

**GİRİŞ VE TAM GELİŞMİŞ AKIŞ BÖLGESİNDE
LAMİNAR-TÜRBÜLANS GEÇİŞ ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Yük. Müh. Hasan DÜZ

Doktora Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim dalı

Danışman: Doç.Dr. Haydar EREN

HAZİRAN-2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİRİŞ VE TAM GELİŞMİŞ AKIŞ BÖLGESİNDE LAMİNAR-TÜRBÜLANS GEÇİŞ
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Hasan DÜZ

(08120201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Mayıs 2013
Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Haziran 2013

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Haydar EREN (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Aydın DURMUŞ (B.Ü)
Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN (F.Ü)
Prof. Dr. M. Emin EMİROĞLU (F.Ü)
Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)

HAZİRAN-2013

ÖNSÖZ

Doktora tez danışmanım sayın Doç. Dr. Haydar EREN hocama katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında çokça yardımlarını aldığım Makine Mühendisliğinde Araştırma görevlisi olan Yusuf BİLGİÇ ve İsmail ŞANLITÜRK'e ayrıca teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında yardımlarını ve manevi desteğini esirgemeyen Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN hocama ve diğer Enerji Bilim Dalı öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Hasan DÜZ
ELAZIĞ – 2013

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
1. GİRİŞ	(1)
1.1. Giriş	(1)
1.2. Literatür Araştırması	(2)
1.3. Akış ve Akışkan Özellikleri	(6)
1.3.1. Basınç	(7)
1.3.2. Kaymama Koşulu–Viskoz Akış Bölgesi	(7)
1.3.3. Laminer–Türbülanslı Akış	(8)
1.3.4. Viskozite–Kayma Gerilmesi	(11)
1.4. Borularda Akış	(11)
1.4.1. Giriş Bölgesi	(11)
1.4.1.2. Giriş Uzunlukları	(13)
1.4.2. Borularda Basınç Düşüşü ve Yük Kaybı	(14)
1.4.3. Süreklilik ve Navier-Stokes Denklemleri	(18)
1.4.4. Türbülanslı Boru Akışları	(19)
1.4.4.1. Türbülans Kayma Gerilmesi	(22)
1.4.4.2. Türbülanslı Navier Stokes Denklemleri	(24)
1.4.4.3. Türbülans Hız Profili	(25)
1.4.5. Boru içi Pürüzlülüğü	(27)
2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ	(29)
2.1. Giriş	(29)
2.2. Türbülans Modelleme	(30)
2.3. Sayısal Simulasyonlar	(31)
2.4. RANS Çözümlerin Temeli	(33)
2.5. RANS Modelleri	(34)
2.5.1. İkinci Dereceden Kapatıcı Modeller	(34)
2.5.2. Birinci Dereceden Kapatıcı Modeller	(35)
2.5.2.1. Sıfır Denklemlili Modeller	(35)
2.5.2.2. Bir Denklemlili Model	(36)
2.5.2.3. İki Denklemlili Türbülans Modelleri	(36)
a) k-omega Modeli	(36)
b) k-epsilon Modeli	(38)
2.6 Büyük Eddy Simulasyonu	(39)
2.6.1 Smagorinsky Model	(40)
2.6.2 Dinamik Smagorinsky-Lilly Model	(41)
2.6.3 Wale Modeli:	(42)
2.6.4. Kinetik-Enerji Transport Modeli	(42)
2.7 Türbülans Modellerin Uygulama Alanları	(43)
2.7.1 Laminar Akış Çözüm	(44)
2.7.2 sıfır denklemlili model	(44)
2.7.3 bir denklemlili model (spalart Almaras model)	(45)
2.7.4 k-epsilon modelleri	(45)
2.7.5 k-omega Modelleri	(45)
2.7.5.1 Baseline (BSL) k-Omega Modeli	(46)

2.7.5.2 Shear Stress Transport (SST) modeli	(46)
2.7.6 Reynolds Gerilme Modeli	(47)
2.7.7 Büyük Eddy Simulasyonu	(48)
2.7.8 DES (Detached eddy simulation)	(49)
2.8 Duvara Yakın Türbülans	(50)
2.9. Sayısal Metodlar	(51)
2.9.1 Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Sonlu Fark Açılımı	(52)
2.9.2 Diferansiyel Denklemlerin Ayrıklaştırılması	(52)
2.9.2.1 Taylor Seri Açılımı	(53)
2.9.3 Sayısal Çözümler İçindeki Hatalar	(54)
2.9.4 Cebirsel Denklemlerin Çözüm Kümesi Metodları	(54)
2.9.5 Daimi Olmayan Sistemler	(55)
2.9. Sonuç	(56)
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	(58)
3.1. Giriş	(58)
3.2. Boru Teknik Bilgileri	(59)
3.3. Akışkan ve Özellikleri	(60)
3.4. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	(61)
3.4.1. Statik Basınç Değişimi	(64)
3.4.2. Darcy sürtünme faktörü ve Boru pürüzlülükleri	(66)
3.4.3. Basınç Çalkantıları	(73)
3.5 Sonuç	(81)
4. REYNOLDS ORTALAMALI NAVİER STOKES DENKLEMLERİYLE SAYISAL ÇÖZÜM	(83)
4.1. Giriş	(83)
4.2. SST k-omega Türbülans Modeli ile Çözüm	(85)
4.2.1. Boru Geometrisi ve Ağ yapısı	(86)
4.2.2. Sınır Şartları ve Fiziksel Koşulların Atanması	(98)
4.3 Sonuç	(105)
5. REYNOLDS ORTALAMALI NAVİER STOKES DENKLEMLERİ İLE YAPILAN SAYISAL ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ	(106)
5.1. Giriş	(106)
5.2. Sayısal Sonuçların Deneysel Değerlerle Karşılaştırılması	(106)
5.3. Darcy Sürtünme Faktörünün Sayısal Analizi	(112)
5.4. Duvar Kayma Gerilmesinin Sayısal Analizi	(117)
5.5. Hidrodinamik Gelişme Uzunluğunun Sayısal Analizi	(124)
5.5.1. Kritik ve Geçiş hidrodinamik Mesafelerinin Sayısal Analizi	(125)
5.5.2 Hidrodinamik Gelişme Mesafesinin Sayısal Analizi	(135)
5.6. Hız Profilleri	(139)
5.7. Sayısal Hız Profillerinin Deneysel Bağlantılarla Karşılaştırılması	(143)
5.8. Boyutsuz Hız Profillerinin Başka Deneysel Çalışmalarla Karşılaştırılması	(147)
5.9. Eksenel Hız Profiline Sayısal Analizi	(149)
5.11. Sonuç	(151)
6 BÜYÜK EDDY SİMULASYONU İLE SAYISAL ÇÖZÜM	(155)
6.1 Giriş	(155)
6.2 Boru Geometrisi ve Ağ Yapısı	(156)
6.3 Sınır Şartları ve Fiziksel Koşulların Atanması	(158)
6.4 Sayısal Sonuçlarının Değerlendirilmesi	(162)
6.4.1 Türbülanslı Akış Karakteristikleri	(162)

6.4.1.1 Hız Görselleştirme.....	(162)
6.4.1.2 Basınç Görselleştirme.....	(166)
6.4.1.3 Akım çizgileri ve Akış Çalkantıları.....	(167)
6.4.2 Basınç Kaybı.....	(168)
6.4.3 Darcy Sürtünme Faktörü	(169)
6.4.4 Hız Profilleri.....	(170)
6.4.5 Hız ve Basınç Çalkantıları.....	(173)
6.4.5.1 Hız Çalkantıları	(173)
6.4.5.2 Basınç Çalkantıları	(176)
6.4.6 Reynolds Gerilmeleri	(177)
6.5 Sonuç	(178)
7 DENEYSEL ÇALIŞMADA BELİRSİZLİK ANALİZİ	(180)
7.1 Giriş	(180)
7.2. Deneylerde Hata Analizi.....	(181)
7.3. Belirsizliği Sonuç Olarak Tespit Etmek	(182)
7.4. Deney Çalışmasında Toplam Belirsizliğin Tespiti.....	(183)
7.4.1. Reynolds Sayısı için Belirsizlik Tespiti	(183)
7.4.2. Sürtünme Faktörü için Belirsizlik Tespiti	(185)
7.5. Ölçülen Değerlerin Belirsizliklerinin Belirlenmesi.....	(186)
7.5.1 Basınç Kaybı Ölçümlerinde Ortaya Çıkabilecek Belirsizlikler.....	(186)
7.5.2 Kütle ve zaman ölçümlerindeki ortaya çıkabilecek belirsizlikler.....	(186)
7.5.3 Diğer Belirsizlikler.....	(187)
7.5.4 Fiziksel Özelliklerin Belirsizliği.....	(187)
7.6 Sonuç	(188)
8 SONUÇ VE ÜNERİLER	(189)
8.1 Giriş	(189)
8.2 Deneysel Çalışma sonuçları:	(189)
8.3 Sayısal Çalışma Sonuçları:	(190)
9 ÖNERİLER	(195)
10. KAYNAKLAR	(197)
11. EKLER	(201)

ÖZET

Tam gelişmiş boru akışlarında statik basınç düşüşünü hesaplamak için deneysel bağıntılar bulunmasına rağmen boru girişinde gelişen akış için herhangi bir analitik veya deneysel bağıntı ise bulunmamaktadır. Uzun borulu akışlarda giriş etkileri önemsiz kalırken kısa borulu akışlarda ise giriş etkileri oldukça önemli olmaktadır. Bu nedenle boru girişinden tam gelişmiş akış şartlarına kadar gelişen akış özelliklerini analiz etmeye yönelik deneysel ve sayısal bir çalışma başlatılmıştır.

Piyasadan temin edilen ve farklı malzemelerden imal edilmiş boru türlerini pürüzlülük yönünden değerlendirmek ve sayısal çalışmaya bir karşılaştırma zemini yaratmak için deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma alüminyum, bakır, demir, galvanizli ve PPRC malzemelerden imal edilmiş beş ayrı boru türü ile yapılmıştır. PPRC boru dışındaki diğer borular aynı çapa sahiptirler. Deneysel çalışma 2000-55000 aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan tam gelişmiş akış kısmından Darcy sürtünme faktörü hesaplanmış ve Reynolds ile değişimine uyan Moody diyagramı eğrilerinden boru pürüzlülük değerleri bulunmuştur. Boru pürüzlülükleri azalan yönde sıralandığında galvanizli, demir, alüminyum, PPRC ve bakır boru değerleri gelmektedir.

Deney Reynolds sayılarında ve beş ayrı borunun pürüzlülük değerlerinde sayısal bir çalışma başlatılmıştır. Sayısal çalışmada amaç gelişen boru akışını kayma gerilmesi ve laminardan türbülansa kritik ve geçiş mesafeleri yönünden analiz etmek ve değişimlerine uygun sayısal bağıntılar türetmektir. Sayısal çalışma 2000-25000 aralığında bulunan deney Reynolds sayıları için yapılmıştır. Türbülanslı akışlarda akış içerisinde zaman ve konuma bağlı olarak gelişen türbülanslı yapıları çözmek için üç farklı sayısal yöntem bulunmaktadır. Bunlar DNS, LES ve RANS yöntemleridir. DNS yönteminde akış içerisindeki tüm türbülans yapıları doğrudan çözülür, LES yönteminde ise büyük ölçekli yapılar çözülür küçük ölçekli yapılar ise modellenir. RANS yönteminde ise tüm türbülans yapıları modellenir. DNS ve LES yüksek hesaplama maliyetleri nedeniyle boru akışları için RANS yöntem tercih edilmiştir. RANS türbülans modellerinden laminar-türbülans geçişini sağlayan SST k-omega modeli seçilmiştir. RANS çözümünden elde edilen sayısal sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmış ve çok iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Sayısal duvar kayma gerilmesi analiz edilmiş ve gelişen akış kısmındaki değişimini ifade eden sayısal bir bağıntı türetilmiştir. Laminardan türbülansa geçişte kritik ve geçiş mesafeleri analiz edilmiş ve Reynolds sayısına bağlı sayısal bağıntılar türetilmiştir. Merkezi eksenel hızın maksimum olduğu akış mesafesi incelenmiş ve Reynolds sayısına bağlı sayısal bir bağıntı türetilmiştir. Sayısal tam gelişmiş akış hız profilleri deneysel hız yasalarıyla ve başka deneysel verilerle karşılaştırılmış ve çok iyi uyum görülmüştür. RANS çözüm dışında LES ile pürüzsüz boru akışları gerçekleştirilmiştir. LES çözümün gerçek akış görşelliği yönünden RANS çözümünden farkı gösterilmiştir. LES çözüm hız yasalarıyla karşılaştırılmış ve RANS çözüme göre yüksek sapma göstermiştir. Bunun nedeni olarak LES çözüm yüksek hesaplama maliyeti gerektirdiğinden normal bir bilgisayar ile çözümünde yeterli ağ çözünürlüğüne ulaşamamıştır. Gelişen boru akışının LES ile çözümünde paralel hesaplama veya yüksek başarılı hesaplama yapılmasının gerektiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: hidrodinamik olarak gelişen boru akışları, boru girişinde gelişen akış, boru akışlarında kritik ve geçiş mesafeleri, hidrodinamik giriş mesafesi, sayısal boru akışları, boru girişinde duvar kayma gerilmesi, deneysel boru akışları

SUMMARY

To Examine Numerically And Experimentally The Laminar-Turbulence Transition Properties In Entrance And Fully Developed Flow Region

Although there are experimental relations to calculate the pressure drop in the fully developed pipe flow region, in the developing pipe flow region there are no any experimental or analytical relations. In long pipe flows, whereas the entrance effects is not important, in short pipe flows the entrance effect becomes very important. For that reason an experimental and numerical study has been established for the analysis of flow properties in the developing pipe flow region.

The aim of the experimental study is to assess different pipe sorts on roughness effects and to create a comparison ground for the numerical study. The experimental study is carried out with five different pipes manufactured from aluminium, copper, iron, galvanized and PPRC materials. Except for PPRC pipe, the others have the same diameters. This study is done for the Reynolds numbers in the range of 2000-55000. From the experimental results, the Darcy friction factor has been calculated from the fully developed pipe flow region and the roughness values of pipes has been found from the Moody diagram. When the pipe roughnesses ordered in the decreased direction; galvanised, iron, aluminium, PPRC and copper pipe values comes in sequence.

A numerical study has been established for the Reynolds numbers in the range of 2000-25000. in the experimental study. The aim of the numerical study is to analyse the wall shear stress, the critical and the transition distances for the developing pipe flow region and is to derive numerical formulas for defining them. For the solution of turbulence flows, three different numerical solution methods are used. These are DNS, LES and RANS methods. In the solution with DNS, all turbulence scales are solved temporarily and spatially, whereas in the solution with LES, large turbulence scales are solved directly, but the small scales are modeled. In the solution with RANS, all turbulence scales are modeled. Due to high computation cost required in DNS and LES, the RANS has been preferred mostly. From the RANS turbulence models, the SST k-omega model which supplies laminar-turbulence transition has been chosen for the solution of pipe flows. The obtained numerical results are compared with the experimental datas and is seen very well agreement. The numerical wall shear stress has been analysed and a numerical relation is derived for its changes along the flow. The critical and transition distances has been analysed and two numerical formulas defining their changes with the Reynolds number are derived. The distance where the centerline velocity becomes maximum has been analysed and a numerical formula is derived for the changes with Reynolds numbers. The fully developed velocity profiles are compared with wall functions and other experimental datas and has been seen very well agreement. A numerical smooth pipe flow is carried out also with LES solution. It has been seen that the flow visualisation with LES is better than RANS. Comparison of LES with experimental results has shown high deviation according to RANS solution. The reason is that a sufficient mesh resolution is not achieved due to high computation cost in LES. It is seen that the solution of developing pipe flow with LES require the usage of super computer or parallel computation.

Keywords: hydrodynamically developing pipe flows, developing flow at the pipe entrance, critical and transition distances in laminar to turbulence transition, hydrodynamic transition distance, numerical pipe flows, wall shear stress at the pipe entrance, experimental pipe flows.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Katı cidar üzerinde gelişen sınır tabaka	(8)
Şekil 1.2.	Osborne Reynolds (1842-1912)'un yaptığı deneysel boru akışında oluşan akış durumları	(8)
Şekil 1.3.	Düz yüzey üzerindeki sınır tabaka gelişimi	(10)
Şekil 1.4.	Boru girişinden itibaren hız sınır tabakasının gelişimi	(12)
Şekil 1.5.	Gelişen boru akışında çeper kayma gerilmesinin değişimi.....	(13)
Şekil 1.6.	Moody diyagramı	(16)
Şekil 1.7.	Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki anlık hızın zamana bağlı sinyalleri.....	(19)
Şekil 1.8.	Büyük ölçekli Eddylardan küçük ölçekli Eddylere doğru enerji kaskadi.....	(20)
Şekil 1.9.	Laminer ve türbülans kayma gerilmesinin akış en kesitinde dağılımları	(22)
Şekil 1.10.	Aynı serbest akım hızına sahip, cidar kısmına yakın laminar ve türbülans hız gradyanlarının karşılaştırılması	(24)
Şekil 1.11.	Tam gelişmiş boru akışında laminar ve türbülans hız profilleri.....	(25)
Şekil 1.12.	Tam gelişmiş türbülanslı boru akışında çeper yasa ve logaritmik yasanın deneysel verilerle karşılaştırılması.....	(27)
Şekil 2.1.	Türbülans enerji spektrumundaki aralıklar	(31)
Şekil 2.2.	Akışa enjekte edilen bir boyanın dağılmasında küçük ve büyük türbülans hareketlerin görselleştirilmesi	(32)
Şekil 2.3.	Sayısal üç türbülans çözme metodunun hesaplama maliyeti ve modelleme derecesi yönünden karşılaştırılması.....	(33)
Şekil 2.4.	Türbülans modelleme seviyeleri.....	(34)
Şekil 2.5.	Duvara yakın sınır tabakayı çözmek için duvar fonksiyonlarının kullanılması ve kullanılmaması halinde sınır tabakada oluşturulan düğüm noktaları (a) duvar fonksiyonları kullanıldı (b) duvar fonksiyonları kullanılmadı	(50)
Şekil 2.6.	İlk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesi	(51)
Şekil 2.6.	Logaritmik yasa ve çeper yasa ve logaritmik yasanın çakışmaları $y^+ = 11.06$ boyutsuz mesafe değeri.....	(51)
Şekil 3.1.	Deney seti.....	(58)
Şekil 3.2.	Deney borusu ve basınç prizleri arasındaki mesafeler.....	(59)
Şekil 3.3.	Demir borunun dört farklı debisi için akış boyunca statik basınç düşüş eğrileri	(64)
Şekil 3.4.	Birbirine yakın Reynolds sayılarında dört farklı boru türü için statik basınç düşüş eğrileri	(65)

Şekil 3.5.	Bakır boru için değişik Reynolds sayılarında akış boyunca basınç düşüş değerleri	(66)
Şekil 3.6.	0.2-1.7m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün ve üs fonksiyonunun Reynolds ile değişimi.....	(67)
Şekil 3.7.	Her beş boru türü için 0.2-1.7m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimleri	(68)
Şekil 3.8.	Her beş boru türü için 0.7-1.7m mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimleri	(69)
Şekil 3.9.	12000-55000 aralığındaki Reynolds sayıları için her beş boru türünün 0.7-1.7m mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün Re'ye bağlı değişimi ve bu değişime uyan Colebrook denklem eğrisi	(70)
Şekil 3.10.	Diferansiyel boyuttaki boru akışında basınç ve kayma gerilmesinin gösterimi	(72)
Şekil 3.11.	Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında 0.3m, 0.5m ve 1.7m mesafelerinde okunan statik basınç değerlerinin zamana bağlı değişim eğrileri	(74)
Şekil 3.12.	Alüminyum boru için dört ayrı Reynolds sayısında birinci basınç prizinden okunan basınç çalkantı değerlerinin zamana bağlı değişimleri.....	(77)
Şekil 3.13.	Beş ayrı boruda statik basınç çalkantı ortalama RMS değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri	(80)
Şekil 4.1.	Ansys Workbench projelendirme penceresi.....	(87)
Şekil 4.2.	Ağ elemanlarını oluşturan üç boyutlu geometrik şekiller	(87)
Şekil 4.3.	İki boyutlu yüzeysel ağ oluşturan elemanlarının çarpık durumları	(89)
Şekil 4.4.	Dikdörtgen ve üçgen elemanlarda "aspect ratio" değeri.....	(89)
Şekil 4.5.	derecelik boru geometrisinde oluşturulan ağın yapısı	(90)
Şekil 4.6.	Akış geometrisi yüzeyleri	(91)
Şekil 4.7.	Ağ oluşturma programında inflasyon detay penceresi ve duvara yakın oluşturulan inflasyon katmanları	(92)
Şekil 4.8.	Boru boyunca olan boyutsuz duvar mesafe değerleri.....	(93)
Şekil 4.9.	Ağ oluşturma programında sweep metodun detay penceresi.....	(94)
Şekil 4.10.	Ağın detayları penceresi.....	(94)
Şekil 4.11.	Akış yüzey alanlarında oluşturulan ağ elemanları.....	(95)
Şekil 4.12.	Ağ geometrisinde oluşan altıyüzlü prizma (hex) ve beş yüzlü prizma(wedge) elemanları.....	(95)
Şekil 4.13.	Ağ detaylarında istatistik değerleri	(96)
Şekil 4.14.	Ağ oluşturma programında skewness değerinin eleman sayısına ve türüne göre dağılımı.....	(96)

Şekil 4.15. 0.92 skewness değerine sahip elemanların geometrideki konumları ve üçgen yüzey görüntüleri	(97)
Şekil 4.16. Ağdan bağımsız çalışma, sırasıyla eksenel hız, statik basınç düşüşü, akış en kesit hız dağılımı.....	(97)
Şekil 4.17. Alüminyum boru akışında sınır şartları ve başlatma değerleri; giriş sınır şartı (a), çıkış sınır şartı (b) duvar sınır şartı (c), simetri sınır şartı (d), başlatma değerleri (e)	(100)
Şekil 4.18. CFX-Pre programında seçilen SST-Transitional Turbulence Modeli	(102)
Şekil 4.19. Basınç-kütle ve momentum denklemlerinin iterasyon sayısına bağlı RMS değişimleri.....	(103)
Şekil 4.20. Boru çıkışına yakın monitor noktasında hızın yakınsama eğrisi	(104)
Şekil 4.21. CFX-Pre programında oluşturulan boru akış modeli ve sınır şartları.....	(104)
Şekil 5.1. Alüminyum boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması.....	(109)
Şekil 5.2. Bakır boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin	(110)
Şekil 5.3. Demir boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması.....	(110)
Şekil 5.4. Galvanizli boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerini karşılaştırılması.....	(111)
Şekil 5.5. PPRC boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerini karşılaştırılması.....	(111)
Şekil 5.6. Boru boyunca Darcy sürtünme faktörünün sayısal değişim eğrisi ve akış bölgeleri	(113)
Şekil 5.7 Değişik Reynolds sayılarında demir deney borusu için Darcy sürtünme faktörünün akış boyunca değişimi.....	(114)
Şekil 5.8. Beş deney borusunda Darcy sürtünme faktörü sayısal değerlerinin sayısına bağlı değişimleri.....	(114)
Şekil 5.9 Beş ayrı boru çalışmasında 0.2-1.7m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün sayısal ve deney değerlerin Colebrook denklem eğrisiyle karşılaştırılması.....	(115)
Şekil 5.10. Sayısal alüminyum boru akışında boru duvarı boyunca kayma gerilmesinin değişimi	(118)
Şekil 5.11 Alüminyum boru sayısal çalışmasında değişik Reynolds sayılarındaki duvar kayma gerilmesinin boru duvarı boyunca değişimi.....	(119)
Şekil 5.12. Alüminyum boruda gelişen akış kısmı için duvar kayma gerilmesi sayısal değerlerinin denklem (5.4) ile tahmin edilmesi.....	(120)
Şekil 5.13. 8000 Reynolds sayılı akışlarda beş farklı borunun sayısal kayma gerilmesi verilerinin denklem (5.4) ile tahmin edilmesi	(121)

Şekil 5.14. Boru akışında eksenel hız değişimi.....	(125)
Şekil 5.15. Farklı Reynolds sayılarında merkezi eksenel hızın akış boyunca değişimi ..	(126)
Şekil 5.16. Eksenel hız ve duvar kayma gerilmesi değişim eğrilerinin karşılaştırılması	(127)
Şekil 5.17. Beş ayrı deney borusunun sayısal X_{kr} değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimler	(128)
Şekil 5.18. Beş farklı borunun sayısal çalışmasında Reynolds sayısına bağlı $X_{gç}$ değerleri	(129)
Şekil 5.19. $X_{kr}/(\epsilon/D)$ sayısal değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri.....	(131)
Şekil 5.20. Boyutsuz X_{kr}/D değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri.....	(132)
Şekil 5.21. Reynolds sayısına bağlı X_{kr}/D sayısal değerlerinin Denklem (5.10) tahmin edilmesi	(133)
Şekil 5.22. Bağlı pürüzlülükleri aynı olan farklı çaptaki iki boru akışının kritik değerleri	(134)
Şekil 5.23. Bağlı pürüzlülükleri aynı çapları farklı üç boru akışının kritik değerleri.....	(134)
Şekil 5.24. Farklı pürüzlülükteki borularda $X_{gç}$ mesafelerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri.....	(136)
Şekil 5.25. $C_{(ε,D)} \times X_{gç}$ değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri.....	(136)
Şekil 5.26. Demir boru $X_{gç}/D$ sayısal değerlerinin Denklem (5.11) ve Denklem (5.12) ile tahmin edilmesi	(137)
Şekil 5.27. Eksenel merkezi düzlem üzerinde gelişen hızın renk kontörleri ile gösterilmesi.....	(139)
Şekil 5.28. Borunun değişik mesafelerinde, en-kesit hız dağılımının renk kontörleriyle gösterilmesi	(140)
Şekil 5.29. Borunun değişik mesafelerinde alınan hız dağılım vektörleri	(140)
Şekil 5.30. Akış en kesitinde üç boyutlu hız dağılım vektörleri.....	(141)
Şekil 5.31. $Re=5539$ sayılı alüminyum boru akışında değişik mesafelerde alınan hız profilleri	(141)
Şekil 5.32. $Re=5539$ sayılı alüminyum boru akışında hız profilleri (a) $x=0-0.6m$ mesafelerdeki hız profilleri (b) $x=0.6-1.8m$ mesafelerdeki hız profilleri	(143)
Şekil 5.33. Alüminyum boru sayısal çalışmasında boyutsuz hız profillerinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması.....	(144)
Şekil 5.34. 8000 Reynolds sayılı akışta beş farklı borunun sayısal boyutsuz hız profilinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması.....	(145)
Şekil 5.35. Üç farklı Reynolds sayılı akışta sayısal boyutsuz hız profillerinin T. Taishi ve arkadaşları [5] ve C. W. H. van Doorne and J. Westerweel'in [34] deneysel hız profilleriyle karşılaştırılması	(148)
Şekil 5.36. Türbülanslı boru akışında merkezi eksenel hız değişimi	(149)
Şekil 5.37. Maksimum eksenel hız için X_{mak}/D değerlerinin Re 'ye göre değişimi.....	(150)

Şekil 5.38.	Merkezi eksenel hızın maksimum olduğu X_{mak}/D değerlerinin Denklem (5.22) ile tahmin edilmesi	(151)
Şekil 6.1.	Akış geometrisini oluşturan ağın yapısı.....	(156)
Şekil 6.2.	Ağ oluşturma için sweep metodu ve inflasyon detayları.....	(157)
Şekil 6.3.	Akışın genel durumunu gösterir pencere	(158)
Şekil 6.4.	Akış oluşmasını sağlayan sınır şartı detayları	(159)
Şekil 6.5.	$x=0-1.3m$ aralığında anlık akım yönlü hızın renk kontörleriyle gösterilmesi.....	(163)
Şekil 6.6.	$x=1.25m$ mesafede bulunan en kesitte anlık akım yönlü hız dağılımının renk kontörüyle gösterilmesi.....	(163)
Şekil 6.7.	RANS ve LES boru akışı çözümünde anlık hız dağılımları	(163)
Şekil 6.8.	$x=1.25m$ mesafede alınan en kesitteki anlık akım yönlü hız dağılımları	(164)
Şekil 6.9.	(a) anlık akım yönlü hızın vektörlerle gösterilmesi, (b) duvara yakın akım yönlü hızın vektörel dağılımı	(165)
Şekil 6.10.	Boru akışının giriş ve çıkışındaki anlık hız kontörleri.....	(165)
Şekil 6.11.	Anlık statik basıncın boru cidarında (a) ve akış en kesitindeki (b) dağılımı renk kontörleriyle gösterilmesi.....	(166)
Şekil 6.12.	RANS ve LES çözümünde zamana bağlı statik basınç değişimi	(166)
Şekil 6.13.	Akış boyunca akım çizgileri.....	(167)
Şekil 6.14.	Akış boyunca oluşan türbülans çalkantıları	(167)
Şekil 6.15.	Sayısal LES ve bakır boru deney değerlerinin statik basınç düşüşü yönünden karşılaştırılması.....	(169)
Şekil 6.16.	Pürüzsüz borularda LES ve Colebrook sürtünme faktörlerinin karşılaştırılması.....	(170)
Şekil 6.17.	LES ve RANS çözümlerde Merkezi eksenel hızın değişimi.....	(170)
Şekil 6.18.	İki farklı Reynolds sayısında LES ve RANS hızlarının karşılaştırılması	(171)
Şekil 6.19.	Boyutsuz hız dağılımı yönünden LES ve RANS sayısal değerlerinin çeper yasası ve logaritmik yasa değerleriyle karşılaştırılması.....	(172)
Şekil 6.20.	$Re=15842$ sayılı boru akışında anlık akım yönlü hız değerlerinin zamana bağlı değişimleri (a) $x=0.2m$ deki, (b) $x=0.5m$ 'deki (c), $x=1.28m$ 'deki hız değerleri.....	(174)
Şekil 6.21.	u' , v' , w' çalkantı hız bileşenlerinin merkezi eksen boyunca RMS değişim değerleri	(175)
Şekil 6.22.	u' , v' , w' çalkantı hızlarının RMS değerlerinin çapsal yöndeki değişimi	(176)
Şekil 6.23.	$Re=15842$ sayılı akışta boru iç duvarına etki eden anlık statik basınç değerlerinin zamana bağlı değişimleri (a) $x=0.2m$ 'deki monitor noktası (b) $x=1.28m$ 'deki monitor noktası	(177)
Şekil 6.24.	Reynolds gerilmeleri RMS değerlerinin radyal yöndeki değişimleri.....	(178)

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Deneyde kullanılan boruların teknik özellikleri.....	(60)
Tablo 3.2. Alüminyum boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri.....	(62)
Tablo 3.3. Bakır boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri.....	(62)
Tablo 3.4. Demir boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri.....	(63)
Tablo 3.5. Galvanizli boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri.....	(63)
Tablo 3.6. PPRC boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri.....	(63)
Tablo 3.7. Beş farklı boru türü için Moody diyagramından bulunan pürüzlülük değerleri	(71)
Tablo 3.8. Moody diyagramından aynı malzemeden borular için verilen pürüzlülük değerlerinin deney borusu pürüzlülük değerleriyle karşılaştırılması.....	(71)
Tablo 3.9. Boruların en yüksek Reynolds sayılarında hesaplanan boyutsuz pürüzlülük değerleri	(72)
Tablo 3.10. Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında zamana bağlı okunan basınç değerleri	(73)
Tablo 3.11. Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında anlık basınç değerlerinin ortalama basınç değerinden mutlak sapma değerleri.....	(75)
Tablo 3.12. Alüminyum boru için değişik Reynolds sayılarında anlık basınç çalkantı değerleri	(76)
Tablo 3.13. Alüminyum boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri	(78)
Tablo 3.14. Bakır boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri	(78)
Tablo 3.15. Demir boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri.....	(78)
Tablo 3.16. Galvanizli boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri.....	(79)
Tablo 3.17. PPRC boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri	(79)
Tablo 3.18. Beş boru türü için hesaplanan basınç çalkantılarının genel ortalama RMS değerleri.....	(80)
Tablo 4.1. Skewness değerine göre ağ elemanlarının kalitesi	(89)
Tablo 5.1. Alüminyum sayısal boru çalışmasında statik basınç değerleri.....	(107)
Tablo 5.2. Bakır sayısal boru çalışmasında statik basınç değerleri.....	(107)
Tablo 5.3. Demir sayısal boru çalışmasında statik basınç değerleri	(108)
Tablo 5.4. Galvaniz sayısal boru çalışmasında statik basınç değerleri	(108)
Tablo 5.5. PPRC sayısal boru çalışmasında statik basınç değerleri.....	(109)

Tablo 5.6.	0.2m-1.7m arasındaki hesaplanan sayısal statik basınç farkının deney farkından maksimum ve ortalama yüzde sapması.....	(112)
Tablo 5.7.	Darcy sürtünme faktörü sayısal değerlerinin deney değerlerinden sapma yüzdeleri.....	(116)
Tablo 5.8.	Beş ayrı boru çalışmasında denklem (5.4) ile hesaplanan duvar kayma gerilmesi değerlerinin sayısal verilerinden sapma yüzdesi.....	(122)
Tablo 5.9.	Denklem (5.4) de bulunan a ve b sabitlerinin her boru çalışması için uygun olan değerleri	(123)
Tablo 5.10	Beş farklı boru türünün farklı Reynolds sayılarındaki sayısal kritik ve geçiş mesafe değerleri	(128)
Tablo 5.11.	Her beş boru türü için hesaplanan kritik ve geçiş Reynolds sayı değerleri	(130)
Tablo 5.12.	Beş ayrı deney borusunun bağıl pürüzlülük değerleri	(131)
Tablo 5.13.	Beş farklı borunun sayısal çalışmasından çıkarılan $X_{gç}$ (m) değerleri.....	(135)
Tablo 5.14.	Sayısal bağıntılardan elde edilen $X_{gç} / D$ değerlerinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması	(138)
Tablo 5.15.	Deneysel bağıntıların sayısal değerlerden genel ortalama sapma yüzdeleri	(146)
Tablo 5.16.	T. Taishi ve arkadaşlarının [34] deney çalışmalarında kullanılan boru geometrisi akış ve akışkan özellikleri	(147)
Tablo 5.17.	C. W. H. van Doorne and J. Westerweel'in [5] deney çalışmasında kullanılan boru geometrisi, akış şartları ve akışkan özellikleri.....	(148)
Tablo 5.18.	Merkezi eksenel hızın maksimum olduğu X_{mak} / D değerleri	(150)
Tablo 6.1.	LES, RANS ve deney boru akışlarında $x=0.2m-1.3m$ arasındaki statik basınç	(168)
Tablo 11.1.	Alüminyum boru deney değerleri.....	(201)
Tablo 11.2.	Bakır boru deney değerleri.....	(204)
Tablo 11.3.	Demir boru deney değerleri.....	(209)
Tablo 11.4.	Galvanizli boru deney değerleri	(213)
Tablo 11.5.	PPRC boru deney değerleri.....	(217)
Tablo 11.6.	Deneysel alüminyum boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....	(221)
Tablo 11.7.	Deneysel bakır boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....	(221)
Tablo 11.8.	Deneysel demir boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....	(222)
Tablo 11.9.	Deneysel galvanizli boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....	(22)
Tablo 11.10.	Deneysel PPRC boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....	(222)

SEMBOLLER LİSTESİ

KISALTMALAR

DNS	: Direct Numerical Simulation (Doğrudan Sayısal Simulasyon)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Eddy Simulasyonu)
PPRC	: Polipropilen Random Copolimer, plastik boru
RMS	: Root Mean Square (ortalama karekök)
SST	: Shear Stress Transport (kayma gerilmesi taşınımı)
SGS	: Subgrid-Scale (alt ağ ölçeği)
bkn	: bakınız

SEMBOLLER

A	: alan, m^2
a,b	: denklem (5.4) 'teki değişkenler
C	: Courant sayısı
C_s	: Smagorinsky sabiti
D	: boru çapı, m
D_H	: hidrolik çap, m
f	: Darcy sürtünme faktörü
g	: yerçekim ivmesi, m/s^2
I	: türbülans yoğunluğu
k	: türbülans kinetik enerjisi, $kg\ m^2/s^2$
L	: boru uzunluğu, m
l	: en büyük türbülans ölçek uzunluğu, m
m	: kütle, kg
m'	: kütleli debi, kg/s
P	: basınç, Pa
P'	: anlık basınç çalkantı değeri, Pa
P'_{RMS}	: anlık basınç çalkantı RMS değeri, Pa
$\bar{P}$	: zaman ortalamalı basınç değeri, Pa
ΔP	: basınç farkı, Pa
Re	: Reynolds sayısı
Re_D	: boru akışında Reynolds sayısı
Re_x	: plaka üzerinden akışta Reynolds sayısı
Re_{krt}	: laminardan türbülansa geçiş kritik Reynolds sayısı
$Re_{gç}$	: Tam gelişmiş türbülanslı akışta geçiş Reynolds sayısı
Re_θ	: momentum kalınlık Reynolds sayısı
T	: sıcaklık, $^{\circ}C$
t	: zaman, s
Δt	: zaman adımı
u, v ve w	: sırasıyla x, y ve z yönlerindeki anlık hız bileşenleri, m/s
u', v', w'	: sırasıyla x, y ve z yönlerindeki anlık hız çalkantı bileşenleri, m/s
u'_{RMS}	: çalkantı hız bileşeni RMS değerleri, m/s

$\bar{u}$	: zaman ortalamalı akış hızı, m/s
U	: ortalama akış hızı, m/s
u^*	: sürtünme hızı, m/s
u^+	: boyutsuz hız
u_t	: en büyük türbülans hız ölçęi
ν	: kinematik viskozite, m ² /s
X_{kr}	: laminardan türbülansa geçişte kritik mesafe, m
$X_{gç}$	: türbülanslı boru akışında hidrodinamik gelişme mesafesi, m
$X_{gç, laminar}$	: laminar boru akışında hidrodinamik gelişme mesafesi, m
X_{mak}	: merkezi eksenel hızın maksimum olduğu akış mesafesi, m
x	: akış yönündeki mesafe, m
$w(x)$	: x değişkenin belirsizliği
y^+, z^+, x^+	: sırasıyla boyutsuz duvar, açısız ve akış yönlü mesafeler
ρ	: akışkan yoğunluğu, kg/m ³
η	: kolmogorov ölçü, en küçük türbülans ölçęi
κ	: von karman sabiti
μ	: akışkan viskozitesi, kg/m.s
μ_t	: türbülans viskozitesi, kg/m.s
μ_{sgs}	: sgs viskozitesi, kg/m.s
τ	: kayma gerilmesi, Pa
τ_d	: duvar kayma gerilmesi, Pa
τ_{lam}	: laminar kayma gerilmesi, Pa
$\tau_{türb}$	: türbülans kayma gerilmesi, Pa
ε	: pürüzlülük yüksekliği
ε^+	: boyutsuz pürüzsüzlük
ε'	: türbülans kinetik enerji yayılma oranı
ω	: türbülans frekansı
Φ	: değişken

alt indisler

d	: duvar
D	: deney
$gç$	: geçiş
krt	: kritik
lam	: laminar
mak	: maksimum
$türb$	: türbülans
S	: sayısal
RMS	: Root Mean Square, ortalama karekök

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Akışkanlar fiziksel halleri nedeniyle açık kanallar, dairesel ve dairesel olmayan borular içerisinde rahatlıkla taşınabilmektedir. Bu durum akışkanların taşınmasında büyük bir kolaylık sağlar. Örneğin şehirlerdeki içme suyu boru şebekesi ile göl ve barajlardan evlere kadar taşınır ve aynı zamanda evlerde biriken pis sular da boru şebekesiyle şehirden uzaklaştırılır. Petrol ve doğalgaz çıkarıldıkları yerden başka ülkelere genellikle borular vasıtası ile taşınır. Yine çoğu ısıtma ve soğutma işlemleri akışkanların boru ve kanal içerisinde taşınmasıyla gerçekleşmektedir. Bu gibi taşıma sistemlerinde akışkanları akmaya zorlayan makineler pompalar, fanlar ve kompresörlerdir. Bu makinelerin verimli bir şekilde taşıma sistemlerinde kullanılabilmeleri için güç hesaplamalarının doğru yapılması gerekir.

