126140	0,1069	48,500	1,2169
205331	0,1622	73,333	1,5253	163931	0,1455	62,000	1,3373	175736	0,0955	63,583	1,4117
237458	0,1423	82,444	1,6782	208832	0,1236	74,083	1,5436	207277	0,0874	74,667	1,5264
250644	0,1362	89,111	1,7323	232806	0,1170	83,417	1,6388	221823	0,0834	80,500	1,5816
1,5 °											
Re	f	y_{ort}	V_{ort}								
51485	0,0823	25,833	0,8328								
95700	0,0730	39,917	1,0723								
125911	0,0683	49,500	1,1964								
147413	0,0658	56,500	1,2768								
169904	0,0626	64,333	1,3554								
189495	0,0595	70,917	1,4315								

Her bir eğim açısında su sayaçlarından okunan debi değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Deneyle en az dört defa tekrarlanmış olup bu debi değerlerinin ortalaması Çizelge 4.11-4.12 ve 4.13'de görülmektedir.

Çizelge 4.11 Debi ortalaması verileri

Ø-80					
7,3 °	6,4 °	5,4 °	4,5 °	3,5 °	2,6 °
\dot{Q} (m ³ /s)	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}
0,000989	0,000981	0,000997	0,000964	0,001014	0,000995
0,002822	0,003147	0,003134	0,003188	0,003189	0,002353
0,004252	0,003888	0,003769	0,004269	0,003949	

Çizelge 4.12 Debi ortalaması verileri

Ø-100					
6,5 °	5,5 °	4,6 °	3,6 °	2,7 °	1,7 °
\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}
0,001264	0,001254	0,001056	0,001097	0,001111	0,001188
0,003225	0,003238	0,003223	0,003288	0,003293	0,003306
0,004831	0,004902	0,004906	0,004961	0,004961	0,004972
0,00626	0,006369	0,006366	0,006441	0,006466	0,005745
0,007861	0,007958	0,008065	0,008126	0,007034	
0,009427	0,009509	0,009031			
0,010668	0,01023				

Çizelge 4.13 Debi ortalaması verileri

Ø-125						
7,4 °	6,7 °	5,5 °	4,4 °	3,4 °	2,5 °	1,5 °
\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}	\dot{Q}
0,002521	0,002417	0,0019	0,005305	0,001848	0,001624	0,001493
0,004349	0,004561	0,00515	0,008397	0,005089	0,005219	0,003533
0,007485	0,007742	0,008415	0,011063	0,007895	0,008603	0,005273
0,010282	0,010657	0,012271	0,013931	0,011332	0,01131	0,006694
0,01296	0,012987	0,015707	0,015626	0,013778	0,012781	0,008381
0,014563	0,014744					

5. SONUÇ ÖZETLERİ VE ÖNERİLER

Ondüleli borular çeşitli geometrik cidar yapısına sahip olup, ondüle parametreleri farklı boru çaplarına göre değişmektedir.

Dairesel kesitli ondüleli borular için bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenir:

- Reynolds sayısı “ Re ” nin artmasıyla Darcy sürtünme katsayısı “ f ” azalmaktadır.
- Yüksek “ Re ” sayılarında “ f ” sürtünme katsayısının değişimi düşük “ Re ” sayılarına göre daha az olmaktadır. “ f ” nin değişimini gösteren eğri düşük Re aralığında daha fazla eğime sahiptir.
- Düz borularda sürtünme katsayısı çok daha düşük değerdedir. Ondüleli borulardaki gibi Reynolds sayısı artarken sürtünme katsayısı azalmaktadır. Fakat düz boruda bu azalma ani ve hızlıdır.
- Boru akımında, boru çapındaki azalma “ h_k ” yük kaybını arttırmakta buna bağlı olarak “ f ” sürtünme katsayısında önemli derecede bir artış meydana getirmektedir.
- Açık kanal akımında, borudaki doluluk miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır.
- Açık kanal akımında, kanal eğimi arttıkça sürtünme katsayısı bir hayli yükselmektedir. Sürtünme katsayısı özellikle aynı çaptaki yatay boruda yani boru akımında elde edilen değerlerden oldukça yüksek çıkmaktadır.
- Açık kanal akımında, büyük eğim açılarında ve düşük Reynolds sayılarında sürtünme katsayısı oldukça yüksek çıkmakta, eğim açısının azalması ve Reynolds sayısının artmasıyla sürtünme katsayısı azalmaktadır.