Çoğu akışkan, özellikle de sıvılar dairesel borularla taşınır. Boru akışlarında basınç düşüşü ile doğrudan ilişkili olan sürtünmeye ayrı bir önem vermek gerekir. Çünkü bu basınç düşüşü pompalama gücü ihtiyacını belirlemek için kullanılır.

Deneysel çalışmalar tamamıyla farklı iki akış türünün oluştuğunu göstermiştir. Osborne Reynolds (1842-1912) boru içi akışa mürekkep enjekte ederek değişik akış hızlarında akışı incelemiştir. Düşük akış hızlarında mürekkebin akış çizgisi olarak yol aldığını, akışa karışmadığını gözlemlemiş ve bu akış türüne laminar akış demiştir. Belirli bir kritik değer üzerindeki akış hızlarında ise mürekkebin akış çizgisi olarak yol almayıp akışa tamamen dağıldığını gözlemlemiş ve bu akış türüne türbülanslı akış demiştir. Bir borudan akan akışkanın akış hızı arttırıldığında, laminardan türbülansa olan geçişin niçin görüldüğü yüzyıldan beri hidrodinamik kararlılığın göze çarpan problemi olmuştur. Bu sorun bilim ve mühendisliğin derin ilgisindedir, çünkü çoğu boru akışları pratikte hatta makul akış oranlarında türbülanslıdır.

Daimi laminar akışlarda belirli bir noktadaki hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi akış özellikleri zamanla değişmezken daimi türbülanslı akışlarda ise çalkantılardan dolayı akış özellikleri dalgalı değerler izler. Laminar akışta basınç kaybı ve ısı geçişi az olurken türbülanslı akışta çalkantılar nedeniyle ısı geçişi ve basınç kaybı artmaktadır. Türbülanslı

akışlar basınç kaybı yönünden olumsuz bir etkiye sahipken ısı geçişi yönünden ise bazı ısı transfer işlemlerinde olumlu etkilere sahip olmaktadır.

Borulama sistemlerindeki enerji kayıpları yerel kayıplar ve boru içi sürtünme kayıpları olmaktadır. Yerel kayıplar borulama sistemlerinde düz boru dışında tesisat elemanlarından kaynaklı basınç kayıplarıdır. Boru içi akışta sürtünme kayıpları statik basınç düşüşüne neden olur. Düz borudaki bu basınç düşüşü, tam gelişmiş boru akışlarına uygulanabilen deneysel bağıntılarla tahmini olarak hesaplanabilmektedir.

Boru girişinde hemen tam gelişmiş akış şartları oluşmaz bu nedenle boru akışı geçiş bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgesi olmak üzere iki akış kısıma ayrılır. Tam gelişmiş akış bölgesi için kullanılan bağıntılar geçiş bölgesi için geçerli olmamaktadır. Boru girişinden geçiş bölgesine kadar olan mesafeye hidrodinamik giriş uzunluğu denir. Giriş uzunluğu ile ilgili literatürde çeşitli bağıntılar olmasına rağmen, özellikle geçiş ve türbülanslı akışlar için, hala tam olarak çözümlenebilmiş değildir.

Giriş uzunluğu dışında geçişli akışlarda kritik uzunluk tanımlanmaktadır. Kritik geçiş uzunluğu, girişten akışa şırınga edilen renkli boya ipliğinin ana akışa dik olarak salınmaya başladığı noktaya kadar olan mesafeye denir. Bir kritik geçiş Reynolds sayısı, geçiş akışının yer aldığı bir Reynolds sayısıdır ve aynı giriş ve deney koşullarında geniş bir değer aralığına sahip olmaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında amaç, boru girişinde gelişen akışta statik basınç düşüşünü, laminardan türbülansa kritik mesafesini ve hidrodinamik giriş mesafesini deneysel ve sayısal olarak incelemek ve bunun sonucunda deneysel veya sayısal bağıntılar türetmeye çalışmaktır. Bu bağıntılar

1.2. Literatür Araştırması

Boru içi akışlarla ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların en önemlilerinden biri, cam boru içerisindeki akışa boya enjekte ederek laminar, geçiş ve türbülanslı akış rejimlerinin varlığını gösteren Osborne Reynolds'un (1842-1912) çalışmalarıdır. Darcy-Weisbach sürtünme faktörünün geliştirilmesinde büyük katkı sağlayan Henry Darcy ve Julius Weisbach'ın çalışmaları da bu konudaki en önemli çalışmalardan biridir. G. Hagen ve J. Poiseuille çalışmalarında, Hagen-Poiseuille akışı olarak adlandırılan debi ile basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi veren denklemleri bulmuşlardır.

Nikuradse [26] gerçekleştirdiği deneyler sonucunda, değişik pürüzlüğe sahip borularda sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki ilişkiyi elde etmiştir. Colebrook [4] pürüzsüz ve pürüzlü borularda geçiş ve türbülanslı akışlar için mevcut verileri birleştirerek Colebrook denklemini elde etmiştir. Hunter Rouse ve iki yıl sonra Moody [43] sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki ilişkiyi veren diyagramı çizmişlerdir. Moody diyagramı ve Colebrook denklemi deneysel hataların büyüklüğü sebebiyle ancak yüzde 15'lik bir sapma ile kullanılabilir. Bhatti ve Shah [19], hidrodinamik geçiş uzunlukları ile ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır.

Kanda ve Oshima [11] dairesel boru akışı için giriş ve geçiş uzunluğu üstüne sayısal bir çalışma yapmışlardır. 2700 ile 10000 aralığındaki geçiş Reynolds sayılarında çalışmışlardır. Bu çalışmada simetrik çalkantılar boru cidarında ve girişe yakın noktalarda akışa yüklenmiştir. Geçiş uzunluğu sayısal simülasyon ile doğru bir şekilde tahmin edilmiş ve şu sonuçlar çıkarılmıştır. Türbülansa geçiş, sadece giriş bölgesinde oluşur. Aynı giriş koşullarında Reynolds sayısı artırıldığında geçiş uzunluğu azalır. İyi bir konik ağız girişte çalkantıları azaltır ve sonucunda kritik Reynolds sayısı daha büyük olur. Geçiş uzunluğu çalkantı miktarına bağlıdır.

Shan ve diğerleri [12] 2000 ile 10000 aralığındaki Reynolds sayılarında rastgele dağılmış ve düzgün dağılmış boru pürüzlüğünün laminar-türbülans geçişteki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Burada, boru cidarındaki düzgün ve rastgele dağılmış pürüzlü elemanlar yerine, boru çeperinden periyodik emme/üfleme (PEÜ) ve rastgele emme/üfleme (REÜ) ile çalkantılar akışa yüklenmiştir. PEÜ çalkantıların eksenel simetrik dağılımında ve hatta büyük genliklerinde akışın kararlı olduğu fakat eksenel simetrik olmayan dağılımlarında ise akışın kararsız olduğu görülmüştür. Çalkantıların tam gelişmiş türbülanslı akışı oluşturacak şekilde gelişmelerindeki geçiş zamanının Reynolds sayısına ve cidar çalkantı genliğine bağlı olduğu görülmüştür. REÜ çalkantılarının ise çok çabuk gelişmeleri dışında eksenel simetrik olmayan dağılımdaki PEÜ'lerle aynı oldukları görülmüştür. REÜ geçişsel zamanı PEÜ'ye karşılık daha kısa olmuştur.

Satish ve Campbell [35] çalışmalarında iç çapı 1.9 cm olan bir boru akışında giriş geometrisinin basınç düşüşüne ve türbülans geçişine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Dört farklı giriş akışı ile kapalı çevrimdeki yağ akışı dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma giriş şartlarının yerel sürtünme faktörü, hidrodinamik giriş uzunluğu ve geçiş Reynolds sayısı üzerine olan etkisini göstermiştir. Giriş şartları; düz boru girişi ve koniksel boru girişi ve bunlarla birlikte giriş kısmında boğaza takılıp çıkarılabilen bir türbülator ile

dört farklı şekilde giriş şartı oluşturulmuştur. Türbülator şiddetli akış çalkantıları oluşturmak içindir. Burada 1215 ile 3353 Reynolds sayı aralığında akış özellikleri incelenmiştir.

Chen ve diğerleri [24] pürüzsüz bir boru akışında geçiş işlemini küçük dış çalkantılar yaratarak sayısal yöntemle incelemişlerdir. 3000 Reynolds sayısında emme/üfleme ile boru girişinde periyodik çalkantılar oluşturulmuştur. Bu çalkantıların boyutsal gelişimi pseudo-spectrum element metodu ile simule edilmiştir. Geçiş işlemi şöyle özetlenmiştir: boru girişinde akışa yüklenen çalkantı uzun bir boru mesafesine kadar yavaş geliştikten sonra, dar bir bölgede çok hızlı gelişir ve ondan sonra aşağı akımda çalkantı enerjisi büyük bir alana yayılarak akışı türbülanslı yapar. Sayısal analizde, çalkantıların ilk yavaş gelişmelerinde, sonra çok hızlı gelişmelerinde ve en sonunda türbülansa geçişlerinde zaman adımı akış boyunca azaltılarak küçük çalkantıların da simule edilmesini sağlamıştır. Yeteri uzunlukta boru seçildiğinde geçişsel akışın tam olarak analiz edildiği vurgulanmıştır.

Celata ve diğerleri [8] kılcal boru akışları ve tek fazlı ısı transfer araştırmalarına genel bir bakış sağlamışlardır. Farklı araştırmacılar tarafından çıkarılan sonuçlar içerisindeki tutarsızlıkları aydınlatmak için laminar ve laminar-türbülans geçişini detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Deneysel çalışma laminar akış rejimindeki sürtünme faktörünün (f) 600-800 Reynolds sayılarının altındaki değerlerinde Hagen-Poiseuille teorisi ile uyum içinde olduğunu ve daha yüksek Reynolds sayılarında ise deneysel verilerin Hagen-Poiseuille teorisinden daha yüksek (f) değerleri tarafına saptığı görülmüştür. Laminardan türbülansa geçişin 1800-2500 Reynolds sayı aralığında olduğu ve bu geçişin ticari pürüzlü borular-daki geçiş akışı ile uyumlu olduğu bulunmuştur.

Peixinho ve Mullin [30] çalışmalarında sabit kütle akılı boru akışında türbülansa geçişte sonlu genliklerin eşiklerini 1000-10000 aralığındaki Reynolds sayılarında deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde 20mm çapında ve 15.74 m uzunluğunda boru kullanılmıştır. Boru cidarında açılan deliklerden küçük itici jetlerle ve emme-üfleme çalkantıları ile akış bozguna uğratılmıştır. Geçişe neden olan kritik genlik, jetler için Re^{-1} ile orantılı ve emme-üfleme çalkantıları için de $Re^{-1.3}$ veya $Re^{-1.5}$ ile orantılı ölçülmüştür.

Doherty ve diğerleri [25] boru akışlarında düzgün giriş şartlarından tam gelişmiş türbülanslı akış şartlarına kadar akışın detaylı analizini yapmak ve tam gelişmiş akışı oluşturan nedenin doğru tanımlamasını yapmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırma büyük ölçekli yapıların gelişmelerini ve akışın tam gelişmiş duruma gelmesindeki rollerinin etkisini araştırmak için yapılmıştır. Deneysel sonuçlar 10^5 ve 2×10^5 değerlerindeki iki

Reynolds sayısı için elde edilmiştir. Ortalama hız profilinin yaklaşık 50D üzeri gelişmelerden sonra her iki Reynolds sayısı için de değişimsiz olduğu, yani tam gelişmiş akışın başladığı görülmüştür. Aynı zamanda akış gelişmesi yüksek derecedeki istatistiklerle yapıldığında yaklaşık 80D mesafeden itibaren tam gelişmiş akış şartların başladığı görülmüştür. Büyük ölçekli akış yapıları yavaş gelişmekte ve daha erken oluştuğu düşünülen tam gelişmiş akış noktasından sonrada da gelişmeleri devam etmektedir. Bunun için tam gelişmiş akış şartlarının tanımlanması ortalama hız profilinden çok, büyük ölçekli yapıların gelişmesi üzerine kurulması gerektiği önerilmiştir.

Shimomukai ve Kanda [15] çalışmalarında 500 ile 10000 aralığındaki Reynolds sayılarında boru girişindeki akış gelişmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Basınç dağılımı ve akış karakteristiği, özellikle cidar civarındaki girdabın etkisi, analiz edilmiştir. 21x21 den 201x201 kadar değişen ağ sistemi, hız gelişimi, giriş uzunluğu ve aşırı basınç düşümünün hesaplanmasında yeterli olduğu ve sonuçların önceki araştırmacıların değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla beraber, radyal basınç değişiminin bu gibi ağlarla incelenemediği ve iyileştirilmiş ağ ile hesaplanabildiği belirtilmiştir. Boru girişinde $Re \leq 5000$ için merkezi basınç (P_m) ve cidar basıncı (P_d) arasında önemli bir fark olduğu ve radyal yönde bu basınç değişiminin normal cidar gerilmelerinin (girdap çevrintisinin normal bileşeninin) bir sonucu olduğu belirtilmiştir. Bu sonucun sınır tabaka teorisiyle ve Bernoulli denklemiyle uyuşmadığı belirtilmiştir.

Asen ve diğerleri [31], Peixinho ve Mullin [30] 'nin deneysel çalışmalarında türbülansı tetiklemede etkili olduğu söylenen bir çalkantının doğrudan sayısal simülasyonunu (DNS) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı uygulanan emme ve üfleminin niçin tetiklemede çok verimli olduğunun araştırılmasında DNS'nin nasıl kullanılabildiğini göstermek olmuştur. Deney çalışmasında, 2000-3000 aralığındaki Reynolds sayılarından bağımsız, her biri boru yarıçapı büyüklüğüne sahip ve at nalı şeklinde oluşumu görülen yapıların DNS çalışmasında da boru yarıçapı büyüklüğündeki yapıların aynı şekilde oluştukları görülmüştür. DNS çalışması 5000 Reynolds sayısında yapılmıştır. Türbülansı tetikleyen kritik çalkantı genliğinin, çalkantı oluşum şekline ve yerleştirme biçimlerine bağlı olduğu görülmüştür. Çalışmada, 5000 Reynolds sayısında ve 30D boru uzunluğunda akış görselleştirmesi yapılmıştır.

Bu tez konusunun amacı, düşük Reynolds sayılarında (2000-25000 Reynolds sayı aralığı), boru girişinde gelişen akışı deneysel ve sayısal olarak analiz etmek ve çıkan sonuçları giriş uzunluğu ve kayma gerilmesi için formülize etmeye çalışmak olacaktır.

Literatürde görüldüğü gibi yapılan çalışmalar daha çok laminardan türbülansa geçişin nedeni üzerinde durulmuş fakat basınç düşüşü ve geçiş uzunlukları ile ilgili çalışmalara pek yer verilmediği görülmüştür. Bu nedenle boru girişinde basınç düşüşünü ve hidrodinamik giriş uzunluğunu hesaplamaya yönelik bu tez konusu seçilmiştir.

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda, değişik pürüzlülüğe sahip borularla boru girişinde gelişen akış özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda statik basınç düşüşü, giriş uzunluğu, sürtünme faktörü, eksenel hız profili ve duvar kayma gerilmesi gibi akış özellikleri incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda akışın sadece statik basınç düşüşü ölçülmüştür. Deneysel ölçümler yapılırken türbülans basınç çalkantıları da dikkate alınmış, hem belirli bir sürede ölçülen basınç çalkantıları, hem de bunların zaman ortalamaları grafik halinde verilmiştir. Ayrıca, tam gelişmiş akış bölgesinde iki mesafe arasındaki zaman ortalamalı basınç farkı değerlerinden yola çıkarak Darcy sürtünme faktörü (f) hesaplanmış ve Reynolds sayısı ile değişimi, her boru türü için, grafik olarak analiz edilmiştir.

Sayısal çalışmalar da deneysel çalışma paralelinde yapılmış ve çıkan sonuçlar deney değerleriyle ve başka deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarla uyumlu çıkan sayısal sonuçlar değerlendirilmeye alınmış ve gelişen boru akışı duvar kayma gerilmesi, giriş uzunluğu ve eksenel hız değişimi yönünden analiz edilmiştir.

1.3. Akış ve Akışkan Özellikleri

Akışkanlar Mekaniği akışkanların durağan haldeki (akışkan statik) ve hareket halindeki (akışkan dinamik) davranışları ve yine akışkanların diğer akışkanlar ve katı cisimlerle oluşturdukları sınır etkileşimlerindeki davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır.

Uygulamada sıkıştırılamaz (yoğunluğu değişmeyen) kabul edilen akışkanların (sıvılar, su ve düşük hızlarda akan gazlar) hareketi ile ilgili çalışmalar genellikle hidrodinamik olarak sınıflandırılır. Hidrodinamiğin alt dalı olan hidrolik, sıvıların boru ve açık kanallardaki akışı ile ilgilidir. Tez konusu hidrolikle ilgili olduğu için bundan sonra sadece sıkıştırılamaz akışlarla ilgilenilecektir.

1.3.1. Basınç

Akışkanlar içinde bulunduğu hacmin yüzeylerine veya aktığı yüzey üzerine daimi kuvvet uygularlar. Birim alana uygulanan bu kuvvetlere akışkan basıncı denir. Basınç birimi alana gelen kuvvet olarak tanımlandığından, N/m^2 birimine pascal (Pa) denilmiştir.

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

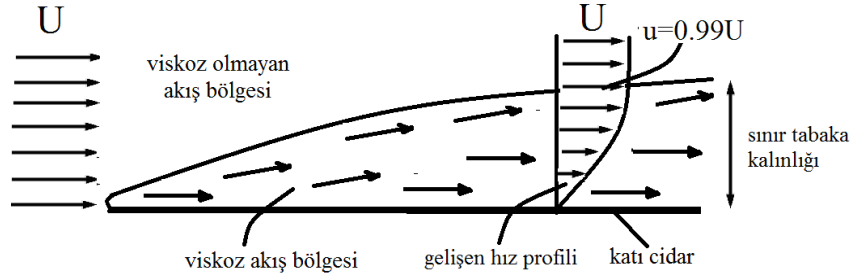
Burada P basınç, F kuvvet ve A ise temas yüzey alanıdır. Akışkan tarafından yapılan basınç etkin, vakum ve mutlak olmak üzere üç farklı şekilde okunabilir. Atmosfer basıncı atmosfer katmanının (hava katmanı) kendi ağırlığından dolayı yeryüzüne uyguladığı basınçtır. Atmosfer basıncının üstünde ölçülen basınçlara *etkin basınç* ve atmosfer basıncının altında ölçülen basınçlara ise *vakum basıncı* denir. Mükemmel vakum (sıfır basınç) üzerinden ölçülen tüm basınçlara ise *mutlak basınç* denir.

1.3.2. Kaymama Koşulu – Viskoz Akış Bölgesi

Akışların çoğu genelde akışkanların katı yüzeyler üzerindeki akışlarıdır. Yüzeyler üzerindeki akışın davranışını ve etkileşimini bilmek tasarım için önemli olup, etkileşimden dolayı oluşan sürtünme direncini yenecek kadar gerekli gücün hesabını yapmak veya oluşan sürtünme direncini azaltacak şekilde geometrisini modellemek de oldukça önemli olmaktadır.

Deneysel sonuçlar yüzey üzerindeki akışlarda akış hızının tam yüzeyde sıfır olduğunu göstermiştir. Katıya temas eden akışkan viskoz etkiler nedeniyle yüzeye yapışır ve kayma söz konusu olmaz ve hız yüzeyde sıfır kabul edilir. Bu duruma kaymama koşulu denir. Viskoz etkiler sonucu yüzeye yapışan akışkan tabakası yine viskoz etkilerle üzerindeki diğer akışkan tabakalarını yavaşlatır ve yüzeyin normalinden itibaren akışta bir hız azalmasının gerçekleşmesine neden olur. Bu nedenle kaymama koşulu yüzeyin normalinden itibaren bir hız profilinin gelişmesine neden olur. Bu hız profili viskoz kuvvetlerin etkisiyle olduğundan viskoz kuvvetlerin etkili olduğu akış bölgesine sınır tabaka denilir. Sınır tabaka içerisindeki akış hızının sınır tabaka dışındaki akış hızının %99'una eşit olduğu nokta sınır tabaka kalınlığını belirler. Bu sınır tabaka, akışın katı cisimle sürtünmesinden

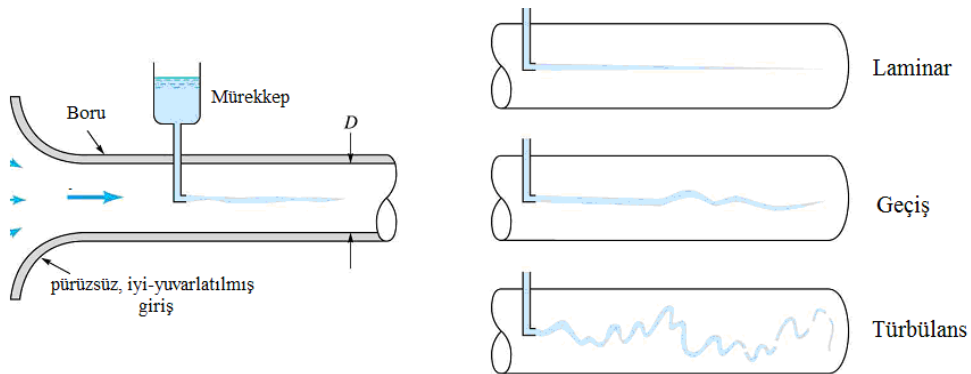
dolayı olduğu için sınır tabakaya viskoz akış bölgesi de denir. Katı cismin akış üzerindeki etkisinin olmadığı veya ihmal edildiği ve ince sınır tabaka dışındaki bölgeye de viskoz olmayan akış bölgesi veya potansiyel akış bölgesi denir. Yapılan bu tanımlamalar, aşağıda, şekil üzerinde de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Katı cidar üzerinde gelişen sınır tabaka

1.3.3. Laminer – Türbülanslı Akış

Osborne Reynolds (1842-1912) yaptığı deneysel çalışmalarda, akışın farklı biçimlerde aktığını gözlemlemiştir. Deneylerinde boru içi akışa, aşağıdaki şekildeki gibi, mürekkep enjekte etmiştir. Enjekte ettiği mürekkep düşük akış hızlarında düzenli bir yol izleyerek akışa karışmaması ile oluşan akış biçimine laminer akış, akış hızının belli bir kritik değeri geçmesiyle mürekkebin düzenli bir yol izlememesi ve boru kesitindeki tüm akışa karışmasıyla oluşan akış biçimine türbülanslı akış demiştir. Laminer ve türbülans akışlar arasında gidip-gelen akış türüne de geçiş akışı denmiştir.



Şekil 1.2. Osborne Reynolds (1842-1912)'un yaptığı deneysel boru akışında oluşan akış durumları [43]

Laminardan türbülansa geçiş nedenleri; geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, akışkan türü, yüzey sıcaklığı ve daha pek çok şeye bağlı kalmaktadır. Osborne Reynolds' un yaptığı deneyler sonucunda akış türlerini belirlemede kullanılan “Reynolds” boyutsuz sayısı ortaya çıkmıştır. Reynolds sayısı akışkandaki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere bir oranı olarak tanımlanmıştır. Dairesel borulu akışlar için Reynolds sayısı aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmiştir.

$$Re_D = \frac{\text{Atalet kuvvetler}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (1.2)$$

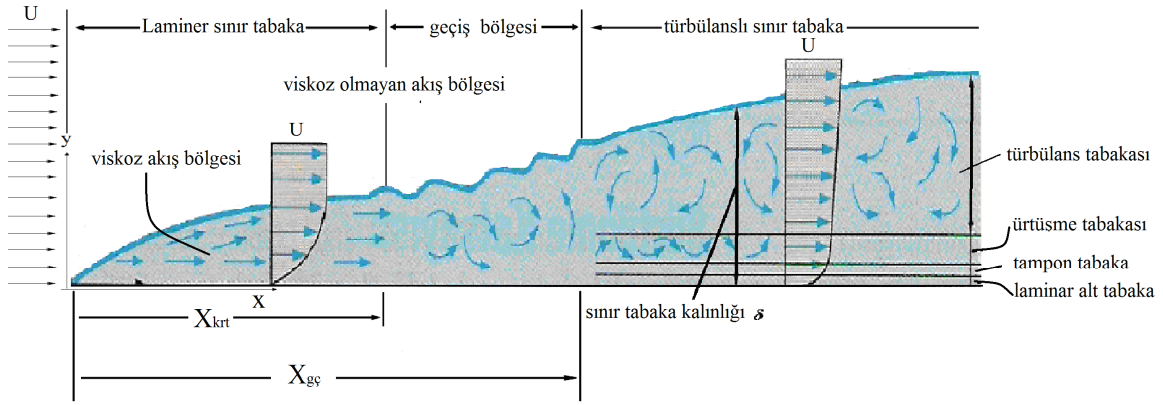
Burada D boru çapı, μ akışkan viskozitesi, ρ akışkan yoğunluğu ve U ise enkesitteki ortalama akış hızıdır.

Osborne Reynolds deneysel boru çalışmalarında, hiç çalkantıların oluşmasına izin verilmediği hassas akış şartları yaratıldığında laminar akış rejiminin Reynolds sayısının 13000 değerine kadar sürdüğünü ve akışta yüksek çalkantılı akış şartları yaratıldığında ise Reynolds sayısının 2000 değerinden sonra türbülans akış rejiminin başladığını görmüştür. Deneysel gözlemler laminardan türbülansa geçişin, yüzey pürüzlülüğü, boru titreşimleri ve akıştaki çalkantılar ile tanımlanan akışın düzensizlik derecesine bağlı olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı boru içi akışlarda laminardan türbülansa geçiş için kesin bir Reynolds sayısından bahsetmek zordur. Fakat çoğu uygulamalarda boru içi akış rejimi için aşağıda verilen Reynolds sayıları kabul görülmektedir.

- $Re \leq 2300$ laminar akış
- $2300 \leq Re \leq 4000$ geçiş akışı
- $Re \geq 4000$ türbülanslı akış

Çok pürüzsüz borularda akış düzensizliklerinin ve boru titreşimlerinin engellenmesi halinde 100000 gibi çok yüksek Reynolds sayılarına kadar laminar akışın sağlanabildiği yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Laminardan türbülansa geçişi analiz etmek için düz bir plaka yüzeyi üzerindeki akışın incelenmesinde yarar vardır. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi plakaya gelen akış düzgün U hızındadır. Plakanın girişinden itibaren plaka yüzeyine yakın cıvarda kaymama koşulunun etkisi ve viskoz etkiler sonucu, akış hızıyla ifade edilen, bir sınır tabaka gelişmiştir.



Şekil 1.3. Düz yüzey üzerindeki sınır tabaka gelişimi [43]

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi plaka girişinden kritik bir mesafeye (X_{krt}) kadar gelişen akış laminardır. Bu kritik mesafeden itibaren, belirli mesafe aralığı için, laminar-türbülans arası bir geçiş akışı olmaktadır. Bu geçiş mesafesinden ($X_{gç}$) sonra akış tamamıyla türbülanslı akış olur. Düz plaka üzerindeki akışlarda Reynolds sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (1.3)$$

Burada, U dış akım hızı, x ise plaka girişinden itibaren ölçülen mesafedir. Serbest akımlı pürüzsüz düz bir plaka yüzeyi üzerindeki akışta çok yüksek çalkantılar yaratıldığında $Re_{kr} = 1 \times 10^5$ gibi bir kritik Reynolds sayısında laminar-türbülans geçiş süreci başlayabilmektedir. Çalkantıların oluşmasına hiç izin verilmediği akışta ise $Re_{krt} = 1 \times 10^6$ gibi bir kritik Reynolds sayısında laminar-türbülans geçiş süreci başlayabilmekte ve $Re_{gç} = 4 \times 10^6$ gibi bir geçiş Reynolds sayısından itibaren ise tam gelişmiş türbülanslı akışa geçebilmektedir [20]. Gerçek mühendislik akışlarında ise türbülansa geçiş serbest akımlı pürüzsüz düz plaka için verilen değerlerden çok daha önce gelir. Yüzey boyunca pürüzlülük, dış akım bozuklukları, akustik gürültü, akış kararsızlıkları, titreşimler, sıcaklık değişimleri ve çeper eğriligi gibi faktörler erken geçiş konumunu etkiler. Bu nedenle plaka üzerindeki akışlarda bir sınır tabakanın büyük olasılıkla laminar ($Re_x < Re_{krt}$) yada türbülanslı ($Re_x > Re_{krt}$) olduğunu belirlemede aşağıdaki mühendislik kritik Reynolds sayısı kullanılır [43].

$$Re_{krt} = \frac{\rho U x}{\mu} \cong 5 \times 10^5 \quad (1.4)$$

Dolayısıyla sürtünme katsayısı hesaplamalarında bu kritik değerden daha düşük değerlerde laminer akış kabulü ve üstü değerlerde türbülans akış kabulü yapılır. Buradaki mantık, geçiş bölgesinin ilk kısmını laminer, kalan kısmını ise türbülanslı olarak geçiş bölgesini göz ardı etmektir.

1.3.4. Viskozite – Kayma Gerilmesi

Akışkanların bir diğer özelliği de, akmaya karşı olan iç direncini veya akışkanlığını temsil eden viskozitesidir. Örneğin hava içerisinde cisimler rahat hareket ederken su ve yağ içerisinde hareketleri daha zordur. Bunun sebebi her üç akışkan viskozitesinin farklı olmasıdır. Viskozite akışkana bağlı bir özelliktir ve “ μ ” simgesi ile gösterilir.

Bir akışın bir yüzey üzerinde oluşturduğu sürtünme kuvveti viskoziteye bağlı olan kayma gerilmesinin bir sonucudur ($\tau = F / A$). Newton tipi kayma akışında kayma gerilmesi,

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.5)$$

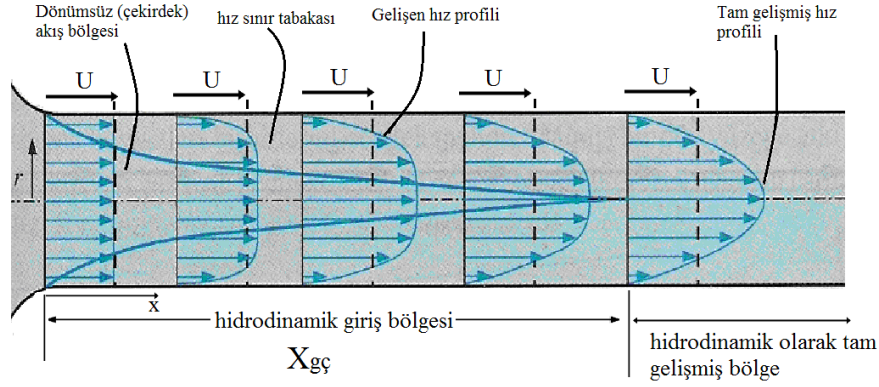
doğrusal ilişkiyle ifade edilmektedir (tezde kullanılan akışkan su olduğundan Newton tipi akışkan tanımı kullanılacaktır). Viskozite, sıvılarda moleküler arasındaki çekim kuvvetleri, gazlarda ise moleküllerin çarpışması nedeniyle ortaya çıkar ve sıcaklıkla önemli ölçüde değişir. Sıvıların viskoziteleri sıcaklıkla azalır, buna karşın gazlarınki artar.

1.4. Borularda Akış

1.4.1. Giriş Bölgesi

Şekil 1.4'te gösterildiği gibi boru en-kesiti boyunca düzgün bir U hızı ile boru içerisine giren akışkan boru iç yüzeyindeki kaymama koşulu nedeniyle radyal yönde hızı değişen bir hız profiline dönüşür. Bu hız profiline karşılık boruya giren kütleli debinin korunması için boru merkezindeki akış hızı artar ve radyal yönde büyüyen hız profili boru merkez çizgisine varıncaya kadar boru boyunca gelişir. Boru girişinden sınır tabakasının merkez çizgisiyle birleştiği yere kadar olan bölgeye hidrodinamik gelişme bölgesi ve bu uzunluğu

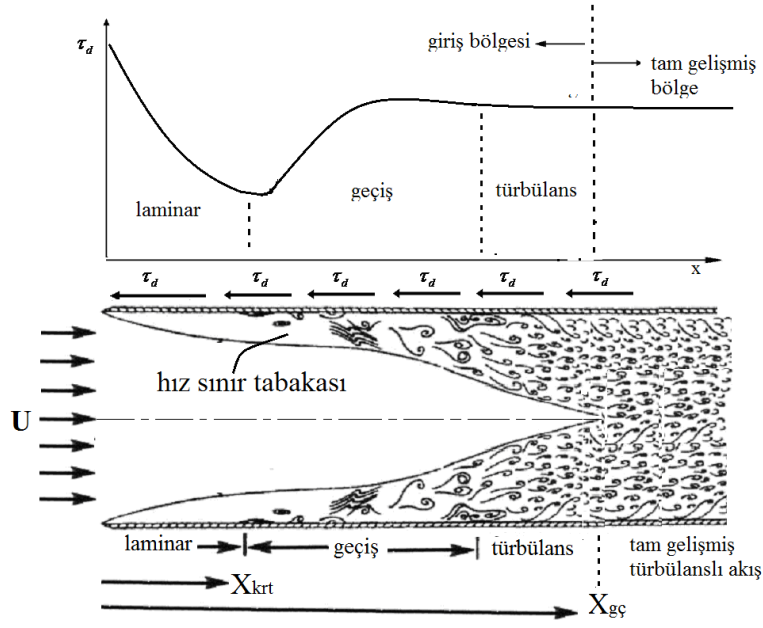
da "hidrodinamik giriş uzunluğu" ($X_{gç}$) denir. Giriş bölgesindeki akışa hidrodinamik olarak gelişen akış denir. Hidrodinamik giriş bölgesinden itibaren hız profilinin değişmediği bölgeye de hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış bölgesi denir.



Şekil 1.4. Boru girişinden itibaren hız sınır tabakasının gelişimi [43]

Laminer akışlarda tam gelişmiş bölgede hız profili parabolikken türbülanslı akışta ise biraz daha yassı olmaktadır. Laminer akışlarda hız profili tüm Reynolds sayılarında aynı kalırken türbülanslı akışlarda ise hız profili Reynolds sayısına bağlı olarak değişir.

Şekil 1.5'te gösterildiği gibi boru çeperine bitişik akışkan üzerindeki duvar kayma gerilmesi (τ_d) boru girişinde en yüksek değerdeyken gelişen bölgede azalmakta ve tam gelişmiş bölgede ise sabit değerleri izlemektedir. Boru girişindeki duvar kayma gerilmesinin bu değişimi borunun tümü için bulunan kayma gerilmesinde bir artışa neden olur.



Şekil 1.5. Tam gelişmiş türbülans boru akışında çeper kayma gerilmesinin değişimi

1.4.1.2. Giriş Uzunlukları

Hidrodinamik giriş uzunluğu, çoğunlukla, duvar kayma gerilmesinin tam gelişmiş akıştaki duvar kayma gerilmesinin yüzde 98'ine eşit olduğu mesafedeki uzunluk olarak görülmüştür. Literatürde laminar akış için hidrodinamik giriş uzunluğu, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre,

$$X_{gç, lam} = 0.056 \cdot D \cdot Re \quad (1.6)$$

bağıntısıyla tahmin edilebilmektedir [43]. Douglass vd. [27] akışkanlar mekaniği kitabında $X_{gç} = 120D$ mesafesinden itibaren tam gelişmiş laminar akış şartlarının kabul edilebildiğini söylemiştir [27].

Türbülanslı akışlarda ise hidrodinamik giriş uzunluğu laminar akışa göre çok daha kısadır. Literatürde, türbülanslı akışlardaki hidrodinamik giriş uzunluğunu tahmin etmeye yönelik önemli ayrılmalar vardır. Bazı yazarlar, hidrodinamik giriş uzunluğu için $X_{gç}/D = 1.6 \cdot Re^{1/4}$ kanununu önerirken, bazı yazarlarda $X_{gç}/D = 4.4 \cdot Re^{1/6}$ kanunu önermiştir. Gerçekten, pek çok laboratuvar çalışmasının da yapıldığı yaygın Reynolds aralığında (10^5 ve 10^6 Reynolds aralığı) bu iki bağıntıyla çıkarılan $X_{gç}/D$ değerlerinin oldukça yakın değerlerde oldukları görülmüştür. Fakat, bu bağıntıların 10^6 'dan daha büyük

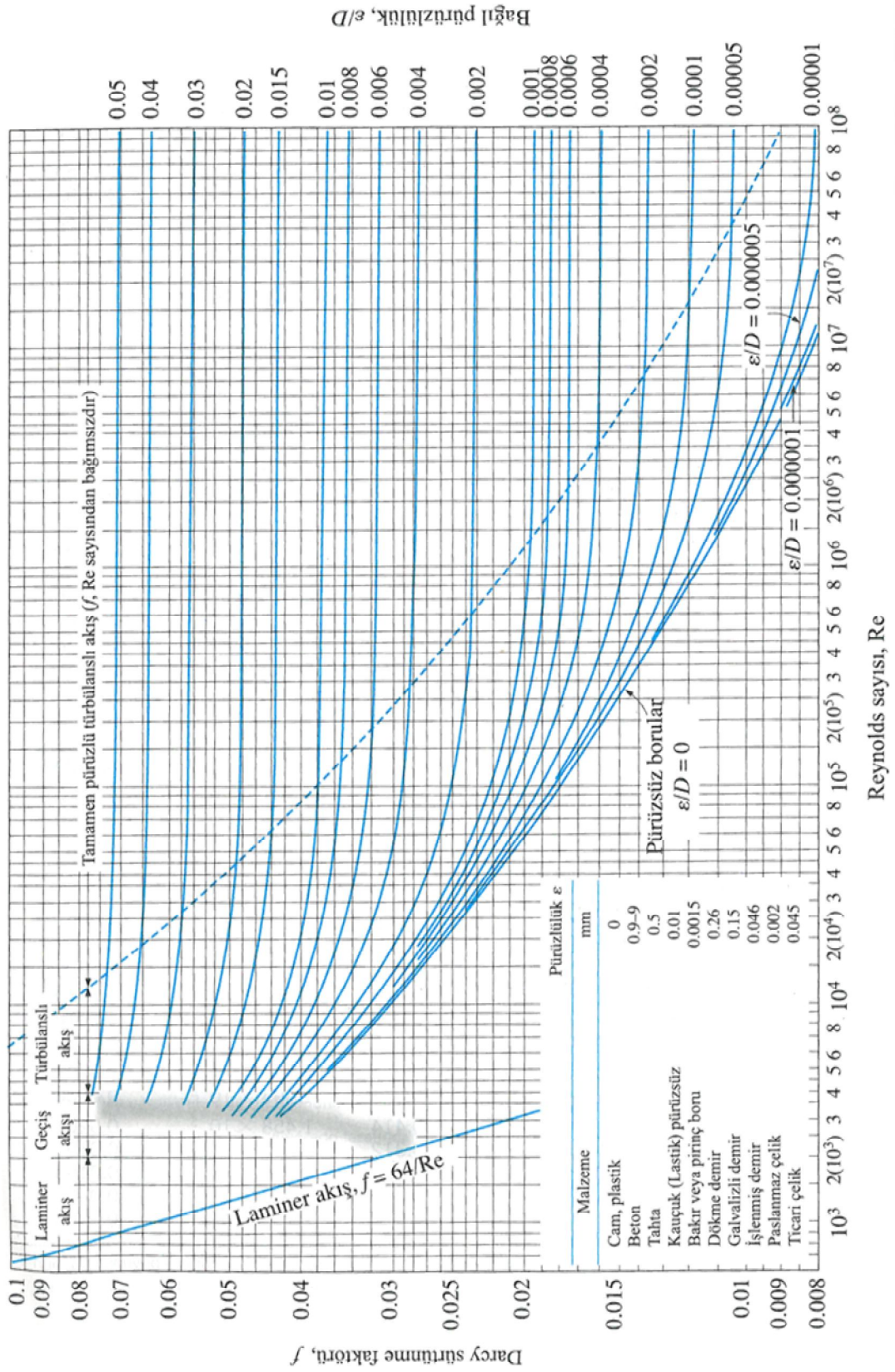
Reynolds sayıları için kullanılması halinde önemli bir şekilde birbirinden farklı sonuçlar verebildikleri görülmüştür. Çünkü bu deneysel kanunların herhangi bir teorik temelleri yoktur [7]. Frank M. White akışkanlar mekaniği kitabında $X_{gç}/D = 4.4 \times Re^{1/6}$ kanunu önermiş ve hesaplamalarında bunu kullanmıştır [6]. Diğer bir akışkanlar mekaniği kitabı ise uygulamalarda hidrodinamik giriş uzunluğunun yaklaşık olarak $X_{gç}/D = 1.359 \times Re^{1/4}$ bağıntısı ile tahmin edilebileceğini söylemiştir [43]. J.F. Douglass ve diğerleri [27] akışkanlar mekaniği kitabında $X_{gç} = 60D$ mesafesinden itibaren tam gelişmiş türbülans akış şartlarının kabul edilebileceğini söylemiştir. Perry ve Abell [32] 175000 Reynolds sayılı deneysel boru akışında $72D$ 'lik bir gelişme uzunluğundan sonra tam gelişmiş akış şartlarının oluştuğunu söylemiştir. Bu çalışmada tam gelişmiş akış şartları, ortalama hızın ve türbülans yoğunluğunun ard arda iki ölçüm istasyonundaki değerlerinin aynı olmasıyla tanımlanmıştır. Nikuradse [26] deneysel boru çalışmalarında tam gelişmiş akışın $40D$ mesafesinden itibaren oluştuğunu söylemiştir. Deneysel çalışmalarda merkezi eksenel hız değerlerinin genelde $X_{gç}/D$ 'nin 30-40 arasındaki değerlerinde maksimum oldukları bulunmuştur [7]. Görüldüğü gibi pek çok kaynak hidrodinamik giriş uzunluğu için deneysel verilerden çıkarılan deneysel bağıntılar önermekte veya tahmini çap mesafesi olarak alınabileceğini bildirmekte fakat şimdiye kadar temel bir teori oluşturulamamıştır.

1.4.2. Borularda Basınç Düşüşü ve Yük Kaybı

Bir borulama sistemindeki akışkanı akmaya zorlamanın sebeplerinden biri akışkanı yerçekimine karşı yukarı götürmek diğeri ise akışkanla boru iç çeperi arasında ve düz boru dışındaki elemanlarda oluşan sürtünme direncini yenmektir. Bu sürtünmeler, akışkandaki statik basıncın boru boyunca düşmesine sebep olur. Bu basınç düşüşünü doğru bir şekilde hesaplamak, akışı sağlayacak gerekli pompalama gücünü belirlemede çok önem kazanmaktadır. Daimi, sıkıştırılamaz ve tam gelişmiş bir boru akışında, boru içi sürtünmelerden dolayı oluşan basınç kaybı aşağıdaki Darcy-Weisbach bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \rho \frac{U^2}{2} \quad (1.7)$$

Burada f Darcy sürtünme faktörü ve L ise boru uzunluğudur. Bu bağıntıda önemli olan Darcy sürtünme faktörünün hesaplanmasıdır. Laminer ve türbülanslı boru akışları için sürtünme faktörü Moody diyagramından bulunabilmektedir. Bu diyagramda, Darcy sürtünme faktörü bağıl pürüzlülüğe (ε/D) ve Reynolds sayısına bağlı bir değişken olmaktadır. Moody diyagramı ise Nikuradse [26] tarafından yapay olarak kum ile pürüzlendirilmiş boruların deneysel çalışmalarından çıkarılan sonuçların bir ürünüdür. Bu durumda Darcy sürtünme faktörü deneysel sonuçların bir ürünü olmaktadır. Moody diyagramı Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Moody diyagramı [43]

Laminer akışlarda bağıl pürüzlülüğün Darcy sürtünme faktörüne etkisi olmadığından aşağıdaki bağıntı ile

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1.8)$$

türbülanslı pürüzsüz boru akışlarında ise

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad Re < 2.10^4 \quad (1.9)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Pürüzlü borularda ise sürtünme faktörü Moody diyagramından Reynolds sayısı ve bağıl pürüzlülük değerlerinden gidilerek bulunabilir. Ayrıca Moody diyagramından türetilmiş bir fonksiyon olan Colebrook denkleminden de hesaplanabilmektedir. Colebrook denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (1.10)$$

Denklemdaki logaritmanın 10 tabanında logaritma olduğuna dikkat edilmelidir. Pürüzsüz boru uygulamalarında " ε " değeri sıfır alınacağından Colebrook denklemi, pürüzsüz borular için, $1/\sqrt{f} = 2 \log (Re \sqrt{f}) - 0.8$ Prandtl denklemine dönüşmektedir.

Moody diyagramı dairesel borular için kullanılmasına rağmen dairesel olmayan kanal türü borular için de hidrolik çap tanımlanmak şartıyla kullanılabilir. Moody diyagramında bazı ticari borular için verilen pürüzlülük değerleri aşağıda verilmiştir.

Malzeme	Pürüzlülük, ε (mm).
• Cam, plastik	0 (pürüzsüz)
• Beton	0.9-9
• Bakır veya pirinç boru	0.0015
• Dökme Demir	0.26
• Galvanizli demir	0.15
• İşlenmiş demir	0.0046
• Paslanmaz çelik	0.002
• Ticari çelik	0.045

Bu değerler yeni imal edilmiş borulardan elde edilmiştir ve kullanım sonucu boruda oluşan paslanma vb. başka etkenler boru pürüzlülüğünü artırabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle borulama sistemlerinin tasarımında gerçek çalışma şartları hesaba katılmalıdır. Ayrıca Moody diyagramı ve buna eşdeğer Colebrook denklemi birçok belirsizlik içerir. Pürüzlölük büyüklüğü, deneysel hata, verilerin eğriye uydurulması vb. etkenler diyagram değerlerini $\pm 15\%$ 'e kadar doğruluktan saptırdığı göz önüne alınmalıdır.

Moody diyagramında Laminardan türbülansa geçiş bölgesi ($2300 < Re < 4000$) gölgeli alan olarak gösterilmiştir. Bu bölgedeki akış, akışı bozan şeylere bağlı olarak laminar veya türbülanslı olur. Dolayısıyla bu aralıkta bulunan sirtünme faktörleri en az güvenilir olanlardır. Çok büyük Reynolds sayılarında (diyagram üzerinde kesik çizginin sağına doğru), belirli bağlı pürüzlölük eğrilerine karşılık gelen sirtünme faktörü eğrileri hemen hemen yataydır ve dolayısıyla sirtünme faktörleri Reynolds sayısından bağımsızdır. Bu bölgedeki akışa tamamen pürüzlü türbülanslı akış veya sadece tamamen pürüzlü akış denir. Tamamen pürüzlü bölgede ($Re \rightarrow \infty$) Colebrook denklemi, $1/\sqrt{f} = -2 \log [(e/D) / 3.7]$ olarak ifade edilen Von Karman denklemine indirgenir.

1.4.3. Süreklilik ve Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri tüm akışlara uygulanabilen en önemli akış denklemleridir. Süreklilik denklemi, diferansiyel boyutlardaki bir kontrol hacim içerisinden geçen akışkanın kütle korunum yasasını ifade ederken Navier-Stokes denklemleri ise Newtonun ikinci kanunun bir kontrol hacme uygulanmasıyla sonuçlanan hareket veya momentum korunum denklemleri olmaktadır.

Kartezyen koordinatlarda, sabit fiziksel özelliklere sahip (izotermal), Newton tipi ve sıkıştırılmaz bir akış için süreklilik ve hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (1.11)$$

Navier Stokes Denklemleri:

x yönünde:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1.12)$$

y yönünde:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1.13)$$

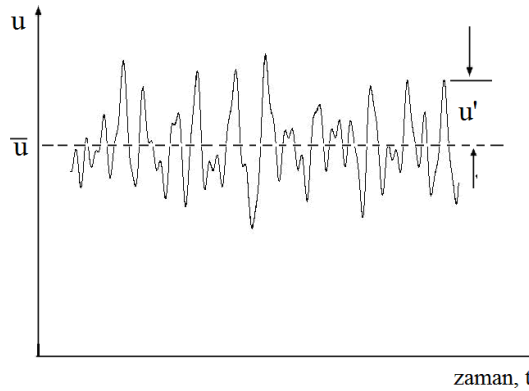
z yönünde:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1.14)$$

Burada u , v ve w sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hız bileşenleridir. Bu denklemlerin tümüne birden yönetici denklemler denir. Tüm akış problemlerin çözümü bu denklem takımı ile yapılmaktadır.

1.4.4. Türbülanslı Boru Akışları

Türbülanslı akışlar, zaman ve konuma bağlı olarak düzensiz davranış sergilerler. Türbülanslı bir akışa ait anlık hızın zamana bağlı değer grafiği Şekil 1.7'de gösterilmiştir.

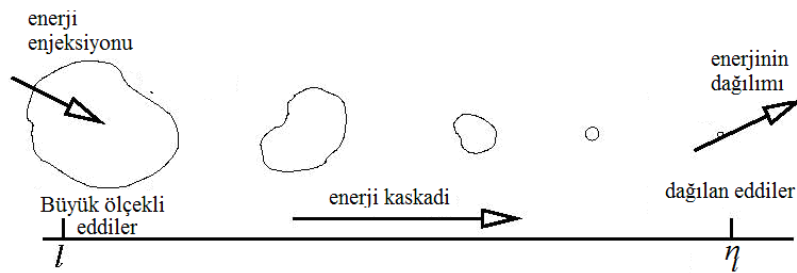


Şekil 1.7. Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki anlık hızın zamana bağlı değişimi

Burada, akış içerisindeki bir noktada anlık hız değeri zamana bağlı olarak dalgalı bir değişim göstermektedir. Burada dalgalı hız değerleri iki bileşene ayrılmıştır. Bunlar zaman ortalamalı ($\bar{u}$) hız bileşeni ve ortalama değerden sapma miktarı olan çalkantı hız bileşeni (u')'dir. u' hızı akışın kendi içerisindeki karışmasından dolayı anlık hızın artıp azalması sonucu oluşan hız bileşenidir. Detaylı çalışmalar türbülanslı akışların zaman ve konuma bağlı olarak gelişen boyutsal yapılar içerdiğini göstermiştir. Bu yapılar akış içerisinde dönen akışkan bölgeleridir. Bunlara *eddy*, *girdap*, *türbülans ölçekleri* veya *türbülans çalkantıları* denir. Türbülans teorisinin temel sonucu olarak, bu yapıların tümünün aynı büyüklüklerde olmadıkları ve büyük eddylerden küçük eddy'lere doğru her aralıkta akış içerisinde var oldukları görülmüştür.

Genel olarak türbülanslı akışta büyük eddylerin boyutları akış geometrisiyle ilişkili olan " l " uzunluk ölçüsü ile ifade edilmektedir. Çepere bağlı türbülanslı akışlarda uzunluk ölçüsü akış geometrisine uyan (boru çapı gibi) L uzunluk ölçüsü ile ölçülmektedir. Bu uzunluk ölçüsü yanında, bu büyük ölçekli eddy'ler u_t (m/s) gibi bir hız ölçüsüne sahip olmasıyla, l/u_t oranıyla tipik bir zaman ölçüsüne ve u_t^2 ile tanımlanan bir kinetik enerji ölçüsüne de sahip oldukları çıkarılabilmektedir.

Büyük ölçekli eddy'lerin kinetik enerjileri ortalama akıştan sağlanırken küçük eddy'lerin kinetik enerjileri ise doğrudan ortalama akıştan sağlanmaz. Büyük eddy'lerin küçük eddy'lere bölünmesiyle büyük eddy'lerin kinetik enerjisi küçük eddy'lere aktarılmış olur. Türbülanslı akışın en küçük ölçeğine ulaşana kadar bu sürekli küçük eddy'lere bölünme işlemine enerji kaskad'i denir. Enerji kaskadi sonunda türbülanslı akışın en küçük eddy'leri parçalanarak kinetik enerjileri akış içerisinde moleküler düzeyde iç enerjiye yani ısı enerjisine dönüşür. Bu şekilde türbülanslı akışlarda cidar sürtünmeleri dışında ek bir enerji kaybı oluşmaktadır.



Şekil 1.8. Büyük ölçekli eddy'lerden küçük ölçekli eddy'lere doğru enerji kaskadi

Büyük ölçekli eddylerin kinetik enerji kaybı, yayılma oranı ε (m^2/s^3) ile gösterilir. Yayılma oranı ise büyük ölçekli eddy'lerin kinetik enerjilerinin ve varolma zamanlarının bir oranı olarak yorumlanmıştır (u_t^3 / l). En küçük eddy'lerin uzunluk ölçüsüne kolmogorov ölçü (η) denir. Literatürde büyük eddylerin uzunluk ölçüsü ölçümlerinde farklılıklar bulunabilmektedir. Örneğin Eggels [28] çalışmalarında 5400 ile 42000 aralığındaki Reynolds sayılı boru akışlarında büyük eddy'lerin uzunluk ölçüsü için $l = 1/10 \times D$ değeri ve hız ölçüsü için de $u_t = 1/15-1/20 \times U$ arasındaki değerleri kullanmıştır. FLUENT programında [1] ve Schlichting kitabında [10] ise $l = 0.07 \times D$ değeri kullanılmaktadır. Yapılan çok sayıda bilimsel çalışmalara rağmen türbülans teorisi halen büyük ölçüde çözülebilmemiş değildir.

Türbülanslı akışta girdaplar; kütle, momentum ve enerjiyi akışın diğer bölgelerine taşır. Çünkü türbülanslı akışta kütle, momentum ve ısı transferi büyük ölçüde artmaktadır. Sonuç olarak türbülanslı akışlar laminar akışlara göre çok daha yüksek sürtünme direncine, ısı ve kütle geçişine sahip olmaktadır.

Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki anlık hızın zamana bağlı değişimi Şekil 1.7. 'de gösterilmiştir. Bu anlık değerlerle türbülanslı akışları çözmek analitik olarak imkânsızdır. Bu nedenle anlık hız değeri ortalama hız ($\bar{u}$) bileşenine ve çalkantı hız bileşenine (u') ayrılarak çözüm için basitleştirme yapılmıştır. Anlık hızın ortalama değerleri ise yeterli bir zaman süresince anlık hız değerlerinin aritmetik zaman ortalaması olarak ifade edilmiştir.

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt \quad (1.15)$$

Anlık hız değeri gibi diğer akış özellikleri olan anlık basınç, sıcaklık ve yoğunluk da ortalama ve çalkantı bileşenine ayrılmaktadır.

$$P = \bar{P} + P' \quad T = \bar{T} + T' \quad \rho = \bar{\rho} + \rho'$$

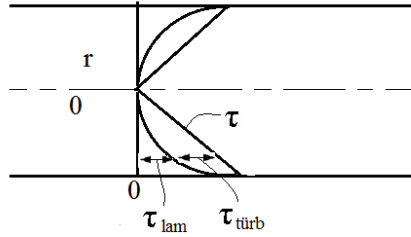
Türbülanslı akışlardaki belirli bir konumdaki ortalama değerler laminar akış özellikleri gibi zamanla değişmeyen değerlerdir.

1.4.4.1. Türbülans Kayma Gerilmesi

Türbülanslı akışlarda kayma gerilmesi laminar akıştaki gibi hesaplanamamaktadır. Deneysel çalışmalar türbülanslı akışta kayma gerilmesinin laminar akıştakinden kat kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla türbülanslı akışlarda diğer akışkan özellikleri gibi kayma gerilmesinin çözümü için zaman ortalamalı bileşen ve çalkantı bileşeni olarak, laminar kayma gerilmesi ve türbülans kayma gerilmesi olarak, iki kısma ayrılmaktadır.

$$\begin{aligned}\tau &= \bar{\tau} + \tau' \\ \tau &= \tau_{lam} + \tau_{türb}\end{aligned}\tag{1.16}$$

Türbülanslı boru akışlarında laminar ve türbülanslı kayma gerilmesinin akış en kesitindeki dağılımları ise Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Laminar ve türbülans kayma gerilmesinin akış en kesitinde dağılımları

Şekil 1.9'da görüldüğü gibi türbülans kayma gerilmesi boru merkezinde ve duvarında sıfır ve ikisi arasındaki kısımda ise göbekleşmiştir. Bu da göbekleşmiş kısım da, türbülans çalkantılarının ve yoğunluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

Türbülanslı akışlardaki laminar kayma gerilmesi laminar akıştaki gibi

$$\tau_{lam} = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\tag{1.17}$$

ifadesiyle ortalama değerler üzerinden hesaplanabilmektedir. Türbülans kayma gerilmesi ise uzun bilimsel araştırmalar sonucunda iki çalkantı hız bileşenin akış üzerindeki zaman ortalama etkileri olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [43].

$$\tau_{türb} = -\rho \overline{u'v'}\tag{1.18}$$

Bu ifade de yer alan $\overline{u'v'}$, her iki yöndeki çalkantı hız bileşenlerinin çarpımlarının zaman ortalamasıdır. $\overline{u'} = 0$ ve $\overline{v'} = 0$ olsa bile ikisinin çarpımının zaman ortalaması sıfır değildir. $-\rho\overline{u'v'}$, $\rho\overline{u'^2}$, $-\rho\overline{u'w'}$ ve $\rho\overline{v'^2}$ gibi türbülans gerilmelerine Reynolds Gerilmeleri denir. Türbülans kayma gerilmesinin çözümüne yönelik pek çok model önerilmiştir. Bunlardan en önemlilerden birisi, 1877'de, Fransız matematikçi Joseph Boussinesq tarafından önerilen aşağıdaki bağıntıdır.

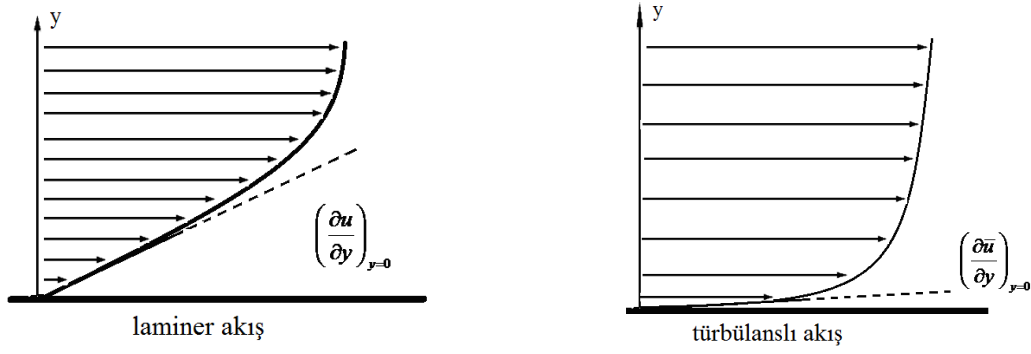
$$\tau_{turb} = -\rho\overline{u'v'} = \mu_t \frac{d\overline{u}}{dy} \quad (1.19)$$

Burada laminar kayma gerilmesine benzer bir çözüm yolu önerilmiştir. Bu bağıntıda μ_t türbülans viskozitesi ve eddy viskozitesi denir. Türbülans viskozitesi akışkanın kinematik viskozitesi gibi bir akışkan özelliği olmayıp ve akış şartlarına bağlı bir değişken olmaktadır. Türbülans kayma gerilmesinin hesaplanması için türbülans viskozitesini bulmaya yönelik pek çok model geliştirilmiştir.

Sonuç olarak laminar ve türbülans kayma gerilmesinin yerine yazılmasıyla, toplam kayma gerilmesi aşağıdaki eşitlikle sonuçlanmaktadır.

$$\tau = \tau_{lam} + \tau_{turb} = \mu \frac{d\overline{u}}{dy} + \mu_t \frac{d\overline{u}}{dy} = (\mu + \mu_t) \frac{d\overline{u}}{dy} \quad (1.20)$$

Türbülans ve laminar akışların boru cidarına yakın hız profilleri Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi cidara yakın hız eğiminde laminar akışın türbülans akışından çok daha büyüktür. Dolayısıyla bu da türbülanslı akışlarda duvar kayma gerilmesinin laminar akışlarda ki duvar kayma gerilmesinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.10. Aynı serbest akım hızına sahip, cidar kısmı yakın laminar ve türbülans hız profillerinin karşılaştırılması

1.4.4.2. Türbülanslı Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, Newton tipi, sıkıştırılabilir, sıkıştırılamaz, daimi, daimi olmayan her türlü akışa uygulanabilen en genel akış denklemleridir. Türbülanslı akışların çözümü için akış alanı değişkenleri, ortalama ve çalkantı bileşenlerine ayrıldığında ve sıkıştırılamaz, Newton tipi akışların çözümü için Navier stokes denklemlerinde yerine yazıldıklarında aşağıdaki denklem ifadesine ulaşılmaktadır.

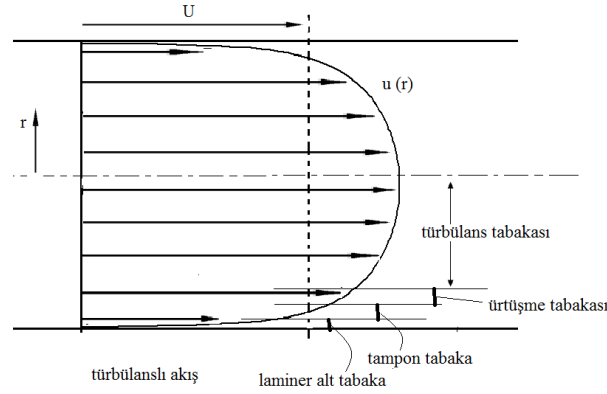
x yönünde:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial u'^2}{\partial x} + \frac{\partial u'v'}{\partial y} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} \right) \quad (1.21)$$

Bu denkleme Reynolds ortalamalı Navier stokes denklemi denir. Yabancı literatürde ise, kısaca, "RANS" denklemi denir. Diğer iki yündeki (y, z) denklemler de benzer şekilde yazılabilmektedir. Bu denklem türbülanslı akışları ortalama değerler üzerinden değerlendirdiğinden çözümü kolaylaştırmaktadır. Yalnız bu denklemde çözülmesi problem olan türbülans kayma gerilmeleridir. Türbülans kayma gerilmesinin hesaplanmasına yönelik Boussinesq hipotezine dayalı pek çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu türbülans modellerine RANS türbülans modelleri denilmiştir.

1.4.4.3. Türbülans Hız Profili

Boru akışlarında, boru girişinden tam gelişmiş akış şartlarına varıncaya kadar gelişen akış değişmez bir hız profili oluşturmaya yönelir. Gelişen hız profili türbülansa uğrarsa türbülans hız profiline eğer uğramazsa laminar hız profiline dönüşür ve tam gelişmiş akış bu iki değişmez hız profiliyle devam eder. Tam gelişmiş türbülans hız profili ise Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Tam gelişmiş boru akışında türbülans hız profili

Şekil 1.11'de görüldüğü gibi, türbülans hız profili çepere yakın keskin bir hız düşüşü ile göbek kısmında daha dolgun olmuştur. Türbülans hız profili boru çeperi normal boyunca dört bölgeye ayrılmıştır. Bunlar, viskoz alt tabaka, tampon tabaka, örtüşme tabakası ve türbülans tabakasıdır. Viskoz alt tabaka boru cidarı üzerinde çok ince bir akış tabakasıdır. Bu tabakada türbülans etkileri hemen hemen hiç yoktur ve akış burada tamamiyle laminardır. Bu yüzden bu bölgeye laminar alt tabaka denir. Tampon tabaka türbülans etkilerinin önemli olmaya başladığı fakat hala laminar etkilerin baskın olduğu bir akış tabakasıdır. Örtüşme tabakasında ise türbülans etkileri önem kazanmaya başlamakta fakat hala baskın olmadığı ve laminar etkilerin daha çok olduğu bir akış tabakasıdır. En son tabaka olan türbülans tabakası ise türbülans etkilerinin laminar etkileri bastırmaya başladığı kalın bir akış tabakası olmaktadır.

Laminar alt tabaka kalınlığı çok küçüktür. Kalınlığı bir saç teli kadar ancak vardır. Bu tabakada hız profili doğrusala yakındır ve hız gradyanı hemen hemen $du/dy = u/y$ 'de eşit kalmaktadır. Boru akışında cidara yapışık akışkan parçacıkları üzerinde oluşan gerilmeye duvar kayma gerilmesi denir. Bu nedenle laminar alt tabakada duvar kayma gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\tau_d = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \frac{u}{y} = \rho \nu \frac{u}{y} \quad \text{veya} \quad \frac{\tau_d}{\rho} = \frac{\nu u}{y} \quad (1.22)$$

Burada "y" cidardan uzaklık mesafesi ve "ν" ise akışkanın kinematik viskozitesidir. τ_d/ρ' nun karekökünün boyutu hızdır ve bu hıza sürtünme hızı denir. Sürtünme hızı,

$$u^* = \sqrt{\tau_d / \rho} \quad (1.23)$$

olarak ifade edilmiştir. Bu ifade denklem (1.22)'de yerine yazılmasıyla laminar alt tabakadaki hız profili boyutsuz olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{yu^*}{\nu} \quad (1.24)$$

Bu eşitliğe *çeper yasa*sı denir. Çeper yasa

sının, $0 \leq yu^*/\nu \leq 5$ aralığında pürüzsüz yüzeylerle yapılan deneylerle iyi uyum sağladığı görülmüştür.

Sınır tabaka hız analizlerinde basitleştirme amacıyla boyutsuz hız ve boyutsuz mesafe kullanılmaktadır. Boyutsuz mesafe ve hız aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (\text{boyutsuz mesafe}) \quad (1.25)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (\text{boyutsuz hız}) \quad (1.26)$$

Bu iki boyutsuz özellikten çeper yasa

sı $u^+ = y^+$ şeklinde olmaktadır. Böylece laminar alt tabaka $0 < y^+ < 5$ değerleri arasında kalan bir tabaka olmaktadır.

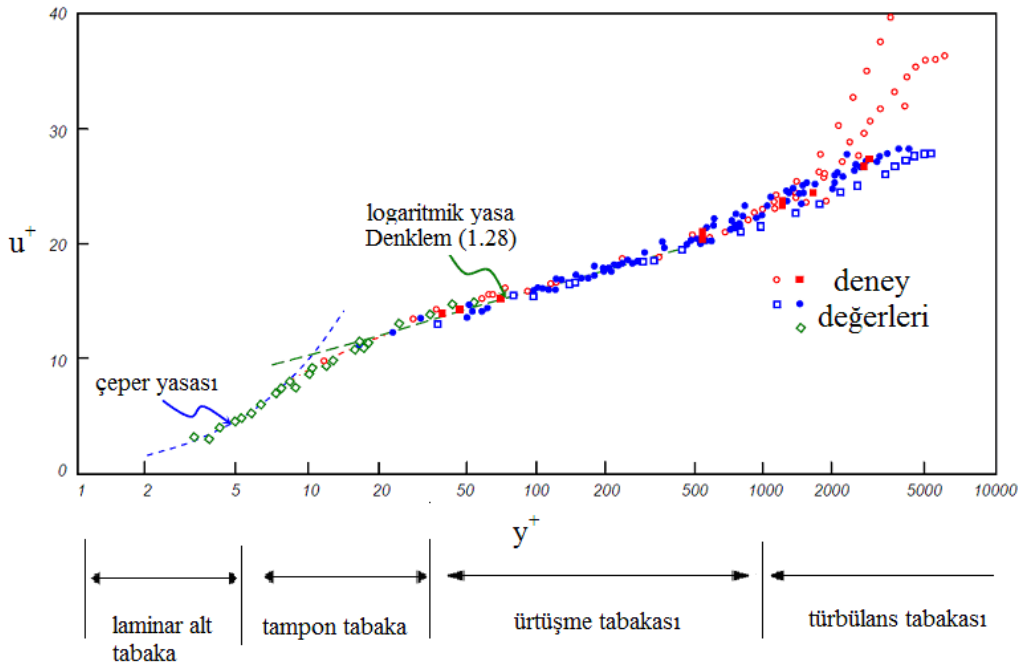
Laminar tabaka dışındaki diğer akış tabakalarında yer alan boyutsuz hız profillerinin ise $u^+ = A \ln y^+ + B$ gibi bir logaritmik hız dağılım kanununa uydukları görülmüştür. Deneysel veriler sonucunda $5 \leq y^+ \leq 30$ aralığında bulunan tampon tabaka için aşağıdaki logaritmik denklem

$$u^+ = 5 \ln y^+ - 3.05 \quad (1.27)$$

ve $y^+ > 30$ değerinden itibaren başlayan örtüşme ve türbülans tabakasının belirli bir kısmı için ise aşağıdaki logaritmik denklem

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5 \quad (1.28)$$

önerilmiştir. *Logaritmik yasa* ifadesi daha çok Denklem (1.28) için kullanılmıştır. Çünkü bu son logaritmik denklem Şekil 1.12'de görüldüğü gibi büyük boyutsuz mesafe aralıklarında deneysel verilerle çok iyi uyum sağlamıştır.



Şekil 1.12. Tam gelişmiş türbülanslı boru akışında çeper yasasının ve logaritmik yasanın deneysel verilerle karşılaştırılması

Şekil 1.12.'de $y^+ > 30$ için logaritmik yasanın büyük doğruluk gösterdiği ve $y^+ < 5$ için çeper yasasının deney değerleriyle çok iyi uyum gösterdiği fakat $5 < y^+ < 30$ aralığındaki tampon tabakada ise her iki yasanın hassas olmadığı görülmektedir. Bu hız dağılım kanunlarına duvar kanunları veya duvar fonksiyonları da denilmektedir.

1.4.5. Boru içi Pürüzlülük

Bir yüzeyin engebeli çıkıntılara pürüzlülük denir. Laminer akışta yüzey pürüzlülükleri tamamıyla akış üzerinde etkili değilken türbülanslı akışlarda ise durum böyle

değildir. Türbülanslı akışlarda eğer yüzeydeki pürüzlülük çıkıntıları laminar alt tabaka kalınlığını aşmışsa bu yüzey pürüzlü olarak ele alınır. Eğer bu çıkıntılar laminar alt tabaka kalınlığını aşmamışsa bu yüzeydeki pürüzlükler akışa etki etmez ve yüzey pürüzsüz olarak değerlendirilir.

Nikuradse [20] türbülanslı akışlar için suni olarak kum taneleriyle pürüzlendirdiği borularla geniş kapsamlı deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu deneylerde pürüzlülük etkisini çalışmak için pürüzlülüğü boyutsuz olarak aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

$$\varepsilon^+ = \frac{\varepsilon}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_d}{\rho}} \quad (1.29)$$

Burada ε pürüzlülük yüksekliğidir ve ε^+ ise boyutsuz pürüzlülüktür. Deneysel sonuçlar pürüzlülük için üç farklı durum ortaya koymuştur. Bunlar,

Hidrodinamik olarak pürüzsüz	: $0 \leq \varepsilon^+ \leq 5$
Geçişsel	: $5 \leq \varepsilon^+ \leq 70$
Tamamıyla pürüzlü	: $\varepsilon^+ > 70$

durumlarıdır. Hidrodinamik olarak pürüzsüz yüzeylerde pürüzlülük tepeleri laminar alt tabaka içerisinde ve pürüzlülüğün sürtünmeye etkisi yoktur. Geçişsel durumda pürüzlülükler kısmen laminar alt tabaka dışındadır ve akışa karşı biraz sürtünme direnci oluştururlar. Tamamıyla pürüzlü durum da ise tüm pürüzlülükler laminar alt tabakayı aşmıştır bu yüzden laminar alt tabakanın akışa etkisi yoktur ve pürüzlülükler türbülans karışımını etkiler ve sürtünme direncini pürüzsüz yüzeylere göre kat be kat artırır.

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

2.1. Giriş

Akışın olduğu mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde iki yaklaşım vardır. Bunlar deney yapma ve hesaplama. Deney yapma, tipik olarak rüzgar tüneli ve başka şekilde test edilecek modellerin yapımını gerektirirken ikincisi ise diferansiyel akış denklemlerini analitik veya sayısal olarak çözmektir. Deney yapma, pahalıdır ve akış alanı için yeterince detaylı bilgi sunamamaktadır. Analitik çözüm ise ancak basit akışlara uygulanabilmektedir. Bunlara rağmen sayısal hesaplama basit-karmaşık her türlü problemi çözebilme yeteneğindedir. Sayısal yöntemler deneylerden farklı olarak, masrafsız, zaman kısıtlaması az olan ve akış alanı için detaylı bilgi sunabilme özelliğindedir. Sayısal çalışmalar 1970'ten itibaren süper bilgisayarların ortaya çıkmasıyla gelişmeye başlamış ve deney yapma yerine artık sayısal çözümler tercih edilir olmuştur.

Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD), diferansiyel akış denklemlerin sayısal olarak çözülmesi ile ilgilenen ve çözümün bilgisayar ortamında gerçekleşmesini sağlayan bir bilim dalıdır. HAD yirmi yıl kadar süredir mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda büyük bir role sahip olmuştur ve gelecek uygulamaların gelişmesinde de önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bugün, akış alanları sayısal olarak çözülüyor ve performans eğilim hesaplamaları yapılabiliyor. Bununla beraber, sayısal çözümlerin doğruluğu tam güvenilir değildir çünkü sayısal metodlar ve akış modelleme varsayımları deneysel doğrulamaya gereksinim duymaktadır.

HAD'ın geliştirilmesinde üç avantajdan biri deneysel araçlarla elde edilemeyen yeteneklerin elde edilmesidir. Örneğin deney amaçlı akış tünelleri duvarlara ve desteklere sahiptir ve bunlar gerçek akıştan farklı olarak akışa bazı sınırlamalar getirmektedir. Örneğin akış tünellerinde serbest akım düzensizlikleri laminar-türbülans geçişine neden olmakta bu da doğru analizi engellemektedir. Sayısal simülasyonlarda ise, bilgisayar hızı ve hafızası hariç, bu gibi sınırlamalar yoktur. Ayrıca bilgisayar hızı ve hafızası sınırlamaları da zamanla azalma göstermektedir. İkinci avantaj enerji tasarrufu ile ilgilidir. Büyük akış tünelleri için büyük miktarda elektrik enerjisi harcanırken buna karşılık bilgisayarların harcadıkları hiçbirşey'dir. Üçüncü avantaj ise ekonomi ile ilgilidir. Bilgisayar simülasyonlarına harcanan masraflar her geçen gün azalırken deneysel

harcamalar ise çok daha fazla olmaktadır. HAD ile deneylerde elde edilmesi çok masraf gerektiren detaylı bilgi kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu avantajlar ile HAD mühendislik dizaynlarında güçlü bir çözüm metodu olarak yerini almıştır [21].

Sayısal çalışmada, akış alanı çok küçük boyuttaki elemanlara ayrılır. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında bağlıdır. Bu şekilde, akış alanı, çok büyük sayıda düğüm noktalarından oluşmuş, bir ağ sistemi haline gelir. Ağ elemanları ağdan bağımsız çözüm elde edilinceye kadar boyutları küçültülür. Ağ elemanları oluşturulduktan sonra akış alanı için sınır şartları, uygulanacak metodlar ve akış özellikleri girilir. En sonunda her eleman için Navier-stokes denklemleri yazılır ve çözüm matrisi elde edilir. Oluşan matrisin bilgisayar ortamında çözülmesiyle akış alanı içerisindeki tüm elemanların hız, basınç ve sıcaklık gibi akış özellikleri elde edilir. Bu veriler ile akış özellikleri bilgisayar ekranında görsel olarak simule edilebilmektedir.

Sayısal simülasyonlar bilgisayarda üç adımda gerçekleşir. Bunlar ön işleme (preprocessing), hesaplama (solution) ve ard işlemedir (post processing). Ön işlemede, akış alanı geometrisi oluşturulur ve çeşitli ağ oluşturma programları ile geometriye ağ atılması sağlanır. Hesaplama adımı ise, uygun sayısal yöntemler, uygun algoritmalar, akış özellikleri ve sınır şartları belirtilir ve sonra hesaplama alanı ağ çözücü program ile çözülür. Ard işlemede ise hesaplamada elde edilen verilerin incelenmek üzere üç boyutlu görüntü ve animasyonlara dönüştürülmesi, grafik ve tablo olarak değerlendirilmesi yapılır.

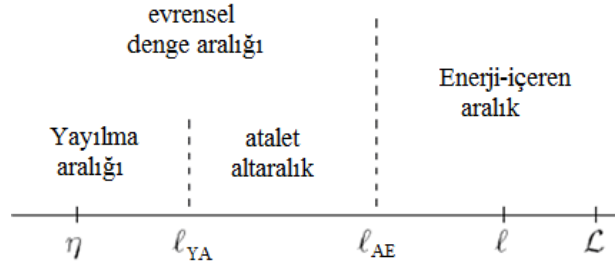
Türbülanslı akışların çözümünde çeşitli türbülans çözme yöntemleri geliştirilmiştir. Akış alanının çözümünde kullanılacak bu türbülans yöntemlerden uygun olanın seçilmesi için problem uygulama alanının ve fiziksel alt yapısının iyi bilinmesi gerekir. Bu yüzden aşağıdaki bölümlerde türbülans çözme yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

2.2. Türbülans Modelleme

Türbülans hipotezine göre, ortalama akıştan alınan enerji en büyük girdap hareketinden en küçük girdap hareketine aktarılır ve en küçük girdap hareketleri bu enerjiyi moleküler düzeydeki ısı enerjisine dönüştürür.

Kolmogorov, türbülans enerji spektrumunu eddy'lerin dalga boylarına ayırır. Kolmogorov hipotezinde enerji spektrumu üç kısma ayrılır: enerji içeren aralık ve evrensel denge aralığıdır. Evrensel denge aralığı ise ataletsel alt aralık ve yayılma aralığından

oluşmaktadır. Bu kısımlamadaki önemli olan şey evrensel denge aralığında bulunan türbülans hareketlerin izotropik bir özelliğe sahip olmasıdır [2]. Enerji spektrumunun şekilsel ayrımı ise Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Türbülans enerji spektrumundaki aralıklar

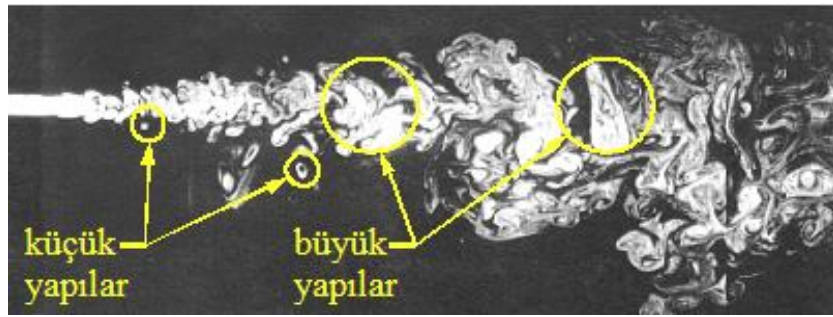
Gerçekte bu enerji spektrumu, aşağıdaki bölümlerde verilecek olan türbülans modelleme tekniklerini değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır.

2.3. Sayısal Simulasyonlar

Türbülans harekete yaklaşımın en basit yolu zaman içerisinde Navier-stokes denklemlerini sayısal olarak simule etmektir. Türbülans hareketin simule edilmesinde türbülans hareketin tüm enerji spektrumu çözülmüş olmalıdır ve türbülans hareket hakkında her detaylı bilgi öğrenilmelidir. Bu yaklaşıma DNS denir. Bununla beraber bu çok zor bir işlemdir. Türbülans hareket, en büyük " l " uzunluk ölçeğinden kolmogorov ölçüsü " η "'e kadar, çok büyük ve çok küçük hareket ölçeklerini içermektedir. Tüm bu ölçeklerin çözümü, çok yüksek çözünürlüklü bir ağ ve çok yüksek bir bilgisayar hızı gerektirmektedir. Şimdiki süper bilgisayarlarla bile ancak sınırlı DNS hesaplamaları yapılabilmektedir. DNS ile çözümler 10000'i geçmeyen Reynolds sayılı akışlarla sınırlı kalmış ve hesaplama zamanı halen 200 saat mertebesinde altındadır. Bilgisayar hızının her yılda iki katına çıktığı varsayıldığında 2080 yılında 7×10^7 gibi bir Reynolds sayısına sahip kanat etrafındaki akışın DNS hesaplamalarının yapılabileceği tahmin edilmiştir [43]. Bu yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle DNS yöntemi ancak bilimsel araştırmalarda ve türbülans modellerinin test edilmesinde kullanılabilir.

Uzun hesaplama zamanı akışların çoğunda DNS'yi uygulama dışı yapmıştır. Bu durumda Kolmogorov hipotezine gerek duyulmuştur. Daha önceki kısımda açıklandığı gibi

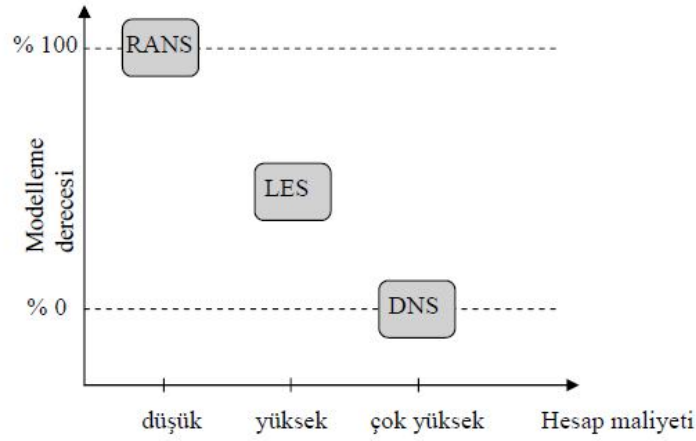
türbülans hareketin küçük ölçekli yapıları evrensel ve izotropiktir. Bu yüzden DNS çözümlerinde zamanın çoğunluğu küçük ölçekli hareketlerin simulasyonuna harcanmaktadır. Türbülansın büyük ölçekli hareketlerini sayısal olarak çözmek ve küçük ölçekli hareketlerini de modellemek iyi bir fikir olmaktadır. Bu tekniğe Büyük Eddy Simulasyonu denir. Yabancı literatürde kısaca LES denir. Bu amaçla, Navier-Stokes denklemleri frekans sahası içerisinde yazılmıştır. Büyük ölçekli yapılar (düşük frekanslı ve yüksek dalga boylu olanlar) frekans sahası içerisinde değerlendirilirken küçük ölçekli yapılar (yüksek frekanslı ve düşük dalga boylu yapılar) ise filtrelenir ve RANS türbülans modelleri ile hesaplanır.



Şekil 2.2. Akışa enjekte edilen bir boyanın dağılmasında küçük ve büyük türbülans hareketlerin görselleştirilmesi [43]

Eğer enerji spektrumun büyük bir kısmı filtre edilirse, LES metodu çok büyük eddy simulasyonu olur çünkü sadece çok büyük eddy'ler çözülmüş ve geri kalanları modellenmiş olur. Eğer enerji spektrumun büyük bir kısmı çözülürse LES metodu DNS çözümüne yaklaşmış olur. Bugün DNS ile çözümü imkansız olan yüksek Reynolds sayılı kompleks akışlar LES ile çözülebilmektedir. LES çözümdeki yüksek hesaplama maliyeti de LES yöntemini bilimsel araştırmalarla sınırlı bırakmıştır.

Bugün RANS denklemlerinde bulunan Reynolds gerilmelerini modelleyerek türbülanslı akışları çözen ve endüstriyel uygulamalarda da sıkça kullanılan pek çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu modellere RANS türbülans modelleri denir. Modelleme derecesi ve hesaplama maliyeti yönünden bu üç sayısal metodun karşılaştırılması ise Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

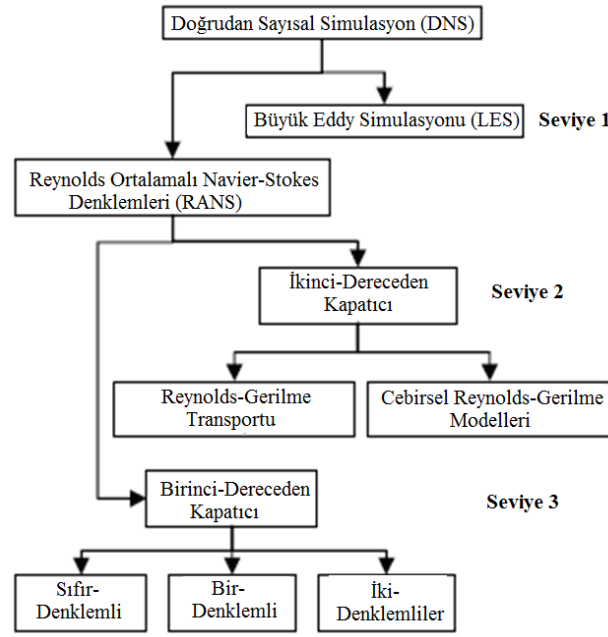


Şekil 2.3. Sayısal üç türbülans çözme metodunun hesaplama maliyeti ve modelleme derecesi yönünden karşılaştırılması

2.4. RANS Çözümlerin Temeli

RANS denklemlerinde oluşan Reynolds gerilmelerini modellemek için bir çok teori gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en önemlilerden biri de Joseph Boussinesq tarafından ortalama hız gradyeni cinsinden ifade edilen ve denklem (1.19)'da verilen bağıntısıdır. Bu bağıntıda önemli olan bir akışkan özelliği olmayan türbülans viskozitesinin modellenmesidir. Bu nedenle türbülans gerilmesini hesaplamak için türbülans viskozitesini bulmaya yönelik birçok türbülans modeli geliştirilmiştir.

RANS denklemlerindeki Reynolds gerilmelerin çözümü iki yöntemle gerçekleşmektedir. Bu yöntemlere birinci dereceden kapatıcı ve ikinci dereceden kapatıcı problemler denir. Birinci dereceden kapatıcı problemlerde Boussinesq hipotezi kullanılırken ikinci dereceden kapatıcı problemlerde ise Boussinesq hipotezi kullanılmaz yerine her Reynolds gerilme bileşeni için ayrı bir transport denklemi yazılır. Türbülanslı akışların çözümünde kullanılan tüm sayısal yöntemler ve RANS türbülans modelleri Şekil 2.4'te sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.4. Türbülans modelleme seviyeleri

Şekil 2.4'te verilen türbülans çözüm yöntemlerinin matematiksel temelleri ve uygulama alanları ise aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.5. RANS Modelleri

2.5.1. İkinci Dereceden Kapatıcı Modeller

İkinci dereceden kapatıcı modellere "*Reynolds Gerilme Modelleri*" denir. Bu modeller *Boussinesq hipotezini* kullanmaz yerine Reynolds gerilmelerin her bileşeni için ayrı bir transport denklemi yazarak doğrudan Reynolds gerilmelerini çözerler. Bu nedenle bu modellerin sayısal çözümünde bilgisayar işleme zamanı büyük olmaktadır. Reynolds gerilmelerinden herhangi biri için yazılan bu transport denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w} \rho u'v') - \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} \rho C_s \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} \right] \\
 = -P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \varepsilon + \Phi_{ij} + P_{ij,b}
 \end{aligned} \quad (2.1)$$

burada P_{ij} ve $P_{ij,b}$ sırasıyla Reynolds gerilmelerin kayma ve kaldırma türbülans üretim terimleri, Φ_{ij} basınç-gerinim tensörü, δ kroneker delta ve C ise model sabiti olmaktadır. P_{ij} , $P_{ij,b}$ ve Φ_{ij} terimleri modellenerek hesaplanır ve denklemdeki yerlerine yazılırlar. Denklemde görülen türbülans yayılma oranı ε için de ek bir transport denklemi oluşturulur ve çözüm tamamlanmış olur.

2.5.2. Birinci Dereceden Kapatıcı Modeller

Birinci dereceden kapatıcı modeller Boussinesq hipotezini kullanırlar. Bu modellerde amaç türbülans viskozitesini modelleyerek Reynolds gerilmelerini hesaplamaktır. Türbülans viskozitesinin çözümü için pek çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu modeller sıfır denklemliler, bir denklemliler ve iki denklemliler olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Sıfır ve bir denklemliler modeller basittir, hızlı sonuç üretirler, doğrulukları ise düşük olmaktadır. İki denklemliler modeller ise komplekstir, daha geç sonuç üretirler, doğrulukları ise yüksek olmaktadır. Burada tüm türbülans modellerin matematiksel çözüm formülasyonlarını vermek yerine sadece tezin sayısal çalışmasında kullanılacak olan k-omega ve LES sayısal yöntemlerin matematiksel formülasyonları verilmiştir.

2.5.2.1. Sıfır Denklemliler Modeller

Mevcut türbülans modelleri arasında en basit ve en hızlı sonuç veren modeldir. Bu modelde sabit bir türbülans viskozitesi tüm akış alanı için hesaplanır. Türbülans viskozitesi türbülans hız ölçeği (u_t) ve Prandtl ve Kolmogorov tarafından önerilen türbülans uzunluk ölçeğinin (l) bir ürünü olarak aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$\mu_t = \rho f_\mu u_t l \quad (2.2)$$

Burada, f_μ oransal bir sabittir. Bağlantıda yer alan uzunluk ölçeği ise aşağıdaki bağlantı ile hesaplanmaktadır.

$$l = (V_D^{1/3}) / 7 \quad (2.3)$$

burada V_D akış alanı hacmidir. Bu model az fiziksel temele sahip olduğundan önerilmemektedir.

2.5.2.2. Bir Denklemlilik Model

Bu modele Spalart-Allmaras modeli denir. Bu modelde türbülans viskozitesi aşağıdaki formülasyonla modellenmiştir.

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (2.4)$$

Burada $\square$ transport değişkenidir. Bu Modelde, $\square$ yakın-duvar bölgesi dışında türbülans kinematik viskozitesine benzerdir. f_{v1} viskoz sönümlleme fonksiyonudur ve bir transport denklemi ile modellenmektedir.

Spalart-Almaras modelinde tek transport denklemi kullanılarak türbülans viskozitesi çözüldüğünden tek denklemlilik türbülans modeli denilmiştir. Spalart Almaras modeli, özellikle duvar-sınırlı akışları içeren havacılık uygulamaları için tasarlanmıştır [1].

2.5.2.3. İki Denklemlilik Türbülans Modelleri

İki denklemlilik modeller de Boussinesq hipotezine dayalıdır. Bu modeller, hesaplama doğruluğu ve sayısal çaba arasında iyi bir uyuma sağladıklarından çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu modellerde iki ayrı transport denklemi oluşturulur. Bu yüzden iki denklem ifadesi kullanılmıştır. İki denklemlilik modeller k-ε (k-epsilon) ve k-ω (k-omega) olarak iki farklı şekilde modellenmiştir.

a) k-omega Modeli

k-omega modelinin avantajlarından biri düşük-Reynolds sayılı hesaplamalar için yakın-duvar işlevinin olmasıdır. Düşük Reynolds sayılı demek duvara yakın laminar alt tabakadaki hız düşüktür ve bu yüzden bu hız ile hesaplanan Reynolds sayısı düşük olmaktadır. Bu modellerde duvara yakın sınır tabaka, duvar fonksiyonları işletilmeden, yüksek çözünürlüklü ağ ile çözüldüğünden (laminar alt tabakanın çözülmesi) bu gibi

modellere düşük Reynolds sayılı modeller denilmiştir. k-omega modeli, türbülans viskozitesini türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans frekansı (ω) ile ilişkilendirerek aşağıdaki gibi modellemiştir.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.5)$$

Bağıntıda yer alan türbülans kinetik enerjisi ve türbülans frekansı iki ayrı transport denklemi ile hesaplanır.

k-denklemini:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} k) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k - \dot{\beta} \rho k \omega + P_{kb} \quad (2.6)$$

ω -denklemini:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \omega) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \dot{\beta} \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (2.7)$$

P_{kb} ve $P_{\omega b}$ kaldırma kuvvetlerinin etkisini göstermektedir. P_k ise viskoz kuvvetler nedeniyle oluşan türbülans üretimini göstermektedir ve aşağıdaki bağıntı ile modellenmektedir.

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \left(3 \mu_t \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \rho k \right) \quad (2.8)$$

Model sabitleri ve değerleri ise aşağıda verilmiştir.

$$\dot{\beta} = 0.09 \quad \alpha = 5/9 \quad \beta = 0.075 \quad \sigma_k = 2 \quad \text{ve} \quad \sigma_\omega = 2$$

Eğer tam kaldırma modeli kullanılıyorsa, kaldırma üretim terimi (P_{kb}) aşağıdaki gibi

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.9)$$

eğer Boussinesq kaldırma modeli kullanılıyorsa P_{kb} aşağıdaki gibi

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \rho \beta g_i \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.10)$$

modellenmektedir. P_{ob} ise P_{kb} 'nın bir oranı olarak varsayılır ve aşağıdaki ilişkiyle hesaplanmaktadır.

$$P_{ob} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1) C_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb}) \quad (2.11)$$

Geçerli model sabitlerinin değerleri ise aşağıda verilmiştir.

$\sigma_\rho = 0.9$ Boussinesq kaldırma modeli için

$\sigma_\rho = 1$ Tam kaldırma modeli için yayılma katsayısı $C_3 = 1$

k-omega modelindeki eksikliklerin giderilmesi ve özel durumların çözümü için iyileştirilmiş yeni k-omega modelleri oluşturulmuştur. Bunlar Baseline (BSL) k-omega ve shear stress transport (SST) k-omega modelleridir.

b) k-epsilon Modeli

Bu modelde k türbülans kinetik enerjisidir ve epsilon (ε) ise türbülans eddy yayılma oranıdır. k-epsilon modeli türbülans viskozitesini, türbülans kinetik enerjisi ve yayılma oranının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi modellemiştir.

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

burada c_μ model sabitidir. Bağlıntıdaki k ve ε değerleri k-omega modeline benzer iki ayrı diferansiyel transport denklemi ile modellenerek hesaplanır.

2.6 Büyük Eddy Simulasyonu

LES temelindeki gerçeklik büyük ve küçük ölçekli yapıların ayrılmasıdır. LES, türbülanslı akışlarda büyük ölçekli yapıları doğrudan çözerken akış alanı içerisinde izotropik bir davranışa sahip olan küçük ölçekli yapıları ise modellemektedir. LES için temel denklemler RANS denklemlerinin akış alanı içerisinde filtrelenmesiyle elde edilir. Bunun için bir filtreleme fonksiyonu kullanılır. Filtreleme fonksiyonu, hesaplamadaki ağ boyutundan veya filtre genişliğinden daha küçük ölçekli yapıları filtreler. Sonuçlanan denklemler sadece büyük ölçekli hareketleri çözer. Bu filtreleme değişkeni aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\tilde{\Phi}(x) = \int_D \Phi(x') G(x; x') dx' \quad (2.13)$$

Burada D akış alanıdır ve $G(x; x')$ ise çözülen eddy'lerin ölçeklerini hesaplayan bir filtreleme fonksiyonudur. $\tilde{\Phi}$ ise filtrelenen küçük ölçekli eddy'lerin alan değişkenlerini ifade etmektedir. Φ ise akış alanındaki tüm türbülans ölçeklerin alan değişkenlerini ifade etmektedir.

Burada ifade edilen filtre fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$G(x; x') = \{1/V, x' \in V\} \quad (2.14)$$

Burada V akış alanındaki sonlu kontrol hacmidir. Navier-Stokes denklemlerinin filtrelenmesi ek bilinmeyenlere neden olur. Aşağıda verilen teori sıkıştırılamaz akış denklemleri için özetlenecektir. Filtreli sıkıştırılamaz momentum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\tilde{u}\tilde{v}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial y} \quad (2.15)$$

burada τ_{ij} filtrelenmiş küçük çalkantıların Reynolds gerilmelerini göstermektedir. Bunlara altağ ölçek gerilmeleri veya yabancı literatürde SGS gerilmeleri denir. Filtreleme işlemiyle sonuçlanan SGS gerilmeleri bilinmiyor ve hesaplanması gerekir. SGS türbülans modelleri RANS modelleri gibi Boussinesq hipotezinden yararlanır ve aşağıdaki bağıntıdan SGS gerilmelerini hesaplar.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\mu_t \tilde{S}_{ij} \quad (2.16)$$

Burada μ_t SGS türbülans viskozitesidir ve μ_{sgs} olarak da gösterilir. SGS gerilmelerinin izotropik kısmı olan τ_{kk} modellenmez, fakat filtrelenmiş basınç terimine eklenir. $\tilde{S}_{ij}$ çözülen ölçekler için gerinim oranı tensörüdür ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

SGS viskozitesinin çözümü için dört farklı model önerilmektedir. Bunlar Smagorinsky modeli, Dinamik Smagorinsky-Lilly Modeli, WALE modeli ve Kinetic-Energy transport modelidir. Bu modellerin SGS viskozitesini bulmaya yönelik teorileri ise aşağıda açıklanmıştır.

2.6.1 Smagorinsky Model

Bu basit model, ilk, Smagorinsky tarafından önerilmiştir. Smagorinsky SGS viskozitesini aşağıdaki gibi modellemiştir.

$$\mu_{sgs} = \rho L_S^2 |\tilde{S}| \quad (2.18)$$

burada L_S SGS 'ler için karışım uzunluğudur ve $|\tilde{S}| = \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}}$ ' dir. L_S aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_S = \min(\kappa y, C_S \Delta) \quad (2.19)$$

Burada κ vonkarman sabiti, y duvara çok yakın mesafe ve C_S Smagorinsky sabitidir. Δ yerel ağ ölçeğidir. Δ , kullanılan hesaplamalı hücre hacmine göre belirlenir.

$$\Delta = V^{1/3} \quad (2.20)$$

Smagorinsky, türbülans spektrumundaki atalet altaralığında bulunan homojen izotropik türbülans için C_S değerini 0.17 olarak çıkarmıştır. Fakat bu değer bazı akış bölgelerinde yetersiz olduğu bulunmuştur. Kısacası C_S katsayısı evrensel bir sabit değildir ve bu modelin en ciddi eksikliği olmuştur. Üstelik duvara yakın sönümleme fonksiyonlarına ihtiyaç duymaktadır ve bunun için duvar sönümleme fonksiyonu geliştirilmiştir. Bununla birlikte 0.1 civarındaki C_S değerinin geniş bir aralıktaki akışlar için iyi sonuçlar ürettiği bulunmuştur.

Duvar Sönümleme:

Duvarlara yakın SGS viskozitesinin sönümlenmeye bağlı fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\mu_{sgs} = \min(l_{kar} f_\mu, C_S \Delta)^2 \sqrt{2 \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}} \quad (2.21)$$

$$l_{kar} = \kappa \cdot y \quad (2.22)$$

Burada " l_{kar} " karışım uzunluğudur. C_S ve κ ayarlanabilen sabitlerdir; geçerli değerleri, sırasıyla, 0.1 ve 0.4'tür. Genelde, sönümleme fonksiyonu $f_\mu = 1$ ' dir. Van Driest ve Piomelli iki ayrı sönümleme fonksiyonu önermiştir. Bu sönümleme fonksiyonları arasında pek fark olmadığından LES türbülans modeli seçiminde Van Driest veya Piomelli duvar sönümleme fonksiyonlarından herhangi birisi seçilebilir.

Germano ve sonradan Lilly, C_S 'yi türbülans hareketin çözülen ölçeklerinden sağlanan bilgiyle dinamik olarak hesaplanabileceği bir metod geliştirmişlerdir. Bu metoda Dinamik Smagorinsky-Lilly modeli denir. Bu modelin matematiksel yaklaşımı ise aşağıda açıklanmıştır [1].

2.6.2 Dinamik Smagorinsky-Lilly Modeli

Dinamik metodun kavramı hareket denklemlerine ikinci bir filtre (test filtresi) uygulamaktır. Yeni filtrenin genişliği ($\hat{\Delta}$) SGS filtresinin (Δ) iki katıdır. Her iki filtreyle çözülen akış alanları arasında boyutları iki filtre arasında olan küçük ölçekler kalmaktadır. Bu ölçeklerle alakalı bilgi, C model sabitini hesaplamak için kullanılır. Dinamik Smagorinsky-Lilly Modeli Smagorinsky eksiklikleri gidermekle birlikte çözüm için geçen zamanı diğer modellere göre çok daha artırmaktadır.

2.6.3 Wale Modeli

Duvar adapteli yerel eddy-viskozite modeli yerel olarak formüle edilir ve sgs viskozitesini hesaplamak için aşağıdaki bağıntıyı kullanır.

$$\mu_{sgs} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (2.23)$$

burada S_{ij}^d tensörü, gerinim oranı $\tilde{S}_{ij}$ ve çevrinti tensörü $\tilde{\Omega}_{ij}$ cinsinden hesaplanmaktadır. Çevrinti tensörü ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} - \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \right) \quad (2.24)$$

Bu model Dinamik Smagorinsky-Lilly modeli kadar avantaj sağlar ve aynı zamanda ikinci bir filtreye gerek duymaz. C_w sabitinin genel geçerli değeri 0.5 seçilmiştir ve geniş bir aralıktaki akışlar için tatmin edici sonuçlar verdiği bulunmuştur. Wale modeli laminardan türbülansa geçişteki akışlar için geliştirilmiş bir modeldir

2.6.4. Kinetik-Enerji Transport Modeli

Bu model altağ filtresinden küçük ölçeklerin türbülans kinetik enerjisini hesaplayarak sgs viskozitesini aşağıdaki gibi hesaplamaktadır.

$$\mu_{sgs} = C_k k_{sgs}^{1/2} \Delta \quad (2.25)$$

Burada k_{sgs} SGS'lerin kinetik enerjisidir ve kendisi için bir transport denklemi yazılarak hesaplanır. C_k ise denklem sabitidir ve dinamik olarak hesaplanır.

2.7. Türbülans Modellerin Uygulama Alanları

Türbülanslı akışların çözümünde DNS, LES ve RANS çözüm yöntemleri kullanılabilir. Bu üç yöntem türbülanslı boru akışlarının çözümünde kullanılabilir. Gelişen boru akışında laminar-türbülans geçişi olduğundan akışın bir kısmı laminar iken kalan kısmı ise geçiş ve türbülanslı olmaktadır. Mevcut türbülans modelleri ise sadece türbülanslı akışları çözer. Bazı algoritmalar kullanılarak mevcut modellerin laminar-türbülans geçiş akışlarını çözümleyebilmeleri sağlanmıştır. Laminar-türbülans geçiş akışı sadece boru akışında tek değil aynı zamanda bir silindirin etrafındaki akışta, uçak veya türbin kanadı üzerindeki akışlarda oluşabilmektedir. Bu gibi elemanların üzerindeki akışlar önem arz ettiğinden bu tür modellerin geliştirilmesine neden olmuştur.

Akışların sayısal çözümünü yapan ve sonuçların simulasyonunu sağlayan HAD yazılımlarına sahip pek çok akış programı geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanları FLUENT ve CFX programlarıdır. FLUENT ve CFX programları türbülanslı akışlar için LES, RANS ve LES-RANS hibrit çözüm yöntemleri kullanabilmektedir. FLUENT hücre merkezli işlem yaparken CFX düğüm odaklı işlem yapmaktadır. CFX, FLUENT'e oranla daha çok gelişmiş olduğundan ve iç akışlarda daha iyi sonuçlar ürettiğinden boru akışlarının çözümü için tercih edilmiştir.

CFX programında türbülanslı akışların çözümü için kullanılan türbülans modelleri aşağıda sınıflandırılmış, özellikleri ve kullanım alanları ise ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Turbülans Modelleri:

1) RANS Modeller

a) Eddy-viskozite Modelleri

- sıfır denklemlerli model
- spalart almaras modeli (bir denklemlerli model)
- Standard k-ε modeli
- RNG k-ε modeli

- Standard k- ω modeli
- Baseline (BSL) yerel k- ω modeli
- SST yerel k- ω modeli

b) Reynolds-Gerilme Modelleri (RSM)

- Launder, Reece and Rodi üretim izotropizasyon modeli (LRR Reynolds gerilmeleri)
- Launder, Reece and Rodi sanki-izotropik modeli (QI Reynolds gerilmeleri)
- Speziale, Sarkar and Gatski Modeli (SSG Reynolds gerilmeleri)
- SMC- k- ω modeli (Omega Reynolds gerilmesi)
- Baseline (BSL) Reynolds gerilme modeli
- Explicit cebirsel Reynolds Gerilme Modeli (EARS)

2) Hibrid Modeller

- LES
- Detached Eddy Simulasyonu (DES)
- Scale-Adaptive Simulasyonu (SAS)
- Kaldırma kuvveti Türbülans Modeli

2.7.1 Laminar Akış Çözüm

Laminar akışlar Navier-Stokes denklemleri tarafından yönetilir. Laminar akışın simülasyonu için bir türbülans modeli gerekmez. Sadece düşük Reynolds sayılı akışlara uygulanır (boru akışı için laminar akış rejimi $Re < 2000$ 'dir.). Çözücü programda "Output" dosyasında maksimum Reynolds sayısının laminar akış rejiminde olup olmadığı daima kontrol edilmelidir. Eğer laminar akış için simülasyon kurulmuşsa, fakat gerçek akış türbülanslı ise, yakınsama zordur ve simülasyon gerçek çözüme ulaşmaz.

2.7.2 Sıfır Denklemler Model

Sıfır denklemler model kullanımı basittir, çok kısa zamanda yaklaşık sonuçlar üretebilir, ve yüksek ileri türbülans modelleri kullanan simülasyonlar için iyi bir başlangıç tahmini sağlar. Bu modelde tüm akış alanı için sabit bir türbülans viskozitesi hesaplanır. Eğer kullanıcı tarafından bir türbülans viskozitesi belirtilmemişse, bu değer çözücünün

hesaplanan değeri yerine kullanılır. Akış problemlerin son sonuçlarını elde etmek için bu model kullanılmamalıdır.

2.7.3 Bir Denklemlı Model (Spalart Almaras Model)

Spalart Almaras modeli çözüm için tek transport denklemini kullanan basit tek denklemlı bir modeldir. Bu model özellikle duvar sınırlı akışları içeren havacılık uygulamaları için geliştirilmiştir. Bu yüzden zıt basınç gradyanına sahip sınır tabakalarda iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Aynı zamanda turbo makinalarda da önem kazanmaya başlamıştır. Orjinal formu olarak; düşük Reynolds sayılı bir modeldir.

2.7.4 k-epsilon Modelleri

En çok vaat veren türbülans modellerinden biri olan k-epsilon modeli endüstrinin standart bir modelidir. Duvar sınırlı akışlarda doğruluğu ve sağlamlığı sağlamak için k-ε modeli ölçülebilir duvar fonksiyonlarını kullanmaktadır. Bu duvar fonksiyonlarının geçerli olabilmesi için boyutsuz duvar mesafesinin $y^+ < 300$ olması veya sınır tabaka içerisinde duvar normalı boyunca minimum 10 tane düğüm noktasının bulundurulması istenir. Bu model, sınır tabakanın duvar fonksiyonlarıyla çözülmesini sağlayan bir modeldir. Bu nedenle sınır tabakanın doğrudan çözülmesinin gerekmediği akış türlerinde çabuk çözüm sağlar. Bu modellerin uygun olmadığı bazı uygulamalar ise aşağıda verilmiştir.

- sınır tabaka ayrılmalarının gerçekleştiği akışlar
- ani değişimli akışlar
- çevrintili akışlar
- eğik yüzeyler üzerindeki akışlardır.

k-epsilon modellerinden biri olan RNG k-epsilon Modeli ise standart k-ε modeline karşı bir alternatiftir. Genelde standard k-ε modeliyle karşılaştırıldığında az iyileşme sağlamıştır.

2.7.5 k-omega Modelleri

Türbülans modellemede ana problemlerden biri pürüzsüz bir yüzeyden akış ayrılmasının doğru tahmin edilmesidir. Standart k-ε modelleri zıt basınç gradyanına sahip

akışlarda yüzeyden akış ayrılmasının miktarını ve yerini tahmin etmede yetersiz kalmaktadır. Akış ayrılması ise pek çok teknik uygulamada önemli bir yer alır, özellikle uçak aerodinamiğinde, çünkü bir uçağın uçuşu kanatlardan akış ayrılması ile kontrol edilmektedir. Bu sebepten, aerodinamik topluluğu bu uygulama için çok sayıda ileri türbülans modeli geliştirmiştir. Geliştirilen yeni modeller çok sayıdaki testte ve endüstriyel uygulamalarda ayrılmayı önemli bir şekilde doğru tahmin etmişlerdir. Ayrılmanın tahmin edilmesi pekçok teknik uygulamada hem iç ve hem de dış akışlarda çok önemli olmaktadır.

Bu alanda en çok vaat veren iki denklemlili modeller k - ω (k- ω) formülasyonuna sahip modelleridir. Bu model k -epsilon modeli için gerek duyulan kompleks doğrusal olmayan sınımlama fonksiyonlarını içermediğinden daha doğru ve daha sağlam olmaktadır. Düşük Reynolds sayılı k - ω modeli $y^+ < 2$ olacak şekilde yakın duvar çözünürlüğüne gerek duyar. k - ω formülasyonun avantajlarından biri yakın duvar işlevidir. Bu işlev, düşük Reynolds sayılı formdan duvar fonksiyonlarına geçişi düzgün bir şekilde sağlamaktadır. Kısacası yüksek çözünürlüğe sahip duvar sınırlı akışlarda doğrudan çözüm sağlarken kaba ağırlara sahip duvar sınırlı akışlarda ise duvar fonksiyonlarını işletir. Wilcox modelinden sonra iki k - ω modeli daha geliştirilmiştir. Bunlar:

- Baseline (BSL) k -Omega Modeli ve
- Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) k -Omega modelidir.