Dairesel kesitli ondüleli borularda sürtünme mekanizmalarını etkileyen parametreler yukarıda sıralanmıştır. Daha kapsamlı bir çalışma yapılacağı zaman, projenin hazırlık aşamasında yukarıdaki bilgiler bu çalışmaya bir ön zemin oluşturmakta ve çalışmanın sürdürülebilirliği açısından bir fikir ortaya atmaktadır. Debi, basınç kaybı ve derinlik ölçümlerinde hassasiyeti yüksek ölçü aletleri ile farklı çap ve malzemelerde borular kullanılarak ve parametre sayısı artırılarak daha doğru sonuçlara ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

Afroz, H.M. ve Miyara, A., (2007), "Friction factor correlation and pressure loss of single-phase flow inside herringbone microfin tubes", *International Journal of refrigeration*, 0140-7007:1-8.

Behçet, R. ve İlkılıç, C., (2006), "İç içe borulu ısı değiştiricisine yerleştirilen helisel yayların ısı transferi ve basınç dűřümü üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi", *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 18:559-564.

Ceylan, K. ve Kelbaliyev, G., (2003), "The roughness effects on friction and heat transfer in the fully developed turbulent flow in pipes", *Applied Thermal Engineering*, 23:557-570.

Chang, S.W., Jan, Y.J., Liou, J.S., (2007), "Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape", *International Journal of Thermal Sciences*, 46:506-518.

Cheng, L. ve Chen, T., (2007), "Study of vapor liquid two-phase frictional pressure drop in a vertical heated spirally internally ribbed tube", *Chemical Engineering Science*, 62:783-792.

Currie, I.G. (1974), *Fundamental Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. (2007), *Akışkanlar Mekaniği*, Çeviri Editörü Engin, T., Güven Kitabevi, İzmir.

Dong, Y., Huixiong, L., Tingkuan, C., (2001), "Pressure drop, heat transfer and performance of single-phase turbulent flow in spirally corrugated tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24:131-138.

Ead, S.A., Rajaratnam, N., Katopodis, C., Ade, F., (2000), "Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol:126, No:10.

Farshad, F., Rieke, H., Garber, J., (2001), "New developments in surface roughness measurements, characterization, and modeling fluid flow in pipe", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29:139-150.

Fischer, L. ve Martin, H., (1997), "Friction factors for fully developed laminar flow in ducts confined by corrugated parallel walls", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3:635-639.

French, R.H. (1994), *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill International Editions/Civil Engineering Series, New York.

Fu, B.R., Tseng, F.G., Pan, C., (2007), "Two-phase flow in converging and diverging microchannels with CO₂ bubbles produced by chemical reactions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50:1-14.

Geyer, P.E., Fletcher, D.F., Haynes, B.S., (2007), "Laminar flow and heat transfer in a periodic trapezoidal channel with semi-circular cross-section", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50:3471-3480.

Ghaddar, N. ve El-Hajj, A., (2000), "Numerical study of heat transfer augmentation of viscous flow in corrugated channels", *Heat Transfer Engineering*, 21:35-46.

- Li, B., Feng, B., He, Y., Tao, W., (2006), "Experimental study on friction factor and numerical simulation on flow and heat transfer in an alternating elliptical axis tube", *Applied Thermal Engineering*, 26:2336-2344.
- Liao, H. ve Knight, D.W., (2007), "Analytic stage-discharge formulae for flow in straight trapezoidal open channels", *Advances in Water Resources*, 30:2283-2295.
- Lin, C.X. ve Ebadian, M.A., (2007), "Condensation heat transfer and pressure drop of R134a in annular helicoidal pipe at different orientations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 0017-9310.
- Mahmud, S., Islam, S., Mamun, A.H., (2002), "Seperation characteristics of fluid flow inside two parallel plates with wavy surface", *International Journal of Engineering Science*, 40:1495-1509.
- Metwally, H.M. ve Manglik, R.M., (2004), "Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:2283-2292.
- Miyara, A. ve Otsubo, Y., (2002), "Condensation heat transfer of herringbone micro fin tubes", *International Journal of Thermal Sciences*, 41:639-645.
- Nilpueng, K. ve Wongwises, S., (2006), "Flow pattern and pressure drop of vertical upward gas-liquid flow in sinusoidal wavy channels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30:523-534.
- Nishimura, T. ve Matsune, S., (1998), "Vortices and wall shear stresses in asymmetric and symmetric channels with sinusoidal wavy walls for pulsatile flow at low Reynolds numbers", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 19:583-593.
- Potter, M.C. ve Scott, E.P. (2004), *An Introduction to Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Brooks/Cole Thomson Learning.
- Promvonge, P., (2007), "Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts" , *Energy Conversion and Management*, 0196-8904.
- Promvonge, P. ve Eiamsa-ard, S., (2007), "Heat transfer augmentation in a circular tube using V-nozzle turbulator inserts and snail entry", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 0894-1777.
- Promvonge, P. ve Eiamsa-ard, S., (2007), " Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34:72-82.
- Ray, S. ve Date, A.W., (2003), "Friction and heat transfer characteristics of flow through square duct with twisted tape insert", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46:889-902.
- Roberson, J.A., Cassidy, J.J., Chaudhry, M.H. (1995), *Hydraulic Engineering*, John Wiley and Sons, New York.
- Romeo, E., Royo, C., Monzon, A., (2002), "Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes", *Chemical Engineering Journal*, 86:369-374.