2.7.5.1 Baseline (BSL) k -Omega Modeli

Bu model Wilcox modelinde oluşan problemi gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Modelin problemi, serbest akım koşullarına güçlü hassasiyetidir. Akış girişinde ω 'ya atanan değer, bu modelin sonuçlarında önemli değişimlere neden olabilmektedir. Bu istenmeyen bir durumdu ve çözülmesi gerekirdi. Bu yüzden Menter tarafından k - ω modeli ve k - ϵ modeli arasında bir duvar mesafe fonksiyonu geliştirildi. Bu geçiş fonksiyonu ile sınır tabaka içerisinde k - ω formülasyonu ve sınır tabaka dışındaki bölgede ise k - ϵ formülasyonu kullanılması sağlanmıştır.

2.7.5.2 Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) k-Omega modeli

SST k- ω modeli, eddy viskozite formülasyonuna transport etkilerini dahil etmesiyle akış ayrılmasının yerini ve miktarını yüksek doğrulukta tahmin etmek için tasarlanmış bir modeldir. BSL modeli Wilcox ve k- ϵ modellerin avantajlarını birleştirirken pürüzsüz yüzeylerden akış ayrılmasını ise doğru olarak tahmin edememektedir. SST k- ω modeli ise akış ayrılma tahminlerinde büyük bir iyileşme sağlamıştır. Bu modelin mükemmel performansı çok sayıdaki uygunluk çalışmalarıyla ispatlanmıştır. SST k- ω modeli yüksek doğruluk gerektiren sınır tabaka simulasyonları için önerilmektedir. Bu modelin yakın duvar işlevinden yararlanmak için sınır tabaka içerisinde minimum onbeş düğüm noktası bulundurulmalı veya en azından $y^+ < 2$ olacak şekilde duvara yakın ağ çözünürlüğü oluşturulmalıdır. Yine ayrıca bu modelin duvar fonksiyonlarından yararlanmak için $y^+ < 300$ olacak şekilde duvara yakın ağ çözünürlüğü oluşturulmalıdır.

2.7.6 Reynolds Gerilme Modeli

Reynolds Gerilme Modelleri Boussinesq hipotezini kullanmazlar fakat Reynolds gerilmelerinin her bileşeni için ve yayılma oranı için transport denklemi yazarak doğrudan Reynolds gerilmelerini çözerler. Reynolds gerilme modeli büyük akım yolu eğriliğine sahip ve çevrintili üç boyutlu kompleks türbülanslı akışlar için avantajlıdır. Fakat model daha komplekstir, yoğun hesaplamalıdır, eddy-viskozite modellerine göre daha zor yakınsamaktadır. Reynolds gerilme modeli aşağıda verilen akış türleri için düşünülebilir.

- Güçlü anizotropik viskoz etkilerin olmadığı akışlar, yani dönen akışlar
- Ortalama gerinim oranının ani değiştiği akışlar
- Gerinim alanlarının karmaşık olduğu akışlar
- Güçlü akım yolu eğriliğine sahip akışlar
- İkincil akışlar
- Kaldırma kuvvetlerinin etkili olduğu akışlar

Reynolds gerilme modelleri yukarıdaki durumlarda eddy viskozite modellerine karşın mükemmel tahmin performansı göstermiştir. Bu modelin kusuru matematiksel sistemlerle sonuçlanan yüksek derecedeki karmaşıklığıdır. Teorik olarak Reynolds gerilme modelleri

karmaşık akışlara daha uygundurlar, bununla birlikte, uygulamalar iki-denklemlili modellere karşı tamamıyla mükemmel olmadıklarını da göstermiştir.

2.7.7 Büyük Eddy Simulasyonu

Türbülanslı akışlar geniş bir aralığa sahip uzunluk ve zaman ölçeklerine sahiptirler. Büyük ölçekli eddy'ler küçük ölçekli eddy'lerden genelde daha enerjiktirler. En küçük eddy'ler ise türbülans kinetik enerjinin yayınımlından sorumludurlar. Türbülans spektrumundaki tüm ölçekleri DNS ile doğrudan çözmek mümkündür. Tüm aralıktaki ölçekleri çözmek için DNS'nin hesaplama maliyeti ise Re^3 oranında artmaktadır. Bu da DNS'yi düşük Reynolds sayılı basit akışların çözümünde sınırlı bırakmıştır. LES çözümde ise, büyük ölçekli eddy'ler DNS gibi doğrudan çözülür ve küçük ölçekli eddy'ler ise RANS ile modellenir. LES temelini oluşturan fikir aşağıda özetlenmiştir.

- Momentum, kütle, enerji çoğunlukla büyük eddy'ler tarafından taşınır.
- Büyük eddy'ler daha çok probleme bağımlıdır. Akışın içerdiği sınır koşulları ve geometrisi tarafında zorla oluştururlar.
- Küçük eddy'ler geometriye daha az bağımlıdır, izotropik olmaya daha fazla yönelimlidirler ve dolayısıyla daha evrenseldirler.
- Evrensel bir türbülans modeli bulma şansı küçük eddy'ler için çok daha yüksektir.

Sadece büyük eddy'leri çözmek, DNS' den farklı olarak, kaba ağ kullanılması anlamına gelir. Bununla birlikte LES, hala RANS hesaplamalarında kullanılan ağdan çok daha küçük boyuttaki ağlara gereksinim duyar. Ayrıca, akışın kararlı istatistiklerini elde etmek için LES uzun bir akış zamanı için yeterince çalıştırılmak zorundadır. Sonuç olarak, LES çözümün hesaplama maliyeti, gereken hafıza (RAM) ve bilgisayar işleme zamanı yönünden değerlendirildiğinde, daimi RANS hesaplamalarından kat be kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle LES ile yüksek performanslı hesaplama yapabilmek için paralel hesaplama veya yüksek başarımli bir bilgisayarın kullanılmasına gerek duyulmaktadır.

LES ile bir çözüme başlamadan önce onun en uygun çözüm yolu olup olmadığı düşünülmelidir. Eğer düşük Reynolds sayılı bir akışta ($Re < 500$) tüm türbülans ölçeklerin çözülmesi gerekiyorsa ve yeterli bir bilgisayar kapasitesi varsa DNS ile çözüm tercih

edilmelidir. Yüksek Reynolds sayılı akışlarda ise LES aşağıdaki durumlar için uygun görülebilir.

- Kararsız olacağı düşünülen akışlar, girdap yayanlar gibi
- Hortuma benzer yapıların etkisiyle kararsız olacağı düşünülen akışlar
- Kaldırma kuvvetinin etkili olduğu akışlar, alttan ısıtma ile oluşan dengesiz bölgeler veya daha ağır akışkan altında kalan daha hafif akışkanların hareketi gibi
- RANS yaklaşımının başarısız olduğu akışlar (örneğin yüksek anizotropik türbülans içerenler)
- Kimyasal reaksiyonlar veya mikro-karışma gibi küçük ölçekli işlemlerde küçük türbülans yapılarının görüntülenme ihtiyacı
- Akıştaki sesin hesaplanması
- Diğer dalgalı bilgiler gerekiyorsa (dalgalı basınç kuvvetleri gibi)

Boru akışında gelişen akıştaki türbülans çalkantıların görüntülenmesi ve türbülans özelliklerinin istatistikî değerlerinin hesaplanması için LES ile çözüm yapmak bu tez konusunu içerisinde olacaktır.

2.7.8 Ayrık Eddy Simulasyonu (DES)

Bu yöntemde RANS ve LES formülasyonları akış alanının ayrı bölgelerinde kullanılarak hibrid bir çözüm elde edilmiştir. Duvar sınırlı akışlarda sınır tabaka içerisindeki akış alanı RANS modelle çözülürken sınır tabaka dışındaki bölge ise LES ile çözülür. İkisi arasındaki sınır çizgisinin tahmini ise RANS çözümünden gelen bilgilerle olmaktadır. Burada, DES 'in LES üzerindeki tek avantajı yüksek Reynolds sayılarda bilgisayar işleme zamanını yüksek bir şekilde azaltmasıdır. DES metodu, RANS formülasyonunda k -omega SST modelini kullanır. Özellikle akış ayrılmalarının yüksek olduğu akışlarda ve duvar sınırlı yüksek Reynolds sayılı akışlarda DES tercih edilmektedir. DES aşağıda verilen mühendislik uygulamaları için tercih edilmektedir.

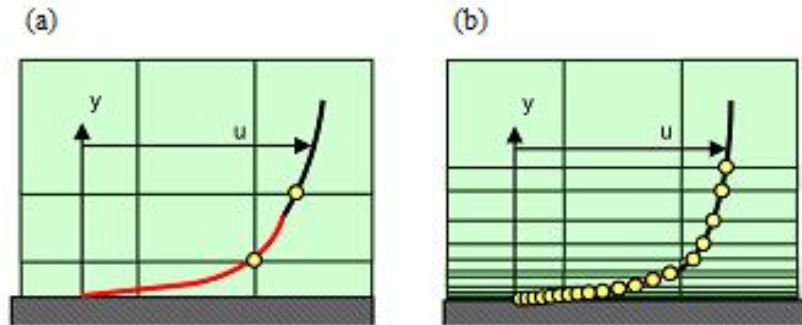
- Aerodinamik olmayan kütlelerin etrafındaki akış (bina, köprü gibi)
- Yerde giden araçların etrafındaki akış (araba, tren, kamyon gibi)
- Ses çıkaran nesnelerin etrafındaki akış (araba aynası gibi)

DES modeline benzer hibrit çözümler sağlayan başka modeller de geliştirilmiştir. Bunların modellenme derecesi azalan yönde sıralandığına URANS, SAS, DES ve LES sırasında gelmektedir.

2.8 Duvara Yakın Türbülans

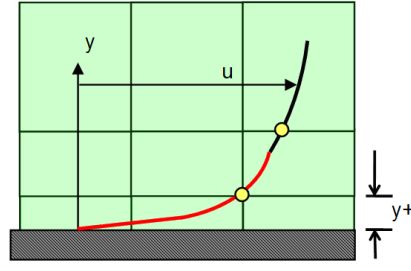
Duvara yakın hız profili önemlidir. Çünkü basınç düşüşü, akış ayrılması, kayma gerilmesinin etkileri gibi fiziksel olaylar sınır tabaka hız profili ile alakalıdır. Türbülans modelleri genelde sınır tabaka dışındaki akışları modellemeye yöneliktirler.

Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi tam gelişmiş türbülanslı hız profilleri sınır tabakayı dört bölgeye ayırmaktadır. Bunlar laminar alt tabaka, tampon tabaka, ürtüşme tabakası ve türbülanslı tabakadır. Bu tabakalardaki hız profilleri çeper yasası ve logaritmik yasa fonksiyonlarıyla tahmin edilebilmektedir. Bunlara duvar fonksiyonları denir. Bu yüzden duvar sınırlı akışlarda duvar fonksiyonlarının kullanılması simülasyon sağlamlığını ve doğruluğunu artırdığı gibi duvara yakın yüksek çözünürlüklü ağı oluşturmasını ortadan kaldırmaktadır. Şekil 2.5'te duvar fonksiyonlarının kullanılmasıyla duvara yakın daha az düğüme ihtiyaç duyulur.



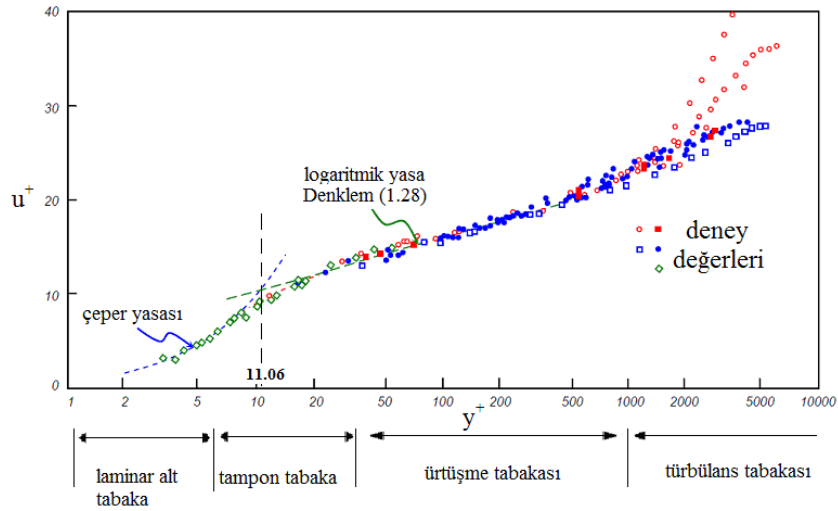
Şekil 2.5. Duvara yakın sınır tabakayı çözmek için duvar fonksiyonlarının kullanılması ve kullanılmaması halinde sınır tabakada oluşturulan düğüm noktaları (a) duvar fonksiyonları kullanıldı (b) duvar fonksiyonları kullanılmadı

Duvara yakın akışta hassas değerler istenmediği sürece veya sınır tabakanın önemsiz olduğu akışlarda duvar fonksiyonlarının kullanılması, simülasyonların doğruluğunu sağlayabilmektedir. Duvardan uzaklık mesafesi boyutsuz duvar mesafesiyle (y^+) ile ölçülür. y^+ ilk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesidir.



Şekil 2.6. İlk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesi

Duvar fonksiyonları sadece özel y^+ değerleri içerisinde geçerlidir. Eğer y^+ çok büyükse ilk düğüm sınır tabaka dışındadır ve duvar fonksiyonları akış alanı içerisinde çok uzakta etkili olacaktır. Eğer y^+ çok düşükse ilk düğüm sınır tabakanın laminar alt kısmına düşecektir ve bu tabakada duvar fonksiyonları geçerli değildir. Burada duvar fonksiyonları olarak sadece logaritmik yasa fonksiyonu kullanılmaktadır. Duvar fonksiyonları aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi çeper yasası ile logaritmik yasanın çakıştıkları noktadan ($y^+ = 11.06$) itibaren işletilmektedir. Bu nedenle laminar alt tabakaya düşen düğüm noktaları k-epsilon gibi modellerde boşuna atılan düğüm noktaları olmaktadır.



Şekil 2.7. Logaritmik yasa ve çeper yasasının çakıştıkları $y^+=11.06$ boyutsuz mesafe değeri

Bazı durumlarda, örneğin bir yüzeyden sınır tabaka ayrılması gibi, duvar fonksiyonları sınır tabaka profilini doğru tahmin etmez. Bu durumlarda duvar fonksiyonları kullanılmamalıdır. Yerine, doğrudan sınır tabakayı çözmek daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlar. İki denklemlili k- ϵ modeli, simülasyonlarında daima duvar fonksiyonlarını kullan-

maktadır. $k-\omega$ modelleri ise otomatik duvar işlevini kullanarak duvar fonksiyonlarını gerektiğinde çalıştırıp kapatabilmektedir. Bu modelde eğer duvara yakın yüksek çözünürlüklü ağ oluşturulmuşsa duvar fonksiyonları kullanılmaz doğrudan çözüm yapılır aksi takdirde duvar fonksiyonlarını kullanır. $k-\epsilon$ modellerinde duvar fonksiyonlarının geçerli olabilmesi için ilk düğüm noktası uzaklığının en azında $y^+ < 300$ olması gerekir. $k-\omega$ modellerinde ise yüksek duvar çözünürlüğünün geçerli olabilmesi için ilk düğüm mesafesinin $y^+ < 2$ olmasını gerektirmektedir aksi takdirde duvar fonksiyonları otomatik olarak devreye girmektedir. Duvara sınırlı akışlarda yüksek duvar çözünürlüğü istendiği durumlarda veya sınır tabakadan akış ayrılması gibi olan durumlarda $k-\omega$ modelleri tercih edilmelidir.

2.9 Sayısal Metotlar

Sayısal yöntemler, gerilme analizleri, hareket problemleri, ısı ve kütle akış problemleri, akışkan dinamiği, elektromanyetik gibi problemlerin çözümünde kullanışlı olmaktadır. Çünkü bu gibi problemler karmaşık sınır şartları, karmaşık geometriler ve doğrusal olmama gibi özelliklerinden dolayı analitik olarak çözümleri yapılamamaktadır. Yüksek hızlı bilgisayarların gelişmesi ile sayısal metodların kullanımı daha da güçlenmiştir. Bu gibi problemlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntemler ise aşağıda verilenlerdir.

- Sonlu Elemanlar Metodu (SEM),
- Sonlu Farklar Metodu (SFM),
- Sınır Elemanlar Yöntemi (SEY)
- Sonlu Hacim Yöntemi (SHY)

Bu yöntemlerden biri olan SFM, analitik olarak çözülemeyen kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Ansys akış çözücü programı olan CFX, akış problemlerin çözümünde kısmi diferansiyel denklemlere sahip süreklilik ve Navier Stokes denklemleri kullandığından sayısal çözümü SFM motodu ile yapmaktadır. Bu nedenle burada SFM'nin çözüm şekli anlatılacaktır. SFM kısmi diferansiyel denklemlere sahip ısı ve kütle akış problemlerin çözümünde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu metod dışında diğer sayısal metodlarla da ısı ve kütle akış problemleri çözülebilmektedir. Her metod çözülen problemin doğasına bağlı olarak kendi avantajına sahip olmaktadır. SFM 'yi öğrenmek çok kolaydır. Kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu fark gösteriminin basitli-

ğine rağmen, özel bir problem için uygun sonlu fark taslağını seçmek ise oldukça bilgi ve tecrübe gerektirmektedir.

2.9.1 Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Sonlu Fark Açılımı

Aşağıda ϕ değişkenine bağlı ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklem verilmiştir.

$$a \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \phi}{\partial x} + e \frac{\partial \phi}{\partial y} + f\phi + g = 0 \quad (2.26)$$

Bu tür kısmi diferansiyel denklemlerin SFM ile ayrıklaştırma işlemleri ise aşağıda açıklanmıştır.

2.9.2 Diferansiyel Denklemlerin Ayrıklaştırılması

Analitik olarak çözülemeyen problemlerde çözüm için, genelde, sayısal tekniğe başvurulur. Sayısal çözümde sonlu fark yaklaşımı kullanılırsa problem alanı ayrıklaştırılmış yani düğüm noktalarına ayrılmış olur. Kısmi diferansiyel denklemleri içeren türevleri ayrıklaştırmak için genelde iki yaklaşım kullanılır. Bunlar Taylor seri açılımı ve kontrol hacim yaklaşımıdır.

2.9.2.1 Taylor Seri Açılımı

$f(x)$ fonksiyonun x_o noktasında ileri ve geri verilen yönlerde Taylor seri açılımı aşağıdaki gibidir.

$$f(x_o + \Delta x) = f(x_o) + \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (2.27)$$

$$f(x_o - \Delta x) = f(x_o) - \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} - \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (2.28)$$

Bu iki yaklaşım türevin sonlu fark yaklaşımlarını geliştirmek için temel oluşturur. Yukarıdaki denklemler düzenlenirse, birinci türev için ileri, geri ve merkezi sonlu farklandırma yaklaşımları aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_o + \Delta x) - f(x_o)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{ileri}) \quad (2.29)$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_o) - f(x_o - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{geri}) \quad (2.30)$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_o + \Delta x) - f(x_o - \Delta x)}{2\Delta x} - O(\Delta x)^2 \quad (\text{merkezi}) \quad (2.31)$$

Burada $O(\Delta x)$ ve $O(\Delta x)^2$ Taylor seri açılımında işleme dahil edilmeyen diğer türevlerdir ve kesme hatası olarak anılır. Burada ileri ve geri farklandırma birinci dereceden, merkezi farklandırma ise ikinci dereceden doğruluğa sahip olmaktadır. Yani merkezi farklandırma diğer ikisine göre doğru sonuçlara bir kat daha hassas yaklaşmaktadır.

Taylor seri açılımından yararlanarak yine ikinci türevin ileri, geri ve merkezi farklandırması da bulunabilir

2.9.3 Sayısal Çözümler İçindeki Hatalar

Sayısal hesaplamalarda en çok karşılaşılan hatalar yuvarlama ve kesme hatalarıdır. Bunun yanında sonlu farklandırma taslağının yakınsaklığı, kararlılığı ve tutarlılığı da söz konusu hatalar arasında yer almaktadır. Yuvarlama hataları virgülden sonra gelen sayıların bir kaçının işleme alınıp gerisinin kesilmesiyle oluşan hatalardır. Sayısal hesaplamaların çokluğu milyonları geçince çok küçük görünen yuvarlama hataları artmaktadır ve bazı çözümlerde kayda değer olabilmektedirler. Kesme hataları ise Taylor seri açılımından türevlerin sonlu farklandırma gösteriminde hesaba katılmayan terimler kesme hatalarını oluşturmaktadır.

2.9.4 Cebirsel Denklemlerin Çözüm Kümesi Metotları

Sonlu farklandırma metodu kullanılarak kısmi diferansiyel denklemler ayrıklaştırılarak sonlu fark denklemlerine dönüştürülür. Sonlu fark denklemlerinin bir akış alanı için yazılabilmesi için akış alanı sonlu sayıda elemana veya düğüm noktasına bölünür. Her eleman için ayrı ayrı uygulanan sonlu fark denklemleri çok sayıda bilinmeyenli olan bir denklem kümesine dönüşür. Bu denklem kümesinin çözülmesiyle problem alanı içerisindeki değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri bulunmuş olur. Bu uygulamayı görmek için bir boyutlu boru akış denklemi, i ve j düğüm numaraları için, sonlu farklandırmaya açılabilir.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x} = \mu \frac{u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}}{(\Delta y)^2}$$
(2.31)

Burada $\Delta x = \Delta y = h$ alınırsa ve $i=1$ sabit tutulup "y" yönünde 1'den 3'e kadar j düğüm sayıları teker teker yerine yazılırsa aşağıdaki gibi çok bilinmeyenli denklem takımı elde edilir.

$$\begin{aligned} u_{1,0} - 2u_{1,1} + u_{1,2} &= \frac{h}{\mu} (P_{2,1} - P_{0,1}) & (i=1 \text{ ve } J=1 \text{ için}) \\ u_{1,1} - 2u_{1,2} + u_{1,3} &= \frac{h}{\mu} (P_{2,2} - P_{0,2}) & (i=1 \text{ ve } J=2 \text{ için}) \\ u_{1,2} - 2u_{1,3} + u_{1,4} &= \frac{h}{\mu} (P_{2,3} - P_{0,3}) & (i=1 \text{ ve } J=3 \text{ için}) \\ u_{1,3} - 2u_{1,4} + u_{1,5} &= \frac{h}{\mu} (P_{2,4} - P_{0,4}) & (i=1 \text{ ve } J=4 \text{ için}) \end{aligned}$$
(2.32)

Oluşan bu denklem takımının matris formunda yazılma biçimi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1,0} \\ u_{1,1} \\ u_{1,2} \\ u_{1,3} \\ u_{1,4} \\ u_{1,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{2\mu}(P_{2,1} - P_{0,1}) \\ \frac{h}{2\mu}(P_{2,2} - P_{0,2}) \\ \frac{h}{2\mu}(P_{2,3} - P_{0,3}) \\ \frac{h}{2\mu}(P_{2,4} - P_{0,4}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Buradaki matriks $[A][\phi] = [B]$ türünde bir matriks eşitliğidir. Burada A bilinen katsayı matriksi, ϕ bilinmeyene bağlı değişken matriksi ve B ise bilinenler matriksidir. Bilgisayar ortamında basınç alanı bilinen bir akış için hız alanı çözülür. Bu matriks denklem kümesinin çözümü doğrudan metodlarla veya iteratif metodlarla yapılabilir.

2.9.5 Daimi Olmayan Sistemler

Daimi olmayan sistemler zamana bağlı problemleri içerir. Daimi olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için iki sonlu farklandırma taslağı geliştirilmiştir. Bunlar *explicit method* (açık yöntem) ve *implicit method* (kapalı yöntem) 'lerdir.

Daimi olmayan diferansiyel denklemlere örnek, bir boyutlu laminar akış problemi verilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.34)$$

Bu diferansiyel denklemin sonlu farklandırma çözümü ise şu şekilde ifade edilebilir. Belirli bir konumdaki hızın zamana bağlı çözümü, zamanda adım adım ilerleyerek oluşturur. Bu diferansiyel denklemin açık ve kapalı yöntemde sonlu farklandırmaya açma biçimleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \nu \frac{u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n}{\Delta y^2} \quad \text{Explicit metodu} \quad (2.35)$$

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \nu \frac{u_{i-1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i+1}^{n+1}}{\Delta y^2} \quad \text{Implicit metodu} \quad (2.36)$$

Burada n zaman adımıdır. " i " ise bir boyutlu geometride düğüm numarasını göstermektedir. $n = t$ anındaki zaman ise $n+1 = t+\Delta t$ anındaki zamandır. Her iki denklemde $n+1$ zaman adımındaki hızlar bilinmeyenlerdir. Bu nedenle açık yöntemle hesaplama çok basitken kapalı yöntemle hesaplama çok daha fazla zaman gerektirmektedir. Kapalı metodun geliştirilmesinin nedeni açık metodunda zaman adımına getirilen sınırlamadır. Bu sınırlama küçük zaman adımlarıyla işlem yapılmasına neden olur bu da bilgisayar işleme zamanını çok arttırmaktadır. Açık ve kapalı yöntemlere getirilen sınırlamalar aşağıda, sırasıyla, verilmiştir.

$$\text{Explicit yöntem: } \nu \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \leq \frac{1}{2}, \quad \text{Implicit yöntem: } \nu \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \leq 1 \quad (2.37)$$

2.9. Sonuç

Burada hesaplamalı akışkanlar dinamiğine bir giriş yapılmıştır. Analitik veya deneysel yöntemlerle çözülemeyen akış problemleri HAD adı altında akış çözücü programlar sayesinde sayısal yöntemlerle çözülebilmektedir. Sayısal çalışmanın güvenilirliği deneysel verilerle karşılaştırıldığında ortaya çıkar. Türbülanslı akışlar sayısal olarak üç farklı yöntemle çözülebilmektedir. Eğer akış içerisindeki türbülans hareketin tüm ölçekleri çözülmek istenirse DNS tercih edilir, eğer türbülans hareket tüm ölçekleri modellenerek çözülmek istenirse RANS denklemler tercih edilir. Eğer türbülans hareketin büyük ölçeklileri doğrudan çözülmek ve izotropik davranışa sahip küçük ölçekliler modellenmek istenirse DNS ve RANS yöntemlerini birleştiren LES hibrid yöntemi tercih edilir. DNS ve LES zaman maliyeti çok yüksek olduğundan ticari alanda kullanılmamakta daha çok bilimsel araştırmalarda kullanılmaktadırlar. RANS çözüm ise zaman maliyeti diğer ikisine göre çok düşük olduğundan ticari alanda ve bilimsel araştırmalarda en çok tercih edilir. Bu üç yöntemde DNS deneysel gerçeklikte çözüm sunarken, LES modellenme miktarına göre deneysel gerçekliğe yaklaşır RANS ise tümüyle modellenme olduğundan problem türüne göre deneysel gerçekliğe yakın çözüm sunar. RANS türbülans modellerden Reynolds gerilme modelleri dışında diğer tüm türbülans modelleri Boussineq hipotezini

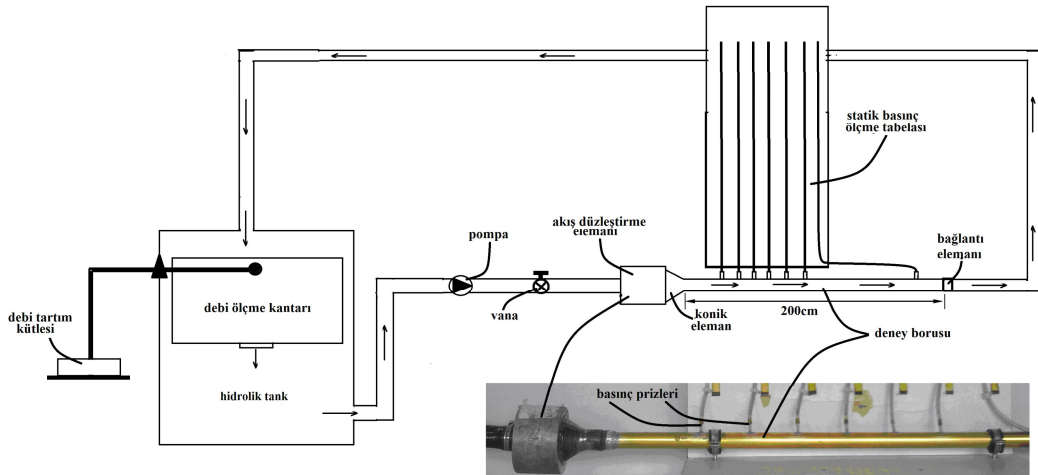
kullanır. Bu modeller sıfır denklemi, bir denklemlı ve iki denklemlı modellerdir. En sağlam çözüm üretenler iki denklemlı modellerdir. Bu modellerde sınır tabakanın ayrıntılı çözümünün istendiği problemlerde k-omega modelleri tercih edilmekte ve istenmediği problemlerde ise k-epsilon modelleri tercih edilmektedir. Sonuç olarak k-omega türbölans modellerinden SST modelinin ve LES modellerinden ise Wale Modelinin, gelişen boru akışlarının çözümü için, uygun oldukları görölmüşür.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

Literatürde yapılan araştırmaya göre boru girişinden itibaren gelişen akış kısmında basınç düşüşü ile ilgili deneysel çalışmalara pek yer verilmediği görülmüştür. Bu eksikliği gidermek ve yapılan sayısal çalışmaya bir karşılaştırma zemini yaratmak için konu deneysel olarak da incelenmiştir. Deneyler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümü Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Deney ekipmanı bir pompa, debi ölçümü için bir hidrolik tank, basınç ölçümü için üzerinde ölçekli piyezometre borularının bulunduğu bir tabla, deney boruları ve kayıt için bir kameradan oluşmaktadır. Deneysel çalışmada akışkan olarak boyalı su kullanılmıştır. Boru iç çeperine etki eden statik basınçları ölçmek için boruların üzerine belirli aralıklarla basınç prizleri kaynak edilmiştir. Basınç prizlerine bağlanan piyezometre boruları tablaya tutturulmuş, kamerada su seviyesini görüntüleyebilmek için üzerine metre yerleştirilmiştir.

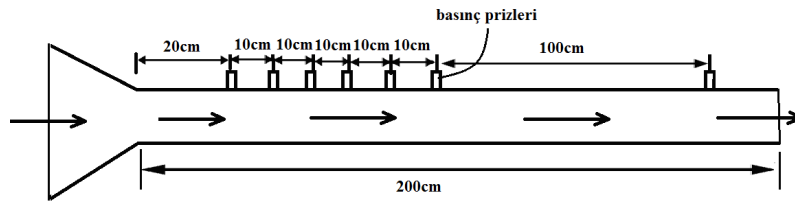
Kullanılan deney setinin iki boyutlu şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi pompa çıkışındaki bir vana ile su debisi ayarlanmış ve değişik debilerde akışlar oluşturulmuştur. Debi, deney setinde hidrolik tanka bağlı bir kantar yardımı ile ölçülmüştür. Borulardaki her debi akışı üç dakikalık süreyle kayıt altına alınmıştır. Bu görüntüler beşer saniyelik aralıklarla durdurularak elde edilen görüntüden piyezometre borularındaki anlık hidrostatik basınç yükseklikleri okunmuş ve tablo halinde kayıt altına alınmıştır. Her boru için toplam yirmi beş farklı debiyle çalışılmıştır.



Şekil 3.1 Deney seti şeması ve deney borusu detayı

Boru girişlerine bir akış düzenleme elemanı monte edilmiştir. Bu şekilde akışkanın üniform bir hız profili ile boruya girmesi arzu edilmiştir. Ancak, yukarı akımdan gelen akışkanın belirli bir türbülans taşıdığı ve akış düzenleme elemanın da bu türbülansı yeterince sönmüleyemediği tahmin edilmektedir. Boruya geçen bu türbülans çalkantıları akış gelişmesindeki laminar-türbülans geçişini tetiklemede etkili olmaktadır.

Deneyde kullanılan borular ve üzerindeki basınç prizlerinin mesafeleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Boru boyu 2 m seçilmiştir. Bu mesafe, tam gelişmiş akış şartlarının oluşması için yeteri uzunlukta bir aşağı akım mesafesidir. Boru üzerine yedi ayrı noktada basınç prizleri yerleştirilmiştir. Prizler arasındaki mesafeler ise şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde, yedinci priz boru girişinden 1.7 m uzaklıktadır ve bu da tam gelişmiş akış şartlarının oluşacağı yeteri uzunlukta bir akış mesafesi olmaktadır.



Şekil 3.2. Deney borusu ve basınç prizleri arasındaki mesafeler

Beş farklı boru türü ile yapılan deney çalışmaları, yaklaşık, yirmi gün kadar süreyle tamamlanabilmiştir. Deney setinin oluşturulması ve boru akışlarında meydana gelen arızalar deneylere ayrılan sürenin hemen hemen üçte birini kadar almıştır. Özellikle piyezometre borularının içine giren havayı gidermek zahmetli olmuştur. Deney çalışmasında bazen farkında olmadan hatalı sonuçlar elde edilmiş ve deneylerin birçok kez tekrarlanmasına neden olmuştur.

3.2. Boru Teknik Bilgileri

Deney çalışmaları farklı malzemelerden imal edilmiş beş ayrı boru türü ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar bakır, alüminyum, demir, galvaniz ve Plastik (PPRC) malzemelerden imal edilmiş borulardır. Bu borular piyasadan temin edilmiştir. Bakır, alüminyum, demir ve galvanizli borular, piyasada çapları 1 inç (1 inç = 2.54 cm) olarak verilen borulardır. PPRC boru ise piyasada satılan ve çapı 20 mm olarak verilen bir borudur. Daha sonra kumpas ile

yapılan boru iç çapı ölçümlerinde bu çapların tam doğru olmadığı görülmüştür. Tablo 3.1, kumpas ile ölçülen boruların iç çaplarını ve malzeme özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan boruların teknik özellikleri

Boru türü	Alüminyum	Bakır	Demir	Galvaniz	PPRC
İç Çap (D , mm)	26	26	28	28	21
Boru Boyu (L , m)	2	2	2	2	2

Deneyde kullanılan boruların kullanım alanları hakkında bilgi aşağıda verilmiştir.

Demir ve Galvanizli Borular: Su, yağ, petrol ve doğalgaz gibi akışkanların taşınmasında kullanılmaktadır.

PPRC Boruları: PPRC boruların hafif ve pürüzsüz olması, iç yüzeyinin kaygan ve parlak olması, kireçlenme ve paslanma yapmaması, montajının kolay olması gibi avantajlı yönleriyle plastik boru sektöründe galvanizli boruların yerini alarak günümüzde bina içi soğuk ve sıcak su tesisatlarında kullanılmaktadır.

Alüminyum ve Bakır Borular: Borular genellikle, şofbenlerde, kombilerde, sıhhi tesisatta, ısıtma tesisatında, sanayi ve ev tipi klimalarda, güneş enerji sistemlerinde, oto gaz LPG dönüşüm sistemlerinde, hava ve yağ tesisatlarında, medikal tesisatlarda ve ısı değiştiricilerde kullanılmaktadır.

3.3. Akışkan ve Özellikleri

Deneylerde akışkan olarak su kullanılmıştır. Piyezometre borularındaki su seviyesini görüntüleyebilmek için suya kırmızı bir boya katılmıştır. Katılan boya suyun fiziksel özelliklerini ihmal edilecek düzeyde çok az değiştirdiğinden hesaplamalarda suyun normal fiziksel özellikleri kullanılmıştır. Deneysel çalışma esnasında yapılan ölçümlerde ortalama su sıcaklığı 28 °C olarak ölçülmüştür ve bu sıcaklığa göre suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Yoğunluk (ρ) : 996 kg/m³

Dinamik viskozite (μ) : 0.00085 kg/m.s

3.4. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Deneyselerde her bir debi için prizlerdeki hidrostatik basınç yükseklikleri okunmuş ve basınç kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Pompanın sağladığı en yüksek debiden başlanarak boru akışları gerçekleştirilmiştir. En yüksek debi ile en düşük debi arasındaki çalışmalar, yaklaşık olarak, 55000–2000 Reynolds sayı aralığına denk gelmiştir. Her boru türü için toplam 25 farklı debi ile çalışılmıştır. Bu kısımda, 2000–25000 aralığındaki Reynolds sayılı boru akışları değerlendirilecektir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen statik basınç değerleri tablolara dökülmüştür ve her beş borunun kıyaslanması ve değerlendirilmesi bu tablolara göre yapılmıştır. Deneyselerde okunan hidrostatik basınç yükseklikleri hidrostatik basınç formülüyle "Pascal" birimine ve okunan debiler ise hız ve Reynolds sayılarına dönüştürülmüştür.

Bu hesaplamaları göstermek için alüminyum borudaki bir deney sonucu aşağıda örnek olarak verilmiştir. Verilen debideki boru akışında hidrolik tankta $m = 15$ kg'lık suyun birikmesi için geçen zaman $t = 48$ s olarak ölçülmüştür. Bu durumda, kütleli debi, ortalama akış hızı, Reynolds sayısı ve statik basınç değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Kütleli debi:

$$\dot{m} = \frac{15}{48} = 0.3125 \text{ kg/s}$$

Ortalama akış hızı:

$$\dot{m} = \rho A U \Rightarrow A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$U = 4\dot{m} / (\pi \rho D^2) = 0.591 \text{ m/s}$$

Reynolds sayısı:

$$Re = \rho U D / \mu = 18004$$

Statik basınç:

Birinci basınç prizinde referans ve okunan hidrostatik basınç yükseklikleri, sırasıyla $h_{oku} = 382$ mm ve $h_{ref} = 272$ mm 'dir. Etkili basınç yüksekliği ise $h = 382 - 272 = 110$ mm olmaktadır. Bu duruma göre hidrostatik basınç değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P = \rho g h = 996 \times 9.81 \times 0.11 \Rightarrow P = 1074.7 \text{ Pa}$$

Kameradan alınan görüntülerden yararlanarak elde edilen 25 ayrı zaman dilimindeki hidrostatik basınç yükseklerinin zaman ortalamalı değerleri hesaplanarak Tablo 3.2-3.6 tablolarında "Pa" biriminden verilmiştir. Tablolar ayrıca ortalama akış hızlarını ve Reynolds sayılarını da içermektedir.

Tablo 3.2. Alüminyum boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri

	L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
U (m/s)	Re	Basınç (Pa)						
0.15	4572	166.1029	174.6035	171.3303	158.8237	166.1029	161.3641	146.5614
0.182	5539	225.3626	224.9229	221.0634	209.1431	217.2528	212.9537	183.7391
0.267	8152	340.9995	337.5798	328.0533	316.86	323.5343	313.1854	261.3678
0.312	9496	389.7068	378.4215	373.8781	359.1243	362.9837	354.4832	285.7947
0.346	10539	457.6135	446.6214	437.8766	420.3869	422.3411	412.6192	332.4501
0.373	11371	489.5151	463.0852	453.8029	437.73	441.6872	428.7898	353.213
0.399	12172	570.0261	551.4128	544.9397	527.963	526.4974	517.1663	413.9871
0.436	13295	652.2471	634.4643	626.1592	605.7871	601.6345	586.4899	473.0513
0.516	15712	885.524	859.7292	856.5048	822.8934	816.2493	795.7307	628.6507
0.59	18004	1059.15	1028.079	1012.935	986.8468	974.9264	948.7408	741.6007
0.69	21043	1354.325	1314.167	1294.626	1263.555	1241.375	1208.545	947.2752

Tablo 3.3. Bakır boru için zaman ortalamalı statik basınç değişimleri

	L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
U (m/s)	Re	Basınç (Pa)						
0.113	3443	195.093	197.223	189.260	188.918	192.777	187.012	185.009
0.142	4326	237.234	238.113	228.196	228.538	232.104	222.822	215.201
0.188	5738	296.787	302.845	289.361	284.231	286.332	280.812	265.032
0.255	7785	410.177	409.737	396.107	395.032	393.859	381.060	340.022
0.295	9002	455.269	448.234	436.802	434.457	437.779	426.591	373.243
0.305	9282	481.112	476.715	465.577	461.571	461.913	450.725	390.586
0.364	11079	551.559	546.088	526.888	526.058	524.494	514.724	438.219
0.436	13295	749.759	741.552	724.111	716.441	708.234	696.753	582.337
0.52	15856	1005.225	997.548	976.378	964.514	954.743	931.712	774.123
0.604	18387	1257.869	1247.68	1223.904	1201.710	1190.40	1162.116	971.167
0.692	21077	1583.561	1572.48	1539.220	1517.864	1496.46	1463.520	1215.669

Tablo 3.4. Demir boru için zaman ortalama statik basınç değişimleri

	L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
U (m/s)	Re	Basınç (Pa)						
0.11	3609	132.1007	128.2412	123.7955	130.0488	131.2213	125.9451	115.7835
0.165	5422	207.3844	203.2318	198.4441	200.1052	197.3205	197.3694	177.1439
0.216	7101	271.3829	266.2532	260.8793	261.8564	255.7496	244.5133	224.4832
0.266	8722	348.523	341.7323	335.1371	335.6256	330.1051	319.2107	282.4727
0.324	10643	451.116	444.2276	437.2904	432.5515	427.8616	413.352	352.7733
0.363	11906	527.9142	516.4824	506.8093	505.8811	499.7744	484.4343	412.0818
0.407	13374	653.0287	644.6259	633.0475	628.6996	617.9029	601.488	511.255
0.424	13907	757.3805	744.9227	735.7871	726.8957	715.415	697.7788	580.774
0.526	17257	1116.565	1092.836	1076.831	1068.735	1047.891	1025.697	858.3845
0.601	19733	1342.356	1307.425	1292.036	1278.504	1255.396	1227.94	1027.395
0.66	21688	1570.208	1532.055	1513.212	1498.695	1469.755	1441.559	1199.431

Tablo 3.5. Galvanizli boru için zaman ortalama statik basınç değişimleri

	L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
U (m/s)	Re	Basınç (Pa)						
0.089	2907	146.422	146.329	138.466	137.675	131.812	125.950	130.789
0.139	4559	217.283	215.748	207.187	210.025	204.302	198.439	183.923
0.222	7295	362.170	360.820	350.165	347.420	341.511	330.763	304.569
0.291	9553	461.878	458.063	446.245	447.873	435.357	424.423	376.733
0.324	10643	534.135	529.854	515.663	510.918	503.334	491.609	434.938
0.365	11977	646.871	636.914	625.561	618.768	607.090	596.435	522.596
0.388	12738	728.340	718.616	705.030	701.215	690.002	673.903	579.639
0.429	14078	802.691	791.618	776.636	770.075	757.280	741.926	644.544
0.453	14861	929.665	913.380	896.677	892.489	876.484	854.802	738.251
0.475	15582	1067.665	1048.309	1030.396	1019.044	1003.876	984.800	841.355
0.562	18439	1385.308	1361.858	1341.711	1329.893	1306.723	1285.506	1103.538
0.698	22927	1918.279	1889.014	1857.561	1838.438	1812.476	1783.117	1522.052

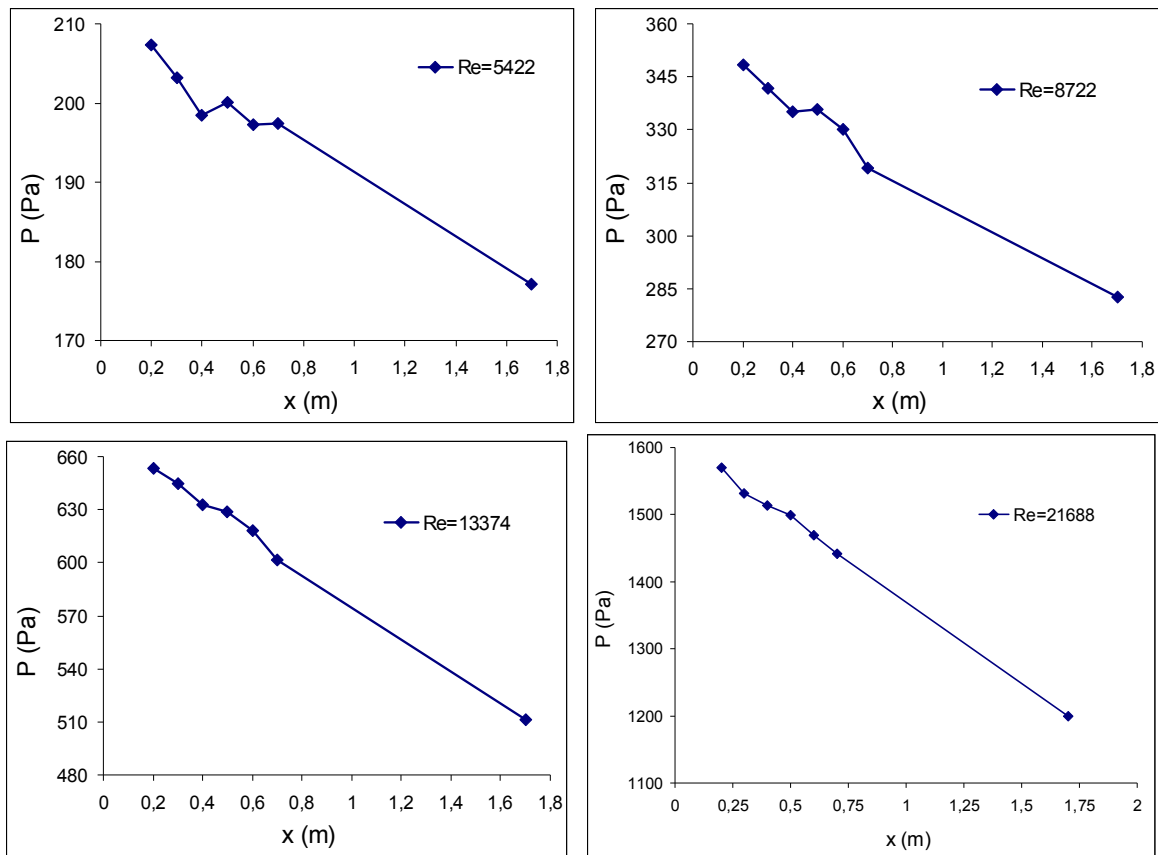
Tablo 3.6. PPRC boru için zaman ortalama statik basınç değişimleri

	L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
U (m/s)	Re	Basınç (Pa)						
0.28	6890	131.812	270.324	262.601	257.808	257.483	240.779	166.940
0.524	12890	551.722	574.288	551.722	534.368	522.643	493.051	301.498
0.587	14458	706.054	727.829	701.261	676.044	666.645	621.048	370.591
0.69	16983	821.349	849.126	823.722	785.243	774.728	731.876	427.820
0.713	17540	926.268	903.702	923.942	889.372	871.598	811.904	474.347
0.853	20979	1157.509	1193.335	1159.603	1105.724	1082.135	1013.600	586.478
0.988	24317	1146.729	410.809	631.893	607.008	596.547	539.054	332.768

Tablo 3.2-3.6 aralığındaki tablolarda verilen statik basınç düşüş değerlerinden, statik basınç değişim-leri, Darcy sürtünme faktörü ve boru pürüzlülüğü değerlendirilecektir.

3.4.1. Statik Basınç Değişimi

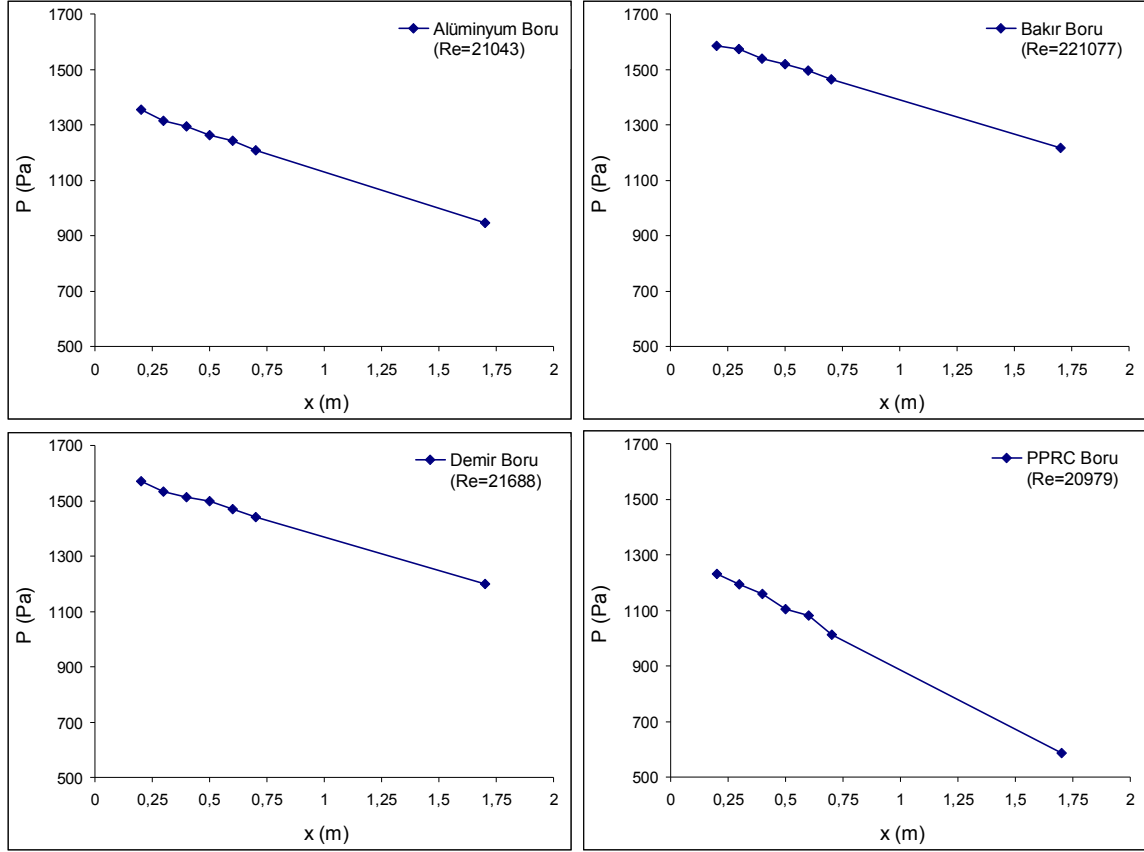
Boruların yedi ayrı noktasında ölçülen statik basınç değerleri Tablo 3.2-3.6 aracılığıyla verilmiştir. Şimdi boru boyunca basınç değişimini inceleyelim. Şekil 3.3'te demir boru için farklı Reynolds sayılarında basınç düşüşü görülmektedir.



Şekil 3.3. Demir borunun, dört farklı debisi için, akış boyunca statik basınç düşüş eğrileri

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi altıncı prize kadarki basınç düşüşleri tam doğrusal değildir. Çünkü bu akış kısmı gelişmektedir. 21688 Reynolds sayılı akış incelendiğinde tam gelişmiş akış şartlarının yaklaşık olarak 0.8 m'den itibaren başladığı söylenebilir. Ancak bu şekillerden, tam gelişmiş akışın hangi mesafede başladığını belirlemek oldukça güç olmaktadır.

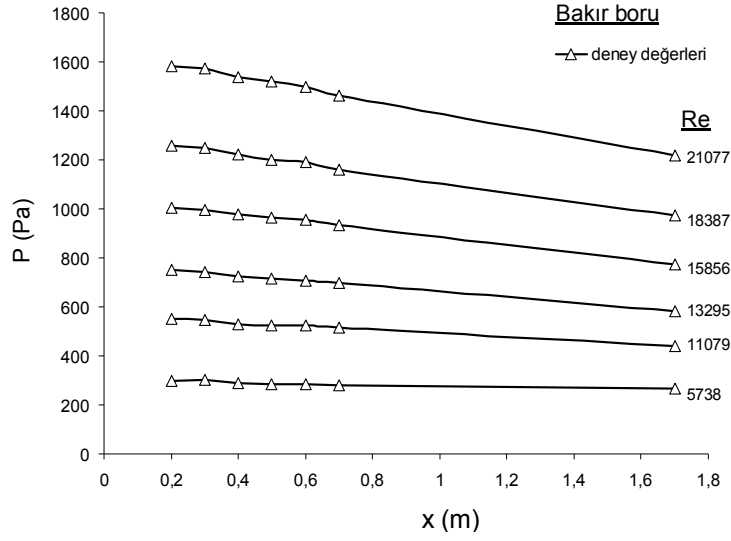
Şekil 3.4'te birbirine yakın Reynolds sayılarında dört boru için statik basınçtaki düşüşler gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Birbirine yakın Reynolds sayılarında dört farklı boru türü için statik basınç düşüş eğrileri

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi farklı boru akışlarında birbirine yakın ilk altı prizdeki basınç değişimi tam doğrusal değildir ve tam gelişmiş akış şartlarının nerede başladığı kestirilememektedir. Bu durumda, deneysel boru çalışmalarından, tam gelişmiş akış şartlarına geçiş mesafesinin incelenmesi pek mümkün olamamaktadır.

Şekil 3.5'te ise 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında bakır borunun statik basıncındaki düşüş değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Bakır boru için değişik Reynolds sayılarında akış boyunca statik basınç düşüş değerleri

Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi her Reynolds sayısındaki statik basınç düşüş değerleri doğrusala yakın olmuştur. Diğer dört borunun basınç düşüş grafikleri de benzer olduğundan gösterilmesine gerek duyulmamıştır.

Bundan sonraki kısımlar ise Darcy sürtünme faktörünün hesaplanması, Moody diyagramı ile olan uygunluğunun incelenmesi ve boru pürüzlülüklerinin bulunması ile ilgili çalışmaları kapsamaktadır.

3.4.2. Darcy Sürtünme Faktörü ve Boru Pürüzlülükleri

Bir çok firma imal ettiği borularını Nikuradse pürüzlülük değerlerini deneysel basınç kaybından giderek ölçmekte ve bunu kataloğunda vermektedir. Piyasadan seçilen bu beş farklı boru türü ise tesisatlarda kullanılan borular olduğundan pürüzlülük değerleri (ϵ) zamanla değişebilmektedir. Bu boruların pürüzlülük değerlerini bulmak için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişiminin incelenmesi gereklidir. Darcy sürtünme faktörü (f) ise tam gelişmiş boru akışlarında basınç kayıplarının hesaplanmasında kullanılan deneysel bir katsayıdır. Bu katsayı Nikuradse tarafından kumla pürüzlen-dirilmiş borularla yapılan geniş kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda Reynolds sayısının ve bağlı pürüzlülüğün bir fonksiyonu olarak Moody tarafından diyagram halinde verilmiştir. Tam gelişmiş boru akışlarında Darcy sürtünme faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho U^2 \quad \Rightarrow \quad f = \frac{2D}{\rho L U^2} \Delta P \quad (3.1)$$

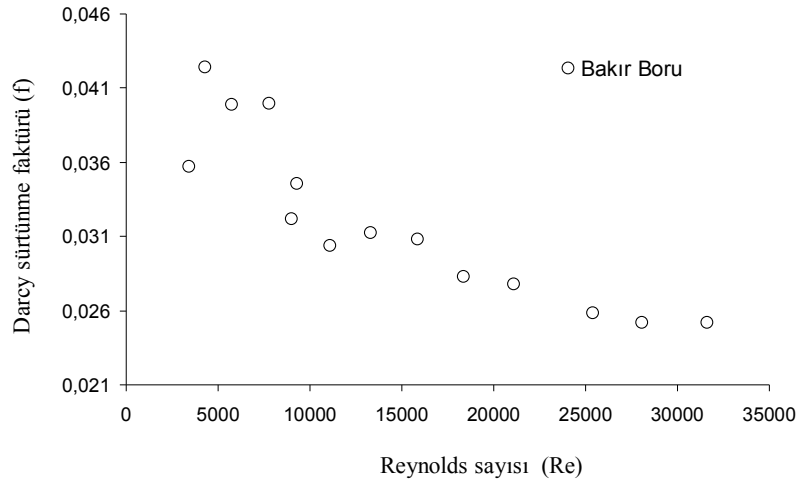
Burada ΔP borudaki statik basınç kaybı, D boru çapı, L boru uzunluğu ve U ise ortalama akış hızıdır. Örneğin bakır boru deney çalışmalarında Darcy sürtünme faktörü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bu hesaplama için basınç kaybı ve ortalama hız Tablo 3.3.'teki değerlerden alınmıştır. Basınç kaybı $x = 0.2$ m ve 1.7 m mesafelerinde bulunan basınç prizleri arasındaki farktır. Bu boru mesafesinin gelişen ve tam gelişmiş her iki akış kısmını da içerdiği not edilmelidir.

$$\text{Re: } 7785, \quad U = 0.255 \text{ m/s}, \quad D = 26 \text{ mm}, \quad \rho_{\text{su}} = 996 \text{ kg/m}^3, \quad L = 1.7 - 0.2 = 1.5 \text{ m}$$

$$\Delta P = 410.177 - 340.022 = 70.15 \text{ Pa}$$

$$f = 2x(70.15) \frac{0.026}{996 \times 1.5 \times 0.255^2} = 0.0375$$

Bakır boru için tüm Reynolds sayılarında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişimi ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

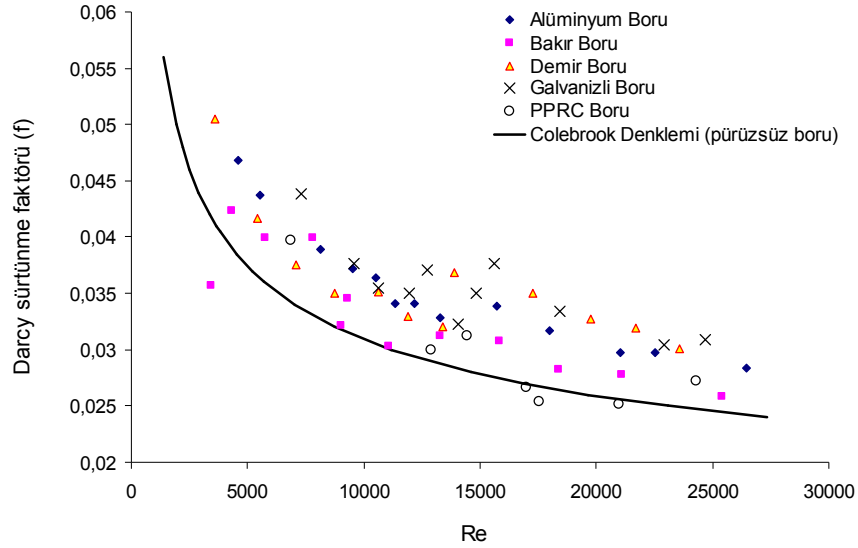


Şekil 3.6. 0.2-1.7m mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün Reynolds ile değişimi

Şekil 3.6.'daki değerlere göre Darcy sürtünme faktörü Reynolds sayısına bağlı parabolik düşüş göstermiştir. Bu değişim Moody diyagramına benzer bir düşüş eğrisidir.

Şekil 3.7'de ise her beş boru türü için hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin

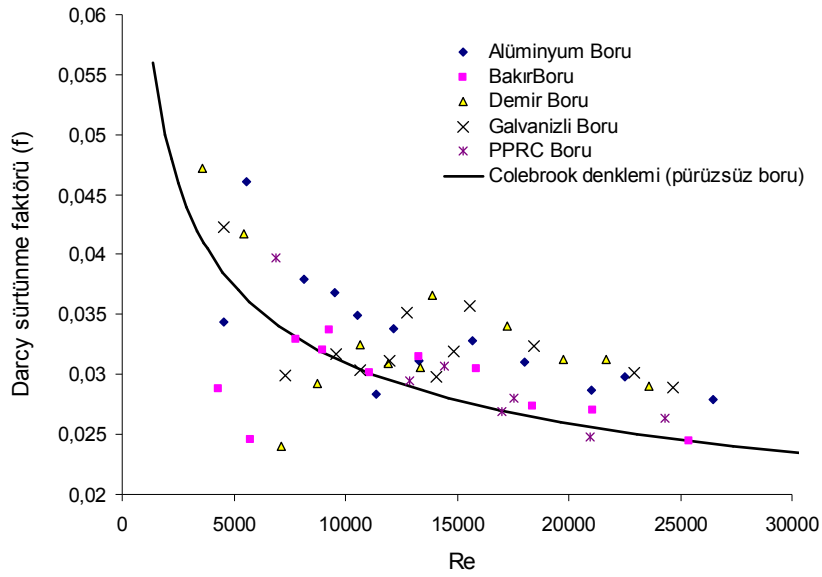
Reynolds sayısına bağılı değişimleri verilmiştir. Şekilde ayrıca pürüzsüz borular için Colebrook denklem eğrisi de verilmiştir. Colebrook denklemi Denklem (1.10)'da verilmiştir. Colebrook denkleminde " ε/D " değeri sıfır alındığında pürüzsüz boru akışları için Darcy sürtünme faktörü Şekil'de görüldüğü gibi bir eğriye sahip olmaktadır.



Şekil 3.7. Her beş boru türü için 0.2-1.7 m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimleri

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi her borunun Darcy sürtünme faktörleri Colebrook denklemine benzer bir değişime sahip olmuşlardır. Şekil 3.7'deki değerlere göre genel olarak galvanizli borunun Darcy sürtünme faktörü en yüksekken bakır ve PPRC borunun ise en düşük olmuştur. Boruların Darcy sürtünme faktörleri azalan yönde sıralandığında galvanizli boru, demir boru, alüminyum boru ve PPRC boru değerleri sırasıyla gelmektedir. Bu değerlere göre pürüzlülüğü en yüksek olan galvanizli boru ve en düşük olan ise PPRC borudur. Şekil 3.7'de 10000-15000 Reynolds sayı aralığına dikkat edilirse sürtünme faktörlerinde genel bir artış söz konusudur. Bu durumun nedeni belirli debilerden sonra pompa titreşimlerinin artması ve sonucunda fazla türbülans oluşturması olarak tahmin edilmektedir. Burada ölçülen Darcy sürtünme faktörleri 0.2 m ve 1.7 m arasındaki basınç farkından hesaplanan değerlerdir. Bu iki mesafe aralığı en küçük çaplı boru olan PPRC boru için değerlendirildiğinde 10-80 çap mesafe aralığına denk gelmektedir. Diğer borularda ise bu iki değer daha da düşmektedir. Moody diyagramında verilen sürtünme değerleri ise tam gelişmiş boru akışları içindir. Literatürdeki verilere göre tam gelişmiş akış şartları genelde 30-40 çap aralığındaki mesafelerden itibaren başlamaktadır. Bu akış

kısımında ölçülen statik basınç değerleri hem gelişen ve hem de gelişmiş akış kısmını içerdiğinden burada ölçülen sürtünme faktörleri ile pürüzlülük değerleri hesaplamak yanlış olur. Bunun için tam gelişmiş akış şartlarının olduğu düşünülen 0.7-1.7 m boru aralığında hesaplanan statik basınç farkları, pürüzlülük değerlerinin hesaplanması için kullanılabilir. Bu aralıktaki basınç farkından hesaplanan Darcy sürtünme faktörleri ise Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

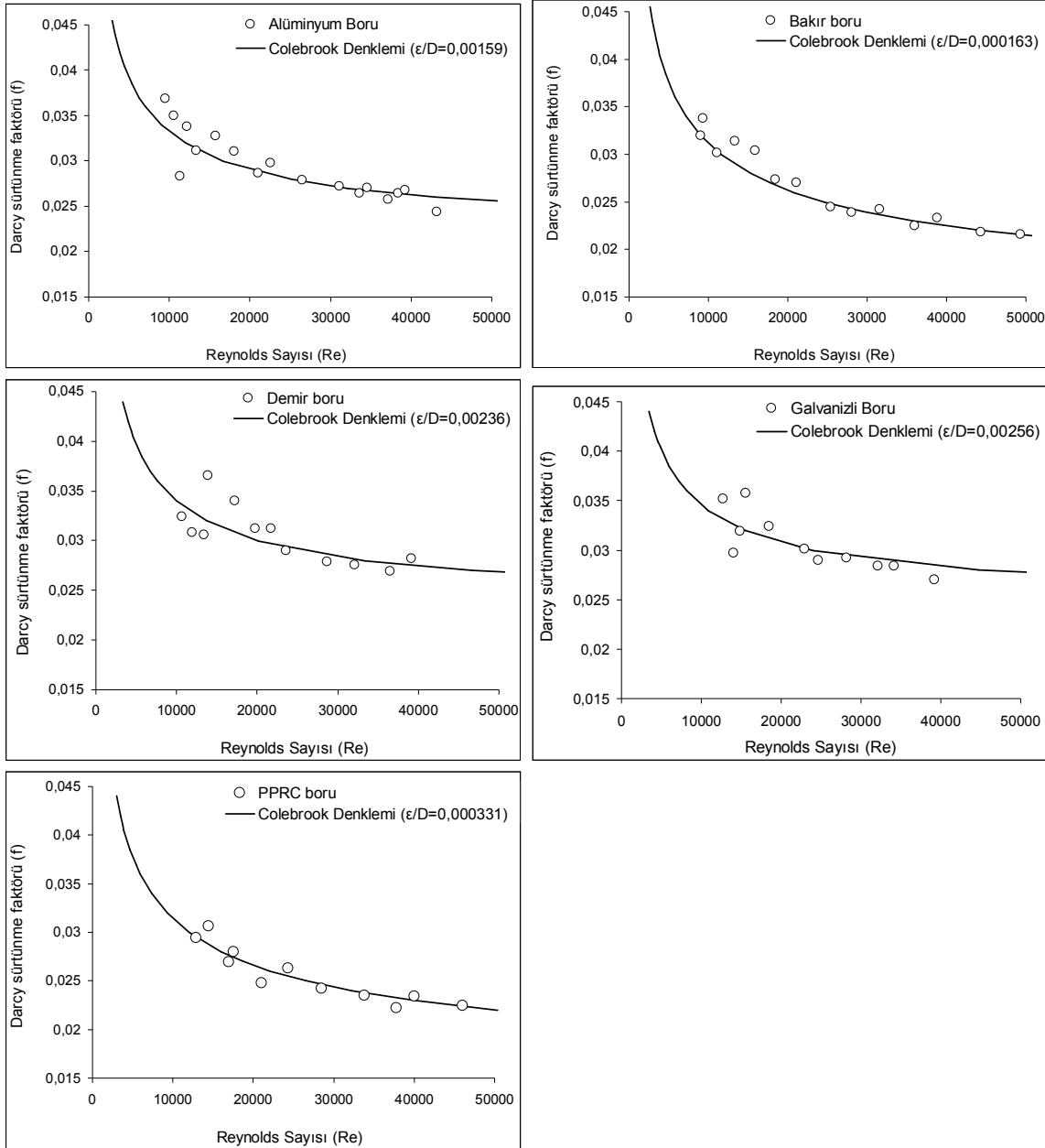


Şekil 3.8. Her beş boru türü için 0.7-1.7m mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimleri

Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi sürtünme faktörleri Şekil 3.7' deki sürtünme faktörlerinden biraz daha farklıdır. Bu şekilde 12000 'nin altındaki Reynolds sayılarında sürtünme faktörlerinde genelde ani bir düşüş vardır. Bu durumun nedeni bu Reynolds aralığındaki akışların (3000-12000) tam gelişmiş laminar veya tam gelişmiş türbülans akış olmaları tam belirgin değildir (bkz Şekil 1.6). Eğer akış şartları türbülans oluşmasına izin vermeyecek kadar yeterince kararlıysa laminar akış, eğer akış şartlarındaki olumsuzluklar fazlaysa türbülanslı akış oluşur. Bu aralıkta gerçekleşen tam gelişmiş laminar akışlarda sürtünme faktörü türbülanslı akışa göre daha düşük olmaktadır. Şekil 3.8'de verilen sürtünme faktörleri Şekil 3.7'deki sürtünme faktörlerinden daha düşük çıkmışlardır. 12000 üstündeki Reynolds sayıları için 0.7 m ve 1.7 m aralığında hesaplanan sürtünme faktörleri 0.2 m ve 1.7 m aralığında hesaplanan sürtünme faktörlerinden genel ortalama olarak %2 civarında daha düşük değerlere sahip olmuşlardır. Sonuç olarak gelişen akıştaki ortalama sürtünme faktörü tam gelişmiş akıştaki sürtünme faktöründen daha yüksek olmaktadır. Bu durumda

12000'den daha büyük Reynolds sayılı akışlarla, 0.7 m ve 1.7 m aralığında hesaplanan sürtünme faktörü değerlerine göre Moody diyagramından uygun bağıl pürüzlülük değerleri çıkarılabilir.

12000-55000 Reynolds sayı aralığındaki akışlarda her beş borunun 0.7 m ve 1.7 m aralığındaki hesaplanan sürtünme faktörlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri ve bu değişime uyan Colebrook Denklem eğrileri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Her beş boru türünün, 12000-55000 aralığındaki Reynolds sayıları için, 0.7 m ve 1.7 m mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Re'ye bağlı değişimi ve bu değişime uyan Colebrook denklem eğrileri

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi her beş borunun Darcy sürtünme faktörü değerleri bağlı pürüzlülükleri verilen Colebrook denklem eğrileri ile iyi uyuşma göstermişlerdir. Bu iyi uyuşma neticesinde şekillerde verilen bağlı pürüzlülük değerleri boruların tahmini bağlı pürüzlülükleri olarak alınabilir. Bu nedenle her beş boru türü için bu şekillerde verilen pürüzlülük yükseklikleri, Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Beş farklı boru türü için Moody diyagramından bulunan pürüzlülük değerleri

	Alüminyum boru	Bakır boru	Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
Boru Çapı : D (mm)	26	26	28	28	21
Pürüzlülük Yüksekliği: ε (mm)	0.04134	0.00424	0.06608	0.07168	0.00695
Bağlı Pürüzlülük: ε/D	0.00159	0.000163	0.00236	0.00256	0.000331

Tablo 3.7'ye göre boruların pürüzlülük yükseklikleri azalan yönde sıralandığında galvanizli boru, demir boru, alüminyum boru, PPRC boru ve bakır boru değerleri sırasıyla gelmektedir. Tabloya göre galvanizli boru, demir boru ve alüminyum boru pürüzlülük değerleri birbirine yakın ve yüksek değerlerde çıkmıştır; bakır boru ve PPRC boru pürüzlülükleri de birbirine yakın fakat düşük değerlerde çıkmıştır. Bulunan bu boru pürüzlülük değerleri Moody diyagramında aynı malzemeden yapılmış borular için verilen pürüzlülük değerleri ile Tablo 3.8'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.8. Moody diyagramından aynı malzemeden borular için verilen pürüzlülük değerlerinin deney borusu pürüzlülük değerleriyle karşılaştırılması

Deney Boruları	Alüminyum boru	Bakır boru	Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
Pürüzlülük Yüksekliği ε (mm)	0.04134	0.00424	0.06608	0.07168	0.00695
Moody Diyagramında verilen borular		Bakır boru	İşlenmiş Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
Pürüzlülük Yüksekliği ε (mm)	-----	0.0015	0.046	0.15	0

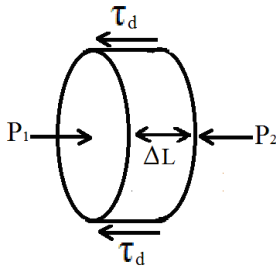
Tablo 3.8'de görüldüğü gibi bakır boru değeri Moody diyagramında verilen bakır boru pürüzlülüğünün hemen hemen üç katı kadar, demir boru yakın değerde, PPRC boru ise plastik boru-ya göre belirli bir pürüzlülük değerine sahip çıkmıştır. Bu karşılaştırmaya göre bulunan boru pürüzlülükleri Moody diyagramındaki değerlere yakın değerlerde çıkmışlardır. Bunun nedeni ise piyasada imal edilen boruların üretimlerinin aynı kalitede olmama-

sıdır. Moody diyagramında alüminyum boru değerleri verilmediğinden karşılaştırma yapılamamıştır.

Pürüzlülük değerleri bulunan boruların boyutsuz pürüzlülük (ϵ^+) yönünden değerlendirilmesi ve akış üzerindeki etkileri incelenmeye alınabilir. Boyutsuz pürüzlülük, Denklem (1.29) ile verilen bağıntıyla hesaplanmaktadır. Deneysel sonuçlar pürüzlülük için üç farklı durum ortaya koymuştur. Bunlar,

- Hidrodinamik olarak pürüzsüz : $0 \leq \epsilon^+ \leq 5$
- Geçişsel : $5 \leq \epsilon^+ \leq 70$
- Tamamıyla pürüzlü : $\epsilon^+ > 70$

Burada, boyutsuz boru pürüzlülükleri boruların en yüksek Reynolds sayılı akışları için hesaplanacaktır. Boyutsuz pürüzlülük denkleminde bulunan duvar kayma gerilmesi (τ_d) 0.7 m ve 1.7 m arasındaki basınç farkından (ΔP) aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.10. Diferansiyel boyuttaki boru akışında basınç ve kayma gerilmesinin gösterimi

$$\Delta P \pi \frac{D^2}{4} = \tau_d \pi D \Delta L$$

$$\Rightarrow \tau_d = \frac{1}{4} \frac{D}{\Delta L} \Delta P \quad (3.2)$$

Burada, $\Delta L = 1.7 - 0.7 = 1$ m olmaktadır.

Tablo 3.9. Boruların en yüksek Reynolds sayılarında hesaplanan boyutsuz pürüzlülük değerleri

	Alüminyum boru	Bakır boru	Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
Re	43209	49354	39144	39144	46019
ϵ^+	4.8	0.42	5.5	6	0.82

Tablo 3.9'da verilen boyutsuz pürüzlülük değerlerine göre alüminyum, demir ve galvanizli boru pürüzlülüğünün akışa etkisi bu Reynolds sayılarında kısmen vardır. Yalnız bakır ve PPRC boru ise hidrodinamik olarak pürüzsüz boru olarak ele alınabilir. Alüminyum boru, demir boru ve galvanizli boru tabloda verilen Reynolds sayılarından daha küçük Reynolds sayılarında hidrodinamik olarak pürüzsüz boru olarak işlem görebilirler fakat daha yüksek Reynolds sayılarında ise pürüzlü boru olarak ele alınmalıdır. Bakır ve PPRC boru boyutsuz pürüzlülük değerleri çok düşük olduğundan tahmini 100000'i geçen Reynolds sayılarından itibaren ancak pürüzlü boru olarak ele alınabilirler.

3.4.3. Basınç Çalkantıları

Türbülanslı akışlarda basınç, hız, sıcaklık ve yoğunluk gibi akış özellikleri zamana bağlı dalgalı değerler gösterirler. Deney çalışmalarında ise hidrostatik basınç yüksekliklerinin zamana bağlı dalgalı değerler izlemeleri basınç çalkantılarını oluşturmaktadır. Bu basınç çalkantıları, anlık hidrostatik basınç yüksekliklerin zaman ortalamalı hidrostatik basınç yüksekliklerinden farkı olarak hesaplanır.