Rozzi, S., Massini, R., Paciello, G., Pagliarini, G., Rainieri, S., Trifiro, A., (2007), "Heat treatment of fluid foods in a shell and tube heat exchanger: Comparison between smooth and helically corrugated wall tubes", *Journal of Food Engineering*, 79:249-254.

Rush, T.A., Newell, T.A., Jacobi, A.M., (1999), "An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:1541-1553.

Sara, O.N., Pekdemir, T., Yapıcı, S., Yılmaz, M., (2001), "Heat-transfer enhancement in a channel flow with perforated rectangular blocks", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22:509-518.

Shames, I.H. (2003), *Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill International Edition Fourth Edition, New York.

Sığıner, A. ve Sümer, B.M. (1974), *Hidrolik Problemleri*, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Silberman, E., (1970), "Effect of helix angle on flow in corrugated pipes", *Journal of the Hydraulics Division, proceedings of A.S.C.E.*, No:45 Series A .

Sivashanmugan, P. ve Suresh, S., (2007), "Experimental study on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts", *Applied Thermal Engineering*, 27:1311-1319.

Sivashanmugan, P. ve Nagarajan, P.K., (2007), "Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 0894-1777.

Vicente, P.G., Garcia, A., Viedma, A., (2004), "Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:671-681.

Wang, C.C. ve Chen, C.K., (2002), "Forced convection in a wavy-wall channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45:2587-2595.

White, F.M. (2004), *Akışkanlar Mekaniği*, 4. Basımın Türkçesi Kırkköprü, K. ve Ayder, E., Literatür Yayıncılık Dağıtım, İstanbul.

Wojtkowiak, J. ve Popiel, C.O., (2000), "Effect of cooling on pressure losses in U-type wavy pipe flow", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2:169-177.

Xin, R.C., Awward, A., Dong, Z.F., Ebadian, M.A., (1997), "An experimental study of single-phase and two-phase flow pressure drop in annular helicoidal pipes", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 18:482-488.

Yang, R. ve Chiang F.P., (2002), "An experimental heat transfer study for periodically varying-curvature curved-pipe", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45:3199-3204.

Yoo, D.H. ve Lee, T.H., (2000), "Friction factor of smooth turbulent open channel flow", *Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol:20, No.1-B, pp.1-10.

Zhao, W. ve Tras, O., (1997), "Electrochemical mass transfer measurements in rough surface pipe flow: geometrically similar V-shaped grooves", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 12:2785-2797.

Zimparov, V., (2001), “ Enhancement of heat transfer by a combination of three-start spirally corrugated tubes with a twisted tape”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44:551-574.

Zimparov, V., (2002), “ Enhancement of heat transfer by a combination of a single-start spirally corrugated tubes with a twisted tape”, Experimental Thermal and Fluid Science, 25:535-546.

Zimparov, V., (2004), “Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 1:friction factors”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47:589-599.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.thermofluids.net

[2] www.sciencedirect.com

[3] www.engineeringvillage.com

[4] www.interscience.com

[5] www.thomasnet.com

[6] www.firatboru.com.tr

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 26.05.1982

Doğum yeri Diyarbakır

Lise 1997–2000 Batman Anadolu Lisesi

Lisans 2000–2005 Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005–2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı kurumlar

2005–Devam ediyor Y.T.Ü. Makine Fak. Makine Müh. Termodinamik ve
Isı Proses A.B.D. Araştırma Görevlisi