Yapılan deneysel boru akışlarında basınç prizlerinde anlık basınç değerleri okunmuştur. Her debideki boru akışı üç dakika süreyle kayıt altına alınmıştır. Bu kayıtlardan 5 saniye aralıklarla alınan resimlerden hidrostatik basınç yükseklikleri "mm" olarak okunmuş ve tablolara dökülmüştür. Daha sonra bu tablolar " $P=\rho gh$ " formülüyle "Pascal" basınç birimine çevrilmiştir. Örneğin alüminyum borunun zamana bağlı okunan basınç değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

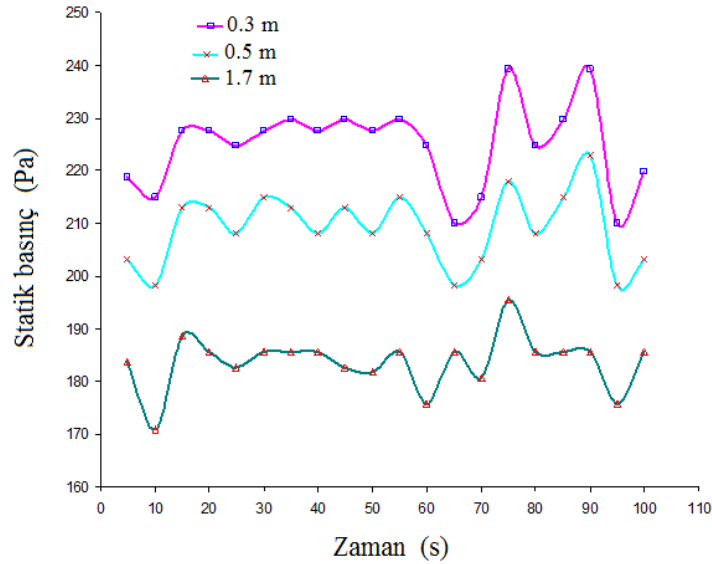
Tablo 3.10. Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında zamana bağlı okunan statik basınç değerleri

Basınç Değerleri (Pa)							
t (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
5	221.796	218.865	214.957	203.232	214.957	205.186	183.690
10	214.957	214.957	212.025	198.346	205.186	205.186	170.988
15	227.659	227.659	224.727	213.003	219.842	214.957	188.576
20	227.659	227.659	224.727	213.003	219.842	214.957	185.644
25	224.727	224.727	220.819	208.117	214.957	214.957	182.713
30	228.636	227.659	224.727	214.957	220.819	214.957	185.644
35	229.613	229.613	224.727	213.003	220.819	214.957	185.644
40	227.659	227.659	222.773	208.117	219.842	214.957	185.644
45	229.613	229.613	224.727	213.003	219.842	214.957	182.713
50	227.659	227.659	222.773	208.117	214.957	210.071	181.736

Tablo 3.10'un devamı

55	229.613	229.613	225.705	214.957	219.842	218.865	185.644
60	224.727	224.727	219.842	208.117	219.842	214.957	175.874
65	210.071	210.071	214.957	198.346	205.186	205.186	185.644
70	214.957	214.957	214.957	203.232	214.957	210.071	180.759
75	239.384	239.384	229.613	217.888	229.613	224.727	195.415
80	224.727	224.727	221.796	208.117	219.842	214.957	185.644
85	229.613	229.613	224.727	214.957	219.842	214.957	185.644
90	244.269	239.384	232.544	222.773	229.613	224.727	185.644
95	210.071	210.071	205.186	198.346	205.186	200.301	175.874
100	219.842	219.842	214.957	203.232	210.071	205.186	185.644
Ortalama	225.363	224.923	221.063	209.143	217.253	212.954	183.739

Tablo3.10'dan 0.3 m, 0.5 m ve 1.7 m basınç prizlerinde okunan basınç değerlerinin zamana bağlı değişimleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında 0.3 m, 0.5 m ve 1.7 m noktalarında okunan basınç değerlerinin zamana bağlı değişim eğrileri

Şekil 3.11'de görülen eğrilere göre her üç basınç prizi aynı faz ve frekansta çalkantı dalgaları üretmişlerdir. Yalnız 1.7 m noktasından alınan basınç değişim eğrisinin dalga büyüklüğü (dalga genliği) diğerlerine nazaran daha küçük ve düzensiz olmuştur. Kalan diğer prizlerde ise aynı genlikte çalkantı dalgaları üretmişlerdir. Basınç dalgalarının aynı faz ve frekansta olmalarının nedeni ise pompa titreşimlerinden kaynaklı debi dalgalanmaları olabileceği öngörülmektedir.

Tablo 3.10'da verilen alüminyum boru anlık basınç değerlerinin zaman ortalamalı basınç değerlerinden mutlak sapma miktarları ise aşağıdaki tabloda verilmiştir. Zaman ortalamalı

değerden mutlak sapma miktarına basınç çalkantı (P') değeri denir. Mutlak sapma miktarı ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$P' = |P - \bar{P}| \quad (3.3)$$

Tablo 3.11. Alüminyum boru için 5539 Reynolds sayısında anlık basınç değerlerinin zaman ortalamalı basınç değerinden mutlak sapma değerleri

Basınç Çalkantı Değerleri. P'(Pa)							
t (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7
5	3.567	6.058	6.106	5.911	2.296	7.768	0.049
10	10.406	9.966	9.038	10.797	12.067	7.768	12.751
15	2.296	2.736	3.664	3.860	2.589	2.003	4.837
20	2.296	2.736	3.664	3.860	2.589	2.003	1.905
25	0.636	0.196	0.244	1.026	2.296	2.003	1.026
30	3.273	2.736	3.664	5.814	3.566	2.003	1.905
35	4.250	4.690	3.664	3.860	3.566	2.003	1.905
40	2.296	2.736	1.710	1.026	2.589	2.003	1.905
45	4.250	4.690	3.664	3.860	2.589	2.003	1.026
50	2.296	2.736	1.710	1.026	2.296	2.883	2.003
55	4.250	4.690	4.642	5.814	2.589	5.911	1.905
60	0.636	0.196	1.221	1.026	2.589	2.003	7.865
65	15.292	14.852	6.106	10.797	12.067	7.768	1.905
70	10.406	9.966	6.106	5.911	2.296	2.883	2.980
75	14.021	14.461	8.550	8.745	12.360	11.773	11.676
80	0.636	0.196	0.733	1.026	2.589	2.003	1.905
85	4.250	4.690	3.664	5.814	2.589	2.003	1.905
90	18.906	14.461	11.481	13.630	12.360	11.773	1.905
95	15.292	14.852	15.877	10.797	12.067	12.653	7.865
100	5.521	5.081	6.106	5.911	7.182	7.768	1.905
Ortalama	6.239	6.136	5.081	5.525	5.257	4.949	3.557

Tablo 3.11.'de basınç çalkantılarının ortalama değerlerine bakıldığında (tablonun son satırı) ilk altı priz, 5'e yakın değerlerde, son priz ise bunlardan daha düşük olarak 3.55 değerinde olmuştur.

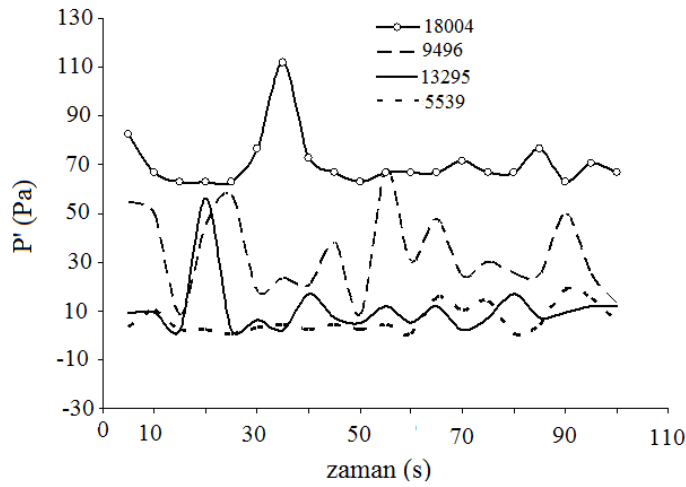
Tablo 3.12'de ise değişik Reynolds sayılı alüminyum boru akışlarında birinci basınç prizinden (x = 0.2 m) okunan anlık basınç çalkantı değerlerini verilmiştir.

Tablo 3.12. Alüminyum boru için değişik Reynolds sayılarında birinci basınç prizinden okunan anlık basınç çalkantı değerleri

Basınç Çalkantıları. P' (Pa)											
$\frac{Re}{t (s)}$	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	22544
5	0.026	3.604	20.747	54.870	42.053	8.809	16.246	9.280	10.210	82.554	15.322
10	0.026	10.443	18.794	49.984	43.030	49.816	3.296	9.280	10.210	66.758	4.220
15	0.026	2.259	57.877	8.640	51.167	40.045	16.246	2.441	4.446	63.013	4.220
20	0.026	2.259	30.518	45.099	39.442	28.350	22.108	56.184	4.446	63.013	5.551
25	0.026	0.673	28.565	57.494	57.687	18.580	29.925	2.444	9.332	63.013	4.220
30	0.026	3.236	10.977	18.411	38.465	10.733	3.296	6.349	10.210	76.529	5.551
35	0.026	4.213	10.977	23.297	57.687	38.121	3.296	2.441	14.217	111.867	4.220
40	0.026	2.259	10.977	20.672	31.626	8.809	1.589	17.101	0.439	72.784	5.551
45	0.026	4.213	18.794	37.953	31.626	20.504	6.475	7.330	9.332	66.758	4.220
50	0.026	2.259	18.794	8.640	36.511	8.809	3.296	5.372	5.325	63.013	10.436
55	0.026	4.213	10.977	67.265	47.916	30.274	1.589	12.212	19.102	66.758	4.220
60	0.026	0.673	20.747	30.443	47.916	28.350	3.296	5.372	0.439	66.758	4.220
65	0.026	15.329	10.977	47.723	42.053	28.350	6.475	12.212	4.446	66.758	5.551
70	0.026	10.443	10.977	24.274	31.626	0.962	13.067	2.441	19.102	71.643	4.220
75	0.026	13.984	10.977	30.443	31.626	30.274	34.562	7.326	10.210	66.758	4.220
80	0.026	0.673	18.794	25.557	41.396	8.809	3.296	17.101	9.332	66.758	4.220
85	0.026	4.213	30.518	24.580	51.167	18.580	16.246	7.330	39.522	76.529	4.220
90	0.026	18.869	10.977	49.984	63.869	20.504	22.837	9.280	10.210	63.013	5.551
95	0.026	15.329	20.747	25.251	31.306	8.809	27.723	12.212	5.325	70.666	5.551
100	0.026	5.558	30.518	12.549	41.396	0.962	1.589	12.212	9.332	66.758	4.220
Ortalama	0.026	6.235	20.161	33.156	42.978	20.422	11.823	10.796	10.259	70.585	5.485

Tablo 3.12'de verilen basınç çalkantılarının zaman ortalama değerlerine bakıldığında 4572, 5539 ve 22544 Reynolds sayılı akışlarda çok düşük; 18004 Reynolds sayılı akışta ise en yüksek ve diğerlerinde ise orta değerlerde olmuştur. Bu durum gösteriyor ki basınç çalkantı değerleri Reynolds sayısından bağımsız olmaktadır.

Şekil 3.12'de ise Tablo 3.12'de verilen basınç çalkantı değerlerinin zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Dört ayrı Reynolds sayısında alüminyum borunun birinci basınç prizinden okunan basınç çalkantılarının zamana bağlı değişimleri

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi basınç çalkantı büyüklükleri Reynolds sayısından bağımsızdır. Fakat genel olarak yüksek Reynolds sayılarında daha büyük olmuşlardır.

Tablo 3.13-3.17 tabloları ise her basınç prizinden hesaplanan basınç çalkantılarının ortalama karekök değerlerini vermiştir. Yabancı Literatürde ortalama karekök değerlerine kısaca RMS denir. Genel olarak türbülans özelliklerin zaman ortalama ağırlıklı etkileri RMS değerleri ile ölçülür. Basınç çalkantılarının RMS değerleri ise Denklem (3.4) yardımıyla, aşağıdaki gibi, hesaplanmaktadır.

$$P'_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P - \bar{P})^2}{N}} \quad (3.4)$$

Burada, N çalkantı sayısı, P anlık basınç değerleri ve $\bar{P}$ ise anlık basınç değerlerinin zaman ortalamasıdır.

Tablo 3.13. Alüminyum boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri

Alüminyum Boru, P'_{RMS} (Pa)							
Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	Ortalama
4572	0.004	0.932	1.357	1.047	0.003	0.349	0.615
5539	8.327	7.893	6.316	6.645	6.686	6.206	7.012
8152	15.105	15.119	16.074	15.453	15.404	14.735	15.315
9496	37.110	35.226	35.319	34.888	32.091	34.147	34.797
10539	16.053	18.329	17.691	15.785	18.300	16.651	17.135
11371	24.309	21.235	21.452	20.164	17.903	18.876	20.657
12172	24.209	24.282	25.814	25.768	24.173	24.548	24.799
13295	15.619	15.607	16.394	15.483	14.340	13.535	15.163
15712	15.127	10.904	19.012	15.625	14.028	14.109	14.801
18004	12.513	10.645	13.134	11.183	11.980	9.964	11.570
21043	10.798	9.523	9.892	9.661	8.726	7.584	9.364
Genel ortalama							15.56

Tablo 3.14. Bakır boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri

Bakır Boru, P'_{RMS} (Pa)							
Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	Ortalama
3443	5.221	5.873	4.371	2.836	3.372	1.617	3.882
4326	8.265	10.089	7.881	7.816	7.622	7.603	8.213
5738	35.368	36.735	36.049	36.302	35.930	34.071	35.743
7785	0.586	2.191	2.381	4.877	2.371	0.000	2.068
9002	14.664	12.600	12.677	11.341	11.363	12.726	12.562
9282	17.367	17.811	19.896	18.265	17.514	18.046	18.150
11079	4.609	3.165	3.870	3.187	4.600	4.600	4.005
13295	23.934	23.524	26.214	24.764	23.244	22.570	24.042
15856	44.671	46.753	47.132	44.815	44.790	43.045	45.201
18387	13.197	12.922	11.738	11.229	11.903	10.360	11.892
21077	2.062	2.076	2.456	2.352	2.443	2.293	2.280
Genel ortalama							15.27

Tablo 3.15. demir boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri

Demir Boru, P'_{RMS} (Pa)							
Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	Ortalama
3609	12.771	15.347	14.752	12.339	12.519	13.058	13.464
5422	6.054	6.554	6.633	6.238	6.090	5.298	6.145
7101	5.457	5.100	4.787	5.475	20.348	20.406	10.262
8722	12.680	13.002	12.164	10.714	10.277	10.211	11.508
10643	6.562	6.041	6.616	7.100	7.511	7.163	6.832
11906	10.433	8.224	7.267	6.839	7.647	6.493	7.817
13374	5.512	7.415	5.646	4.900	4.150	4.503	5.354
13907	14.167	14.278	15.107	13.295	13.274	11.912	13.672
17257	31.281	28.081	31.021	28.323	26.541	26.762	28.668
19733	19.822	17.319	16.189	16.443	15.195	16.179	16.858
21688	27.743	25.664	24.183	23.607	21.977	22.138	24.219
Genel ortalama							13.16

Tablo 3.16. Galvanizli boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri

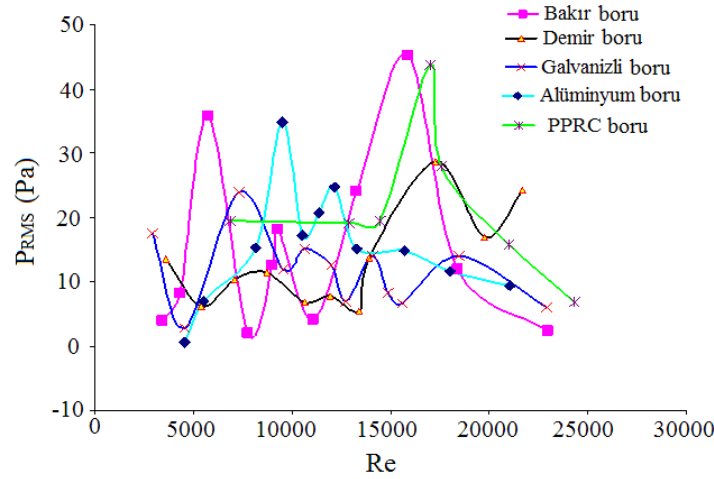
Galvanizli Boru, P'_{RMS} (Pa)							
Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	Ortalama
2907	18.732	18.467	18.537	16.636	16.215	16.215	17.467
4559	3.772	2.855	2.722	3.351	2.172	2.172	2.841
7295	24.781	24.807	23.489	23.940	23.602	23.046	23.944
9553	11.190	11.281	11.198	17.876	10.044	10.205	11.966
10643	14.377	15.755	16.120	14.004	14.996	15.120	15.062
11977	13.145	12.334	13.890	11.315	12.253	12.075	12.502
12738	7.560	6.555	7.912	4.138	6.952	8.567	6.947
14078	16.600	10.166	11.926	16.250	15.189	14.041	14.029
14861	8.799	8.078	7.829	7.560	9.934	6.937	8.190
15582	6.930	7.305	5.913	7.877	5.781	6.000	6.634
18439	16.509	11.862	12.424	14.577	14.431	14.408	14.035
22927	8.018	3.794	5.329	7.855	4.523	6.328	5.975
Genel ortalama							11.63

Tablo 3.17. PPRC boru için basınç çalkantılarının RMS değerleri

PPRC Boru, P'_{RMS} (Pa)							
Re / L(m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	Ortalama
6890	19.903	18.949	18.898	20.692	19.482	18.810	19.456
12890	20.690	18.371	17.013	18.678	21.400	18.466	19.103
14458	20.318	18.556	19.245	18.920	20.697	18.638	19.395
16983	44.049	41.002	44.604	47.937	42.109	43.294	43.833
17540	29.079	23.929	29.142	28.664	28.231	28.551	27.933
20979	17.987	13.086	16.714	15.473	16.091	15.123	15.746
24317	5.388	9.528	5.139	7.978	5.622	6.985	6.773
Genel ortalama							21.74

Tablo 3.13-3.17 tablolarında verilen RMS değerleri ilk altı basınç prizinden hesaplanan RMS basınç çalkantı değerlerini göstermektedir. Son basınç prizinde hesaplanan RMS değeri tabloda yer verilmemiştir. Çünkü son basınç prizindeki ($x = 1.7$ m) basınç çalkantı büyüklükleri diğerlerine göre çok düşük olmuştur. Yukarıdaki tablolarda verilen basınç çalkantı RMS değerleri 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında hesaplanan

değerlerdir. Tablolara bakıldığında altı basınç prizinde bulunan RMS değerlerinin her Reynolds sayısında birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Yakın olmasının nedeni basınç çalkantılarının her prizde aynı frekans ve genliğe sahip olmasıdır. Tablolarda altı basınç prizindeki RMS değerlerinin ortalaması verilmiştir. Yukarıda beş tablodan alınan RMS ortalama değerlerinin (tabloların son satırı) Reynolds sayısına bağlı değişimleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Beş ayrı boruda statik basınç çalkantı ortalama RMS değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

Şekil 3.13'te gösterildiği gibi RMS değerleri her beş boru türü için oldukça birbirine yakın olmuştur. Grafiklerden RMS değerlerinin Reynolds sayısına bağlı olmadıkları görülmektedir. Her beş boru türünü RMS değerleri yönünden kıyaslamak için yukarıdaki beş ayrı tabloda verilen genel RMS ortalamaları Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.18. Beş boru türü için hesaplanan basınç çalkantılarının genel ortalama RMS değerleri

	Alüminyum boru	Bakır boru	Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
Genel Ortalama RMS değerleri	15.56	15.27	13.16	11.63	21.75

Tablo 3.18'deki en büyük RMS değerinin PPRC boruya ait olduğu görülmektedir. Bakır ve alüminyum boru değerleri ise demir ve galvanizli borulara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu genel ortalama RMS değerlerinin farklı olması iki nedene bağlanabilir. Bunlar boru içi pürüzlülük ve boru çapı olarak görülebilir. Şekil 3.9' da verilen sürtünme faktörü grafiklerine göre bakır ve PPRC boru sürtünme faktörleri daha düşük oldukları

görülmüştür yalnız bakır ve alüminyum boruların RMS değerleri hemen hemen aynıdır. Bu yüzden boru içi pürüzlüğün etkili olduğu söylenemez. Boru çapı en düşük olan PPRC borudur. Bakır ve alüminyum boru çapları aynıken demir ve galvanizli borunun çapları aynı ve sadece bu iki borudan "2 mm" daha büyüktür. Burada boru çapının RMS değerleri üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Bu durumun daha da netleşmesi için daha fazla deney çalışmasının yapılması gerektiği görülmektedir.

3.5. Sonuç

Piyasadan temin edilen, farklı malzemelerden imal edilmiş beş farklı boru türü ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Burada amaç beş ayrı boru türünü pürüzlülük yönünden değerlendirmek, gelişme bölgesinin özelliklerini incelemek ve sayısal çalışmayı doğruluk yönünden desteklemektir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Boru pürüzlülüklerini bulmak için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds ile değişimi incelenmiştir. Darcy sürtünme faktörü, 0.2-1.7 m ile 0.7-1.7 m mesafe aralıklarında 2000-25000 aralığındaki tüm Reynolds sayıları için hesaplanmıştır. 0.2-1.7m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörü değerlerinin 0.7-1.7 m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörü değerlerinden %2 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni 0.2-1.7m aralığında gelişen ve tam gelişmiş akış; 0.7-1.7 m aralığında ise tam gelişmiş akışın olmasıdır. Bu nedenle boru pürüzlülükleri tam gelişmiş akış şartlarının olduğu 0.7-1.7 m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinden bulunmuştur. Bu mesafe aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimlerine uyan pürüzlü Colebrook eğrileri çıkarılmıştır ve bu Colebrook eğrilerinden tahmini boru pürüzlülükleri bulunmuştur. Bulunan boru pürüzlülük değerleri azalan yönde galvanizli, demir, alüminyum, PPRC ve bakır boru değerleri sırasında gelmektedir. Galvanizli, demir, alüminyum boru pürüzlülükleri birbirine yakın, bakır ve plastik boru pürüzlülüklerinin ise on katı kadar çıkmıştır.

Yedi ayrı basınç prizinden okunan basınç çalkantıları incelendiğinde her Reynolds sayılı akışta basınç çalkantılarının aynı faz ve frekansta dalga ürettikleri fakat genliklerinin ise farklı olduğu görülmüştür. Basınç dalgalarının aynı faz ve frekansta olmalarının nedeni ise pompa titreşimlerinden kaynaklı debi dalgalanmaları olabileceği öngörülmüştür. Yedin-

ci basınç prizinde okunan basınç çalkantı değerleri (genlikleri) diğer prizlere göre daha düşük çıkmıştır.

2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılı akışlarda basınç çalkantılarının RMS değerleri hesaplanmıştır. Aynı Reynolds sayılı akışta her basınç prizindeki RMS değerlerinin aynı olduğu bulunmuştur. Tüm Reynolds sayıları için ayrı ayrı bulunan ortalama RMS değerlerinin genel ortalamaları alınmış ve sonuçta PPRC borunun en yüksek olduğu bulunmuştur. PPRC boruda yüksek olmasının nedeni ise boru çapı ile alakalı bir durum olabileceği öngörülmektedir. Durumu netleştirmek için daha fazla deneysel çalışmasının yapılması gerektiği görülmektedir.

Bundan sonraki bölümlerde ise sayısal çalışma sonuçları deneysel çalışmayla karşılaştırılmış ve gelişme bölgesi, akış özellikleri yönünden, sayısal olarak analiz edilmiştir.

4. REYNOLDS ORTALAMALI NAVIER STOKES DENKLEMLERİYLE SAYISAL ÇÖZÜM

4.1. Giriş

Sayısal çalışma, analitik olarak çözülemeyen ve deneysel metodlarla çözülmesi çok masraf gerektiren problemlerin çözümünü sağlayan bir ayrıklaştırma metodudur. Bu çözümde problem alanı çok küçük elemanlara ayrılır. Bu elemanlara var olan fiziksel kanunların uygulanmasıyla problem alanı çok bilinmeyenli denklem takımına dönüşür. Bu denklem takımı matematiksel metodlar kullanılarak bilgisayar yardımıyla çözülür ve böylece problem alanındaki tüm elemanların çözümü elde edilmiş olunur. Bu yöntemle deney yapma külfeti ve masrafı ortadan kalkmaktadır. Çözümün doğruluğu ise deney sonuçlarıyla kıyaslanarak elde edilir. Sayısal çözümler için pek çok bilgisayar programı oluşturulmuştur. Örneğin akış problemlerin çözümünde FLUENT ve CFX programları; Turbo makinaların çözümünde "Turbo System" programı; yapısal, ısı ve elektromanyetik ile ilgili problemlerin çözümünde ise "ANSYS Mechanical" programı kullanılmaktadır.

Akışlar ile ilgili sayısal çalışmaların çoğunluğu FLUENT ve CFX akış çözücü programlar ile yapılmaktadır. Bu sayısal çalışmada amaç gelişen boru akışında hız, basınç, kayma gerilmesi, sürtünme faktörü ve türbülans çalkantıları gibi akış özelliklerini analiz etmektir. Sayısal analizden elde edilen bilgilerle sayısal bağıntılar türetmeye çalışmaktır.

RANS yöntemle yapılan deneme çalışmaları sonucunda, CFX programıyla elde edilen sonuçların, deneylerle olan uyumu göz önüne alındığında, FLUENT sonuçlarına göre daha iyi oldukları görülmüştür. Bundan dolayı boru akışının RANS yöntemle çözümünde CFX akış çözücü programının uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca CFX programı iç akışların çözümü için önerilen bir program olmuştur.

Laminer akışların sayısal çözümü basit olurken türbülanslı akışların sayısal çözümü ise zor olmaktadır. Çünkü türbülanslı akışlarda akış içerisinde zaman ve konuma bağlı olarak gelişen ve geniş bir ölçü aralığına sahip olan türbülanslı yapılar vardır. Bu yapıların çözümü için bir çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Türbülanslı akışların sayısal çözümü iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi, türbülansın ani değerlerini kullanarak çözmektir. Bu çözüm yönteminde tüm türbülans ölçekleri zaman içerisinde çözüldüğünde bu nedenle bu çözüm yöntemi çok yüksek bilgisayar işleme zamanı ve hafızası gerektirmektedir. Bu sayısal çözüm yöntemine DNS denir. İkincisi ise türbülans değerlerini

ortalama değerler ve çalkantı değerlerine ayırarak çözmektir. Şimdiki sayısal simülasyonların çoğunluğu yaygın olarak bu yöntemi kullanmaktadır. Ortalama değerlerine ve çalkantı değerlerine ayrılan türbülanslı akış özellikleri Navier stokes denklemlerinde yerine yazılmasıyla RANS denklemleri elde edildiğini daha önceki konuda gösterilmişti. RANS denklemlerinde oluşan Reynolds gerilmelerin çözümü için pek çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu modellere RANS türbülans modelleri denir. CFX özücü programında bir çok RANS türbülans modeli mevcuttur. Bunlar k-epsilon, k-omega ve Reynolds gerilme modelleri ile bunların geliştirilmiş modellerinden oluşmak-tadır.

DNS metodunda, türbülanslı akışların tüm hareket ölçekleri zaman ve konuma bağlı olarak özölür. DNS türbülans çözümünde en doğru yöntemdir. Bu yöntemde akış alanı kolmogorov ölçeğine kadar küçültölür. Zaman adımı da kolmogorov ölçeğindeki türbülans yapıları çözmek için yeterince küçük seçilir. Bu da normal bir bilgisayar kapasitesinin çok çok üstünde işlem sayıları ve hesaplama zamanı demektir. Bugün bu çözüm yöntemi ancak basit ve düşük Reynolds sayılı akışlarda sınırlı kalmıştır. Bu tür akışlar da paralel hesaplama veya yüksek başarımlı bilgisayarlar kullanılarak özölülebilmektedir. Bu yöntem dışında RANS ve DNS modellerini birleşiminden oluşan LES hibrit modeli geliştirilmiştir. Bu model, DNS ile özölmesi mümkün olmayan yüksek Reynolds sayılı kompleks akışların özölmesine imkan sağlamıştır. Fakat LES özüm, DNS gibi akış alanındaki tüm türbülanslı yapıları çözmez sadece büyük ölçekli olanları çözer. Bu nedenle LES, DNS gibi gerçek akış şartları yaratmaz. LES özüm de yüksek hesaplama zamanı gerektirmesi nedeniyle LES ve RANS yöntemlerini bir arada kullanan DES ve U-RANS gibi hibrit türbülans modelleri de geliştirilmiştir. Bu son modeller duvara yakın akışta RANS özüm üreterek LES modeline kolaylık sağlamışlardır.

Bu bölümde türbülanslı boru akışlarının çözümü için RANS türbülans modellerinden yararlanılmıştır. RANS yöntemin seçilmesinin nedeni normal bir bilgisayar ile kısa zamanda çözümü sonuçlandırmasıdır. Eğer LES özüm tercih edilseydi, yeteri uzunlukta seçilecek bir boru akışının özölmesi için normal bir bilgisayar kullanımı yeterli olmaz ve çözüm için paralel hesaplama veya yüksek başarımlı bilgisayar kullanılmasına gerek duyulurdu. Ayrıca LES yöntem hala yeterince geliştirilememiş ve türbülanslı boru akışlarının tam çözümü için eksiklikleri bulunmaktadır.

RANS modellerde türbülans viskozitesi Boussinesq hipotezine göre modellendiğinden türbülans akış özelliklerinin ortalama akış üzerine olan etkileri ortalama değerleriyle

simüle edilir. Burada akış alanı içerisinde türbülans akış özelliklerinin konum ve zamana göre anlık değerleri elde edilemez.

Eğer akış içerisindeki türbülans akış özelliklerinin ayrıntılı değerleri istenmiyorsa RANS modellerle çözüm yapmak daha uygun olmaktadır. Çünkü kısa zamanda çözüm sağlarlar. Ayrıca yapılan pek çok uygulamayla bu modellerin yeterli derecede iyi oldukları bulunmuştur. Şimdiki mühendislik uygulamaların çoğunluğu RANS türbülans modelleri ile gerçekleştirilmektedir.

RANS SST k-omega modeli, yüzeyden akış ayrılması ve laminar-türbülans geçiş akışları için oluşturulmuş bir modeldir. Bu nedenle gelişen boru akışının çözümü için SST modelinin kullanılması uygun olmaktadır.

Bu bölümde boru akışları SST k-omega modeli ile çözülecek ve çıkan sonuçlar yapılan deney sonuçlarıyla, deneysel bağıntılarla ve başka deney değerleriyle karşılaştırılacaktır. Bir sonraki bölümde ise gelişen boru akışı LES metodu ile çözülecek ve çıkan sonuçlar deney değerleriyle ve RANS sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

4.2. SST k-omega Türbülans Modeli ile Çözüm

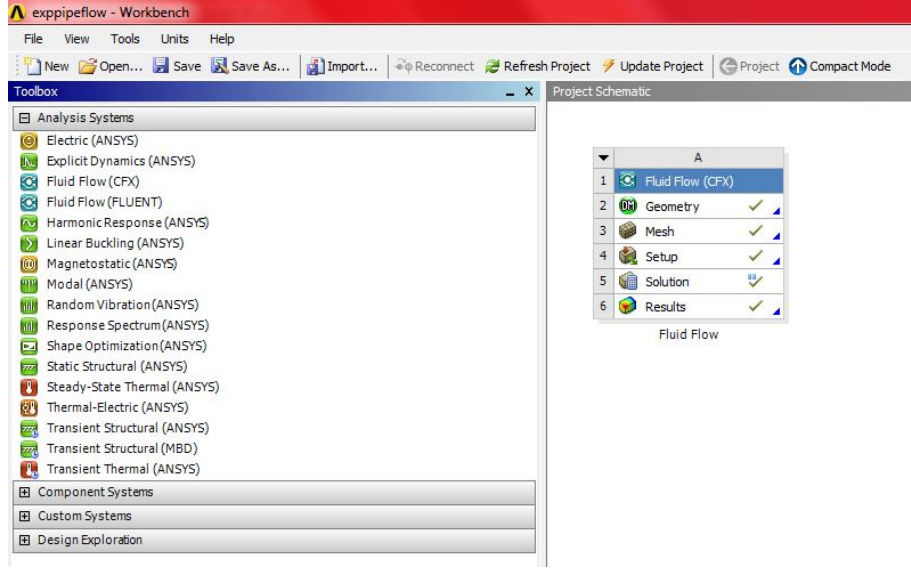
Bu bölümde, yapılan deneysel boru akışlarına paralel SST modeli ile sayısal çözümler üretilenektir. SST modeli duvara yakın çözümlerde duvar fonksiyonlarını otomatik olarak işletebilen bir modeldir. Bu modelde duvara yakın ağdaki düğüm noktaları laminar alt tabaka içerisinde ise model duvar fonksiyonları işletmez yerine düğüm noktalarında oluşan hız değerlerini okur. Eğer ağ noktaları bu tabaka dışında ise model otomatik olarak duvar fonksiyonlarını işletir. Duvara yakın akış özelliklerinin çözülmesi istenirse boyutsuz duvar mesafesinin $y^+ < 2$ olacak şekilde oluşturulması gerekir. Duvara yakın tam ayrıntılı değerlerin yakalanabilmesi için genelde $y^+ < 1$ olması tercih edilmektedir. Laminardan türbülansa geçiş, duvardan akış ayrılması gibi akış olaylarında duvar fonksiyonları işletilmesi halinde geçiş noktaları doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Çünkü duvar fonksiyonları deneysel bağıntılardır ve sınır tabaka ayrılmalarında sınır tabaka profilini tam doğru olarak tahmin etmeyebilirler. Düğüm noktaları laminar tabakayı çözecek şekilde duvara yakın oluşturulduğunda duvar fonksiyonları işlenmez ve yerine duvara yakın çözüm sağlanır. Bu şekilde duvara yakın yüksek çözünürlüklü çözüm ile laminardan türbülansa geçiş ve duvardan akış ayrılmaları doğru olarak tahmin edilebilmektedir. Bu nedenle gelişen boru

akışı SST modeli ile çözülmüştür. Boru akışı için oluşturulan geometri ve ağ yapısı ise aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

4.2.1. Boru Geometrisi ve Ağ yapısı

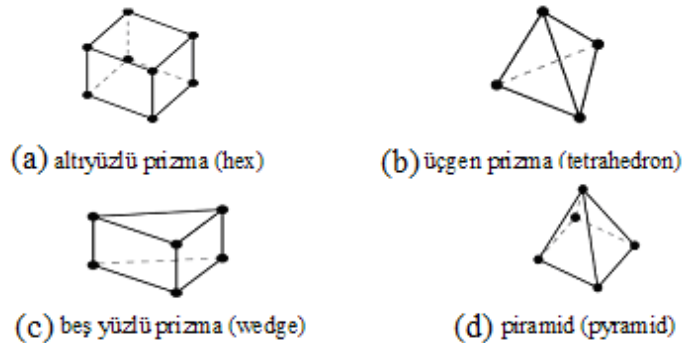
Sayısal programlarda çözüm için gerekli bilgisayar işleme zamanı bazı akış olaylarında problem yarattığında bunu aza indirmek için pek çok kolaylıklar sağlanmıştır. Örneğin akış alanı büyük olan geometrilerde akış simetrisi veya periyodikliği kullanılarak akış alanı küçültülebilir. Bu şekilde yüksek çözünürlüklü ağ oluşturulabilir ve daha doğru çözümler elde edilir ve aynı zamanda bilgisayar işleme zamanı da küçültülebilir. Boru akışları, RANS denklemleri ile çözüldüğünde akış eksenine boyunda radyal yönde akış simetrisine sahip olur. Eğer türbülanslı akış, DNS ve LES gibi modellerle çözülürse akış simetrisine sahip olmaz çünkü akış içerisinde gelişen türbülanslı yapılar akış en kesitinde simetrik değildirler. Burada, simetriklikten yararlanarak yüksek çözünürlüklü ağ oluşturulmuştur.

Ansys Workbench programı, bir çok projeyi bir arada bulunduran ve birbirleri arasındaki bilgi transferini sağlayan bir paket programıdır. Bu paket programında akış, ısı, mekanik, dinamik ve elektromanyetik gibi fiziksel problemler için çözücü programlar mevcuttur. Ansys Workbench'te sayısal analizi yapılacak problem için çözücü program adı altında bir proje oluşturulur. Bu projede cismin geometrisi oluşturulur (Geometry), oluşan geometride ağ oluşturulur (Mesh), sınır şartları ve fiziksel değerler atanır (Setup), problem çözülür (Solution) ve çıkan sonuçlar değerlendirilir (Results). Böylece bir projeye tüm işlemler sırasıyla ve bağlantılı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Ansys Workbench'te "Fluid Flow (CFX)" programı adı altında oluşturulan bir projenin görüntüsü Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Ansys Workbench projelendirme penceresi

Sayısal çalışma için oluşturulan projede "Geometry" seçeneği tıklanmış ve açılan programda beş derecelik açıya sahip bir boru akış geometrisi oluşturulmuştur. Boru akışında radyal yönde akış simetrikliğinden yararlanılmıştır. Daha küçük açılı bir boru geometrisi de oluşturulabilir ancak ağ geometrisini oluşturan elemanların geometrik yapıları çok bozulacağından yakınsama problemlerine neden olabilir. Eğer FLUENT programı kullanılırsa yüksek çözünürlüğe sahip iki boyutlu bir boru akış alanı oluşturulabilir ve çözüm çok daha kısa zamanda sonuçlandırılabilir. Çünkü FLUENT programı iki ve üç boyutlu akışları çalıştırabilen bir programdır. CFX programı ise sadece üç boyutlu akışları çalıştırabilen bir programdır. Üç boyutlu ağ oluşturmak için kullanılan elemanların geometrik yapıları ise Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Ağ elemanların olduğu üç boyutlu geometrik şekiller

Bu elemanlar iki boyutlu yüzey elemanlarından oluşmaktadır. Bu elemanların ideal geometrilerindeki bozulma miktarı oluşturulan ağın kalite derecesini belirlemektedir.

Ağ elemanların standart geometrilerden sapma miktarları ve sıklıkları bir ağın kalitesini belirlemede ölçüt olmaktadır. Bir ağ oluşturulurken, elemanların yapıları ve geometrideki dağılımları çözümün doğruluğunda etkili olabilmektedir. Elemanların standart geometrik yapılarından sapma miktarları "Mesh" programında "statistics" adı altında ve "mesh metrics" kısmında görülebilmektedir. "Mesh Metric" içinde

- Element Quality (eleman kalitesi)
- Aspect Ratio (görünüş oranı)
- Jacobian Ration (jakobyan oranı)
- Warping Factor (eğrilik faktörü)
- Parallel Deviation (paralel sapma)
- Maximum Corner Angle (maksimum köşe açısı)
- Skewness (çarpıklık)

gibi istatistiki hesaplamalar ile ağın kalitesi belirlenebilmektedir. Farklı fiziksel işlemler ve farklı çözücüler ağ kalitesi yönünden farklı gereksinimlere sahip olabilmektedir. Örneğin FLUENT ve CFX çözücülerinin kalite gereksinimleri farklı olabilmektedir. Çözücüler içinde düşük kaliteli ağları tolere edebilen FLUENT programıdır. Bunun nedeni FLUENT hücre odaklı çözüm yaparken CFX düğüm odaklı çözüm yapmaktadır.

Bir ağın kalitesinde birinci dereceden etkili olanlar "skewness" ve "Aspect Ratio" istatistiki hesaplamalarıdır. Ağ oluşturulduktan sonra bu hesaplamalara bakılmalıdır. "Skewness" ağ elemanlarının çarpıklığını belirleyen bir orandır. Eleman kalitesi yönünden birinci dereceden bakılması gereken bir orandır. "skewness" değeri *sıfır* olan eleman standart elemandır ve kalitesi en yüksek olandır, değeri *bir* olan eleman ise en çarpık elemandır ve kalitesi en düşük olandır. Bu orandan saptıkça eleman o oranda çarpıklaşmış olur. Şekil 4.3'te üçgen ve dikdörtgensel elemanların çarpıklıkları gösterilmiştir.



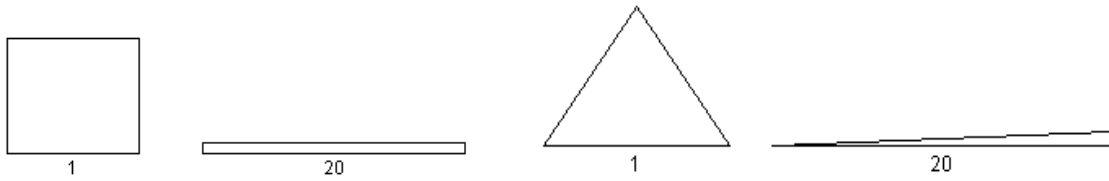
Şekil 4.3. İki boyutlu yüzeysel ağ oluşturan elemanların standart ve çarpık halleri

Tablo 4.1'de skewness değerine göre eleman kalitesi belirtilmiştir. Bu değerlere göre ağ kalitesi değerlendirilir.

Tablo 4.1. Skewness değerine göre ağ elemanlarının kalitesi

Skewness değeri	Eleman kalitesi
0.98-1	Kabul edilemez
0.95-0.98	kötü
0.80-0.95	Kabul edilebilir
0.5-0.80	iyi
0.25-0.5	Çok iyi
0-0.25	mükemmel

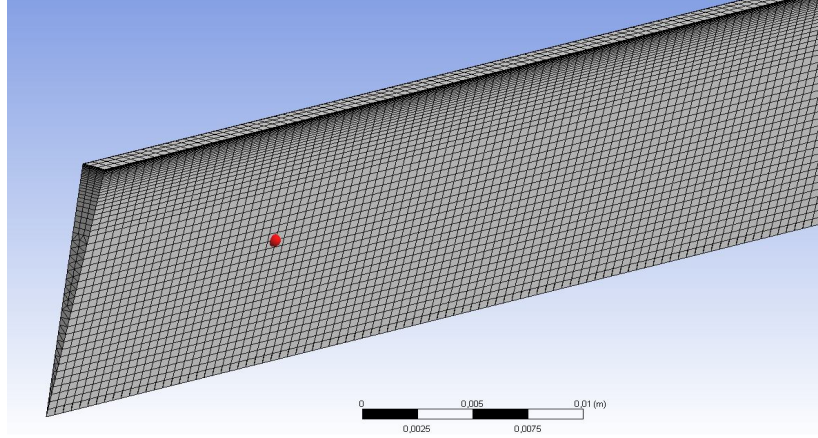
"Aspect Ratio" değeri ise üçgen ve dikdörtgen elemanlarda uzun kenarın kısa kenara oranı olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde dikdörtgen ve üçgen ağ elemanlarında Aspect Ratio değerleri verilmiştir. "Aspect Ratio" değeri bir olan eleman standart elemandır ve kalitesi en yüksektir. Bu değer arttıkça kalite de düşer.



Şekil 4.4. Dikdörtgen ve üçgen elemanlarda "aspect ratio" değeri

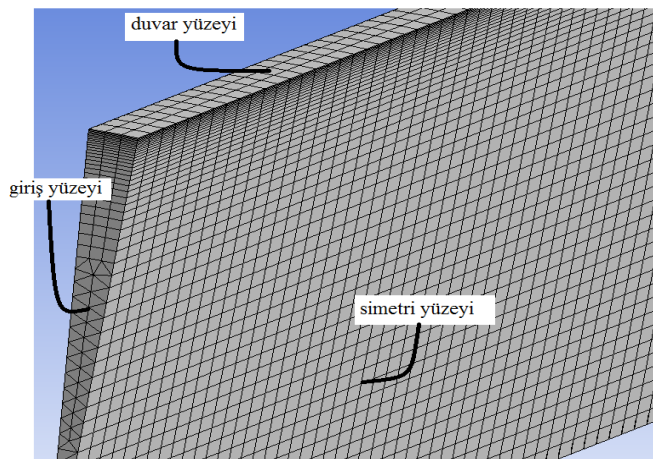
Görüldüğü gibi "Aspect Ratio" ve "skewness" değerleri standarttan çok fazla sapmadıkları sürece oluşturulan ağın kalitesi iyi olmaktadır. Ağ elemanlarında Aspect Ratio en fazla 40 değerine kadar tolere edilebilmektedir. Fakat duvara yakın sınır tabaka için atılan "inflasyon" katmanlarında (duvara yakın atılan yüksek çözünürlüklü ağ katmanları) ise bu değer 50'den daha fazla tolere edilebilmektedir [1]. Aynı zamanda Skewness değerinin de 0.85 değerinden büyük olmaması istenir. Bu sınırların aşılması halinde çözüm doğruluğu azalır ve yakınsama problemleri oluşabilir. Tabi ki bu kusurların oluşmasında ağ elemanların bulunduğu konum da etkili olabilmektedir. Örneğin düşük kaliteli ağ elemanların akış alanındaki basıncın ve hızın yüksekçe değiştiği bölgelerde bulunması halinde hatalı sonuçlara neden olunabilirken normal değiştiği bölgelerde bulunmaları halinde ise sonuçlar üzerinde pek etkili olamamaktadırlar.

"Design Modeller" programında oluşturulan 5 derecelik boru akış geometrisi ve "Meshing" programında bu geometri için oluşturulan ağıın yapısı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Derecelik boru geometrisinde oluşturulan ağıın yapısı

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi boru akış geometrisi dört yüzeyle sınırlanmıştır. Bunlar, akışkanın akış geometrisine girdiği giriş yüzey alanı, çıktığı çıkış yüzey alanı, akışkanın geometriden çıkmasını engelleyen duvar yüzey alanı ve kalan diğer iki yüzey alan ise simetri yüzey alanları olmaktadır. Simetrik yüzeyler boru akışının radyal yöndeki simetrisinden kaynaklıdır. Her iki yüzey aynı akış simetrisine sahiptir. Bu yüzey alanlar Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Akış geometrisi yüzeyleri

Bu geometride bulunan dört yüzey alan akışın sınır şartlarını belirlemiştir. Bunlar giriş sınır şartı, çıkış sınır şartı, duvar sınır şartı ve simetri sınır şartı olmuştur. Bunun için geometri yüzeyleri bu sınır şartı isimleriyle isimlendirilmiştir.

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi giriş yüzeyindeki ağ duvara yakın inflasyon katmanlarından ve kalan kısımda ise üçgen yüzey elemanlarından oluşturulmuştur. İlk inflasyon katmanının duvardan uzaklık mesafesi $y^+ < 1$ olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu ilk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesidir. Boyutsuz duvar mesafesi (y^+) ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilmektedir.

$$y^+ = \frac{u}{\nu} y \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (4.1)$$

Burada " f " darcy sürtünme faktörü, " u " ortalama akış hızı (m/s), " ν " kinematik viskozite ve y ise ilk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesidir. İki inflasyon katmanının birbirine göre büyüme oranı 1.1 olarak seçilmiştir. Duvara yakın ilk inflasyon katmanı $y^+ < 1$ olacak şekilde kalınlığı hesaplanır ve sonraki katmanlar 1.1 oranında büyürler. Örneğin bakır borunun sayısal çalışmasında ilk düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Re = 8000 sayılı akış için

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad 8000 = \frac{996 u 0.026}{0.00085} \quad \Rightarrow \quad u = 0.263 m/s$$

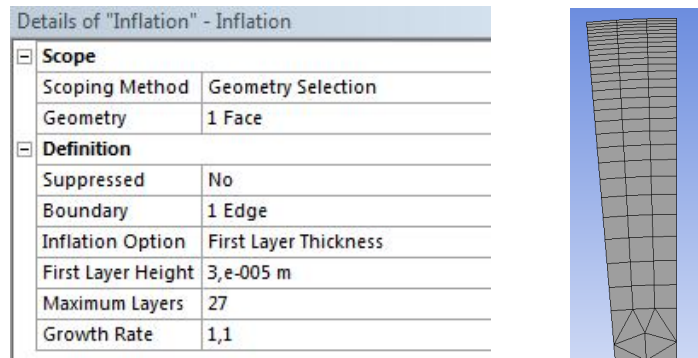
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.00085}{996} = 8.54 \cdot 10^{-7}$$

Bakır borunun $1.63 \cdot 10^{-4}$ bağıl pürüzlülük değeri için Moody diyagramından 8000 Reynolds sayısına karşılık gelen Darcy sürtünme faktörü olan $f = 0.033$ değeri okunur ve formülde yerine yazılır.

$$y^+ = \frac{u}{\nu} y \sqrt{\frac{f}{8}} \quad \Rightarrow \quad 1 = \frac{0.263}{8.54 \cdot 10^{-7}} y \sqrt{\frac{0.033}{8}} \\ \Rightarrow y = 5 \cdot 10^{-5} m$$

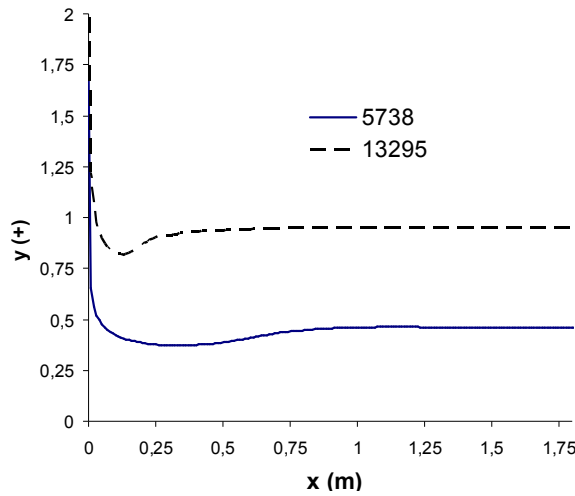
Buna göre ilk inflasyon katmanındaki düğüm noktasının duvardan uzaklık mesafesi 0.05 mm olmaktadır. Fakat ilk inflasyon katmanının duvara çok yakın olması için $y = 0.03$ mm değeri kullanılmıştır.

Ağ oluşturma programında bulunan inflasyon katmanları, özellikle, sınır tabakaların çözümü için geliştirilmiş bir ağ çeşididir ve sınır tabaka çözümlerinde çok iyi işlev görmektedirler. Boru geometrisinde oluşturulan inflasyon katmanları ve ağ oluşturma programındaki inflasyon detayları Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Ağ oluşturma programında inflasyon detayları ve duvara yakın oluşturulan inflasyon katmanları

Çözümü bitmiş bir boru akışının boru duvarı boyunca olan boyutsuz duvar mesafe değerleri CFD-post programında grafik olarak görüntülenebilmektedir. Şekil 4.8, Reynolds sayıları farklı olan iki bakır boru akışının CFD-post programından çıkartılmış boyutsuz duvar mesafelerini göstermektedir.



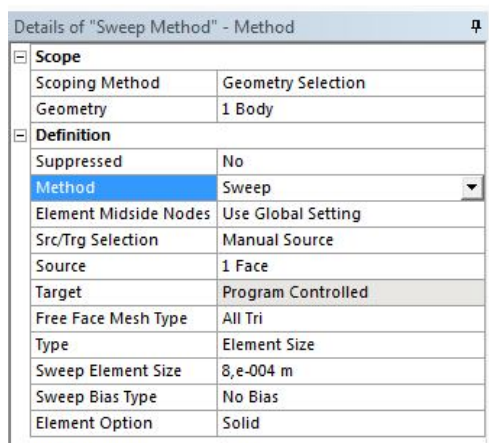
Şekil 4.8. Boru geometrisinde oluşturulan ağın boru duvarı boyunca boyutsuz duvar mesafe değerleri

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi aynı ağla yapılan iki sayısal çalışmada y^+ değerleri farklı olabilmektedir. Her iki durumda da y^+ değerleri "1" değerinin altındadır. y^+ değerlerinin her zaman "1" değerinin altında olması için her Reynolds sayılı akışta ağ yeniden oluşturulmalıdır.

Boyutsuz duvar mesafesi dışında, aşağı akım yönlü ve açısal yönlü boyutsuz mesafeler, sırasıyla, $z^+=40$ ve $x^+=20$ olacak şekilde boru geometrisinde ağ oluşturulmuştur. Bu boyutsuz mesafeler de boyutsuz duvar mesafe gibi aşağıdaki gibi hesaplanmışlardır.

$$x^+ = \frac{u}{\nu} x \sqrt{\frac{f}{8}} \quad z^+ = \frac{u}{\nu} z \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (4.2)$$

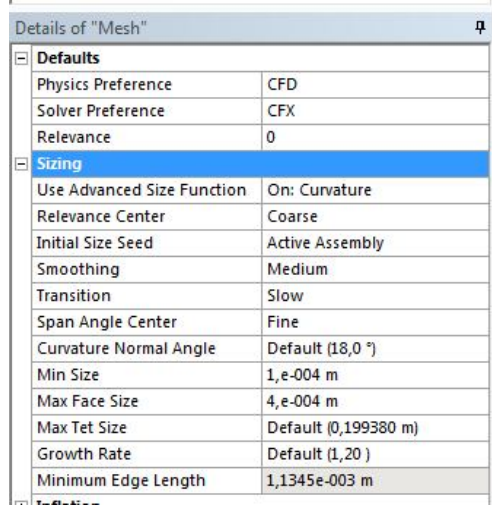
Ağ elemanları oluşturulurken bir çok ağ oluşturma metodu vardır. Bunlar; sweep, tetrahedron, hex dominant, multizone ve CFX mesh metodlarıdır. Boru akışı için sweep metodundan yararlanılmıştır. Sweep metodu; tek yönlü akış geometrilerini istenilen sayıda elemanlara bölebilmeye yeteneğindedir. Bu metodla 2 m'lik boru akışı 0.8 mm kalınlığındaki eşit elemanlara bölünmüştür. Ayrıca sweep metodun ve inflasyon katmanlarının yüzey alanlarda oluşturduğu ağlar dışında, kalan diğer yüzey alanlarda ağın oluşturulması için sweep metodu detaylarında serbest yüzey ağ türü (free face mesh type) seçeneği ile yüzey eleman türü belirlenir. Burada üçgen yüzey eleman türü seçilmiştir. Sweep metodunun detayları ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Ağ oluşturma programında sweep metodun detay penceresi

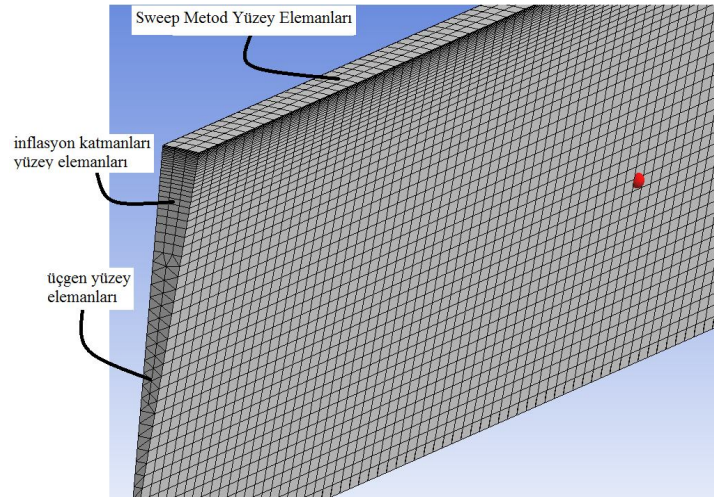
Sweep metoduyla seçilen üçgen türü elemanların boyutları ise "ağ detayları" penceresinde girilir. Bu pencerede üçgen yüzey elemanlarının maksimum yüzey boyutu 0.4 mm ve

minimum boyutu ise 0.1 mm seçilmiştir. Ağ detayları penceresinde yapılan bu işlem Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



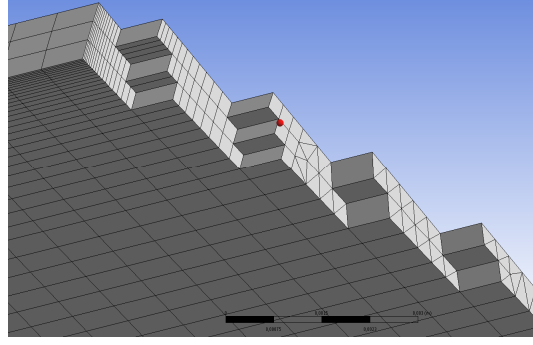
Şekil 4.10. Ağ detayları penceresi

Ağ oluşturma işlemi sonunda akış yüzeylerinde oluşan ağ elemanları Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Akış yüzey alanlarında oluşturulan ağ elemanları

Sweep metodu, inflasyon ve üçgen geometri yüzey elemanları ile akış geometrisinde beş yüzlü (hex) ve altı yüzlü (wedge) geometrik prizmalar oluşmaktadır. Bu elemanlar Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



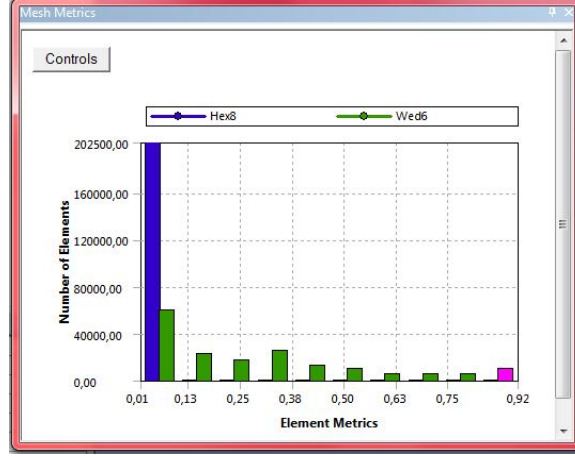
Şekil 4.12. Ağ geometrisinde oluşan altıyüzlü prizma (hex) ve beş yüzlü prizma (wedge) elemanları

Akış geometrisinde oluşan ağın düğüm sayısı, eleman sayısı ve kalitesi ağ detayları penceresinde "statistics" seçeneği altında yer almaktadır. Bu seçeneğin açılmış hali ise Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Advanced	
Pinch	
Statistics	
Nodes	422669
Elements	375000
Mesh Metric	Skewness
Min	9,25860528032229E-03
Max	0,917295312707633
Average	0,132132473543676
Standard Deviation	0,213168022375646

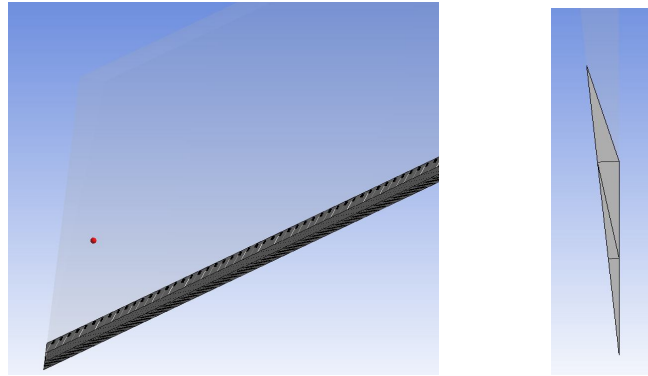
Şekil 4.13. Ağ detaylarında istatistik değerleri

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi "statistics" seçeneği altında ağ geometrisinde oluşan toplam düğüm nokta sayısı 422669 ve eleman sayısı da 375000'dir. "Mesh Metric" 'te seçilen skewness terimine ait Minimum, Maksimum ve Ortalama değerler, seçeneğin altında gösterilmiştir. Ortalama değer 0.13 gibi olması fazla çarpık elemanın olmadığını göstermektedir. Skewness değerinin eleman sayısına göre dağılımı ise aşağıdaki "Mesh Metric" penceresinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Ağ oluşturma programında skewness değerinin eleman sayısına ve türüne göre dağılımı

Şekil 4.14'teki pencere skewness değerine göre eleman sayısını göstermektedir. Skewness değeri 0.01-0.13 arasında olan "hex8" ve "wed6" elemanların sayısı sırasıyla 202500 ve 60000 civarındadır. Burada "hex8" altıyüzlü ve "Wed6" ise beş yüzlü elemanlar olmak-tadır. Element Metrics ekseninde yüksek skewness değerlerine doğru eleman sayısı azalmaktadır. Örneğin skewness değeri 0.92 olan elemanlar 10000 civarındadır. Bu değere sahip sütun tıklanırsa (pembe renkli olur) bu değere sahip elemanların, Şekil 4.15't olduğu gibi, akış geometrisindeki konumları görüntülenmiş olunur.

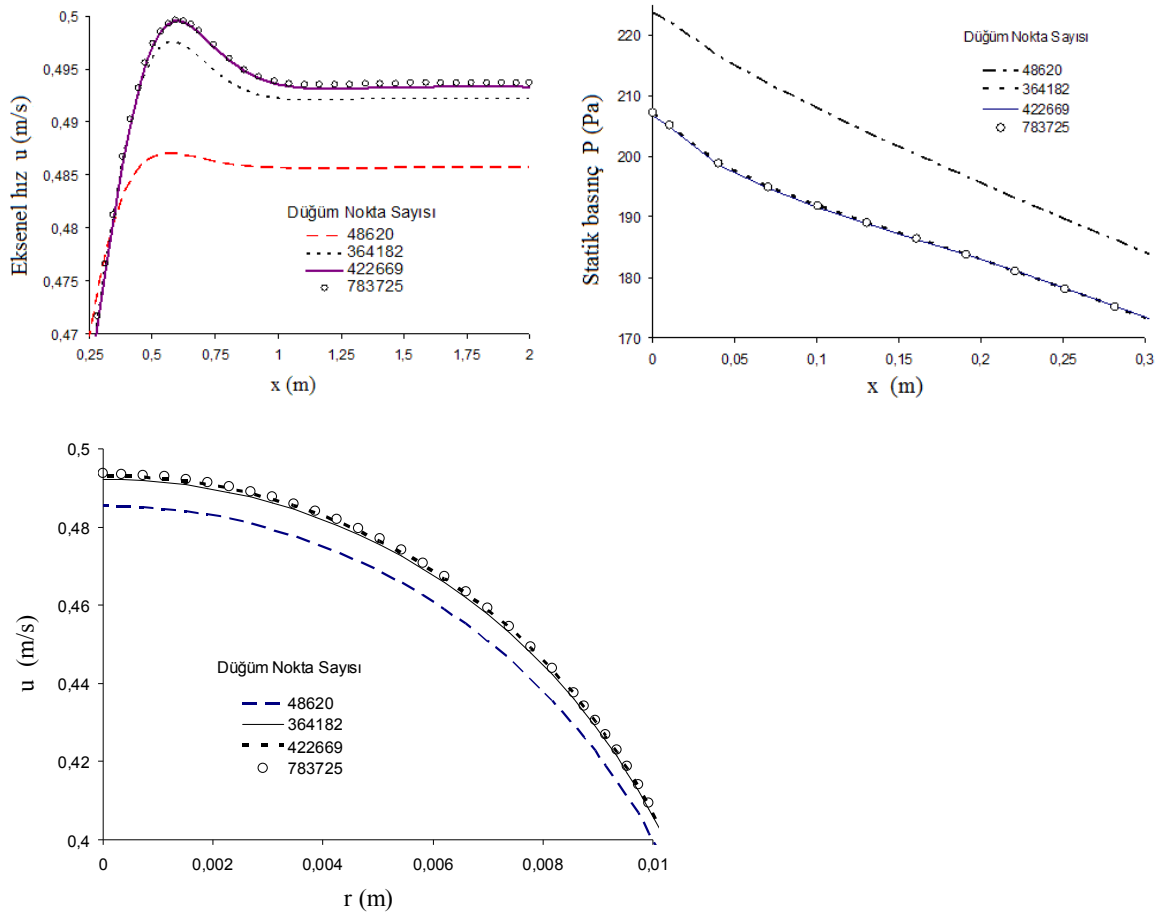


Şekil 4.15. 0.92 skewness değerine sahip elemanların geometrideki konumları ve üçgen yüzey görüntüleri

Şekil 4.15'te gösterildiği gibi merkez çizgisine yakın olan elemanlar en çarpık elemanlardır. Çünkü beş derecelik açıyla oluşturulan geometri, merkez çizgisinde keskin bir köşe oluşturuyor. Bu yüksek çarpıklığa sahip elemanlar sayıca azdır ve çözüm doğruluğu üzerinde konumları itibariyle pek etkili değildirler. Eğer bu elemanlar hız veya basıncın yüksekçe değiştiği konumlarda bulunsalardı çözüm doğruluğu üzerinde olumsuz

etkiye sahip olurlardı. Boru merkezine yakın bölgelerde hız ve basınçta yüksekçe değişme yoktur.

Akış geometrisinde oluşturulan ağ, çözüm ağdan bağımsız oluncaya kadar ağ boyutları küçültülmüştür. Ağdan bağımsız yapılan çalışmada eksenel hızın, basınç düşüşünün ve en kesit hız dağılımının değişim eğrileri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Ağdan bağımsız çalışmada, sırasıyla, eksenel hız, statik basınç düşüşü ve akış en kesit hız dağılımının değişimleri

4.2.2. Sınır Şartları ve Fiziksel Koşulların Atanması

Akış geometrisinde sınır şartlarının ve fiziksel değerlerin atanması için CFX proje alanında "Set up" seçeneği tıklanır. Açılan CFX-Pre programında giriş, çıkış, duvar ve simetri sınır şartları oluşturulur. Giriş sınır şartında (inlet), boruya geçen akışkan düzgün hız profilinde olduğu için ortalama hız değeri girilir. Giriş sınır şartında hız değeri yerine akış debisi de girilebilir ancak bu durumda hızın giriş profili belirtilmemiş olunur.

Boruya üst akımdan taşınan türbülansın değeri de giriş sınır şartı detayında girilir. Yapılan sayısal çalışmalar deneysel çalışma paralelinde oluşturulacağından deney borusuna üst akımdan gelen türbülans değerinin bilinmesi gerekir. Fakat deneylerde giriş türbülans değeri bilinmemektedir. Bu nedenle değişik giriş türbülans değerleriyle sayısal çalışmalar yapılmış ve deney değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak %7 giriş türbülans değerinin sayısal çalışma sonuçlarını deney değerleriyle iyi uyuşturduğunu göstermiştir. Bu nedenle tüm sayısal çalışmalarda giriş türbülans değeri %7 olarak girilmiştir. Değeri girilen giriş türbülansı ile birlikte türbülans uzunluk ölçeği veya eddy viskozite oranı gibi bazı türbülans özelliklerinin de değerlerinin girilmesi gerekli olmaktadır. Ansys CFX programı türbülans özelliklerin hesaplanması için aşağıdaki bağıntıları kullanmaktadır [1].

$$l = 0,07D_H, \quad k = \frac{3}{2}(UI)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{2/3}}{l}, \quad \omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} l}, \quad (4.3)$$

Burada D_H hidrolik çaptır, l türbülans uzunluk ölçüsü, k türbülans kinetik enerjisi, I türbülans yoğunluğu, ε türbülans yayılma oranı, ω türbülans frekansı ve C_μ ise türbülans modellerinde belirtilen bir sabittir. Yukarıdaki bağıntılardan türbülans özellikleri hesaplanır.

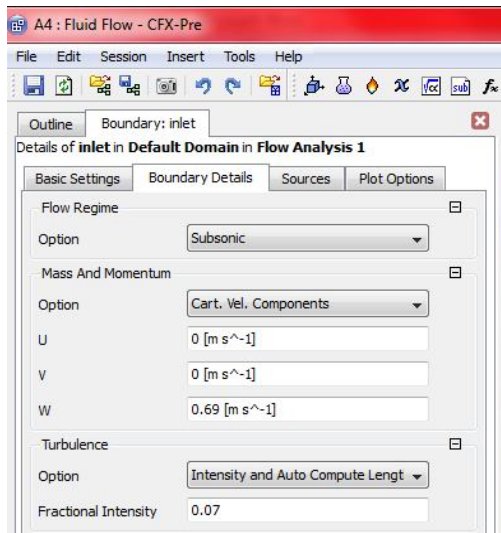
Duvar sınır şartında (wall), kaymama koşulu belirtilir ve duvar pürüzlülük değeri girilir. Burada belirtilen pürüzlülük yüksekliği Moody diyagramında belirtilen kum tanesi pürüzlülük yüksekliğidir. Çıkış sınır şartında (output), çıkış basıncının değeri girilir. Çıkış atmosfere açıldığı düşünüldüğünde sıfır basınç değeri (etkin basınç değeri) veya 1 atm değeri (mutlak basınç değeri) girilir. Eğer deney şartlarına uygun çıkış basıncı istenirse deney çıkış basınç değeri girilir. Simetri sınır şartında ise herhangi bir işlem yapılmaz sadece bu yüzeylerin simetrik oldukları belirtilir.

Sınır şartları dışında çözücü program akış problemini çözmeye başlarken ağ düğüm noktalarındaki hız ve basınç gibi akış alanı değişkenlerini bazı değerlerden başlatması gerekir. Buna başlatma (initialization) değerleri denir. Eğer başlatma değerleri girilmezse çözücü program akış alanı değişkenlerini sıfırdan başlatır ve çözmeye başlar yalnız burada çözümün sonuca ulaşması çok zaman alır. Örneğin hız değişkenine başlangıç değeri olarak akışkanın giriş sınır şartındaki hız değeri verilebilir. Çözücü program bu hız değerini boru akışı için bir hız profiline dönüştürür ve tüm ağ noktalarına bu hız profil değerlerini atar.

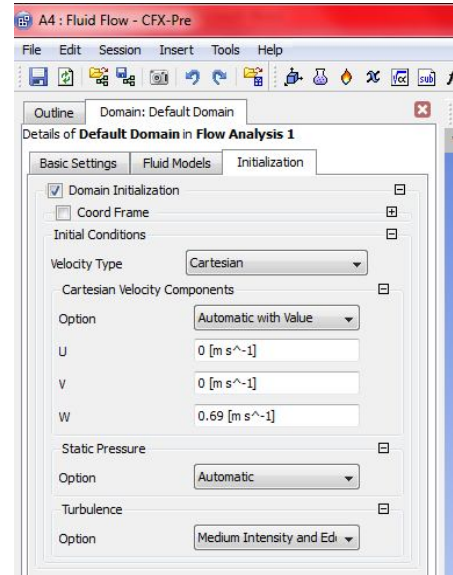
Yani çözücü program tüm ağ noktalarını sabit bir hız değerinden başlatmaz. Çözücü programda hız profilini uyduran duvar fonksiyonları mevcuttur. "Başlatma" detaylarında ayrıca boru akışında oluşacak türbülans için uygun bir türbülans başlangıç değeri girilmesi gerekir. Boru içerisinde oluşması düşünülen türbülans değeri veya giriş sınır şartındaki türbülans değeri de girilebilir. Tam gelişmiş boru akışlarının göbeğinde oluşan türbülans yoğunluğu aşağıda verilen deneysel bağıntıyla hesaplanabilmektedir [1].

$$I = \frac{u'}{U} = 0.16(\text{Re})^{-1/8} \quad (4.4)$$

Burada u' çalkantı hızı ve Re boru akışında hesaplanan Reynolds sayısıdır. Başlatma detayında akışkanın statik basınç değeri de belirtilebilir veya otomatik seçeneğiyle çözücü programa bırakılabilir. Böylece çözücü program başlangıç değerleriyle çözümü başlatmış olacaktır ve sonuçların elde edilmesinde fazla zaman harcanmayacaktır. Örnek olarak, 21043 Reynolds sayılı alüminyum boru akışında girilen sınır şartları ve başlatma değerleri Şekil 4.17'de verilen program pencerelerinde gösterilmiştir.

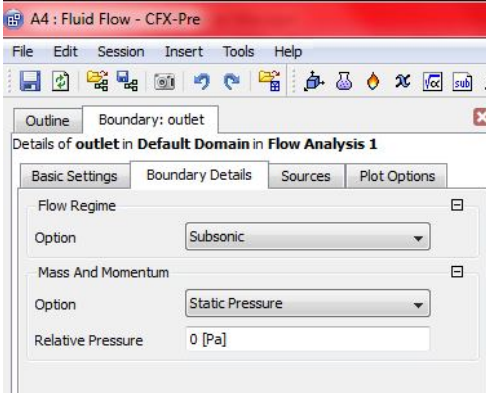


(a)

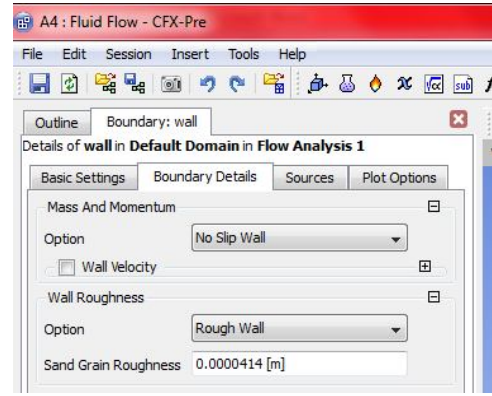


(b)

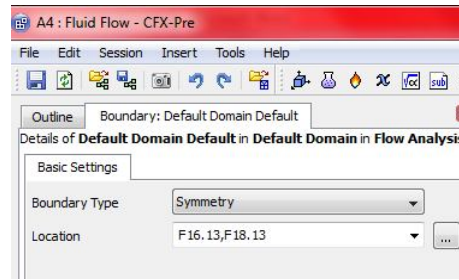
Şekil 4.17 sonraki sayfada devam ediyor



(c)



(d)



(e)

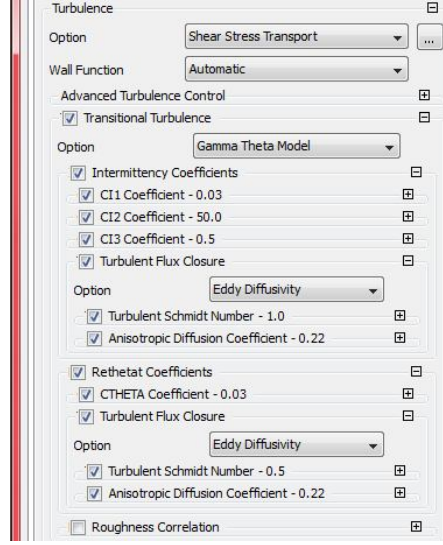
Şekil 4.17. Alüminyum boru akışında sınır şartları ve başlatma değerleri; giriş sınır şartı (a), başlatma değerleri (b), çıkış sınır şartı (c), duvar sınır şartı (d), simetri sınır şartı (e)

Türbülanslı boru akışı RANS ile çözüldüğü için daimi akışı sağlamaktadır. Boru akışının DNS veya LES ile çözülmesi halinde daimi akış şartları oluşmaz. Çünkü akış içerisinde gelişen türbülans çalkantıları zamana bağlı olarak çözülmektedir. RANS çözümde ise akış çalkantılarının etkisi modellendiğinden akış özellikleri zamana bağlı değişmezdir. Bunun için CFX-Pre programında analiz türü, daimi durumlu (steady state) seçilir. Boru akışı için SST k-omega türbülans modeli seçilmiştir. SST modeli ile birlikte laminar-türbülans geçiş akışının oluşmasını sağlayan "Transitional Turbulence" seçeneği işaretlenmiştir. Bu seçimle, geçiş akışı için dört farklı model önerilmektedir. Bu modeller tam türbülans (fully turbulent), belirtilen aralık (specified intermittency), Gamma Modeli (Gamma Model) ve Gamma Teta Modeli (Gamma Theta Modeli) 'dir.

Mühendislik laminar-türbülans geçiş tahminleri başlıca iki modelleme konsepti üzerine kuruludur. İlk yaklaşım düşük Reynolds sayılı k-omega modellerini kullanmaktır. Bu modellerde bulunan duvar sönümlleme fonksiyonları geçiş durumunu tetikler. Bununla birlikte tecrübeler, bu yaklaşımın geçişi etkileyen pek çok faktörün etkisini güvenilir bir

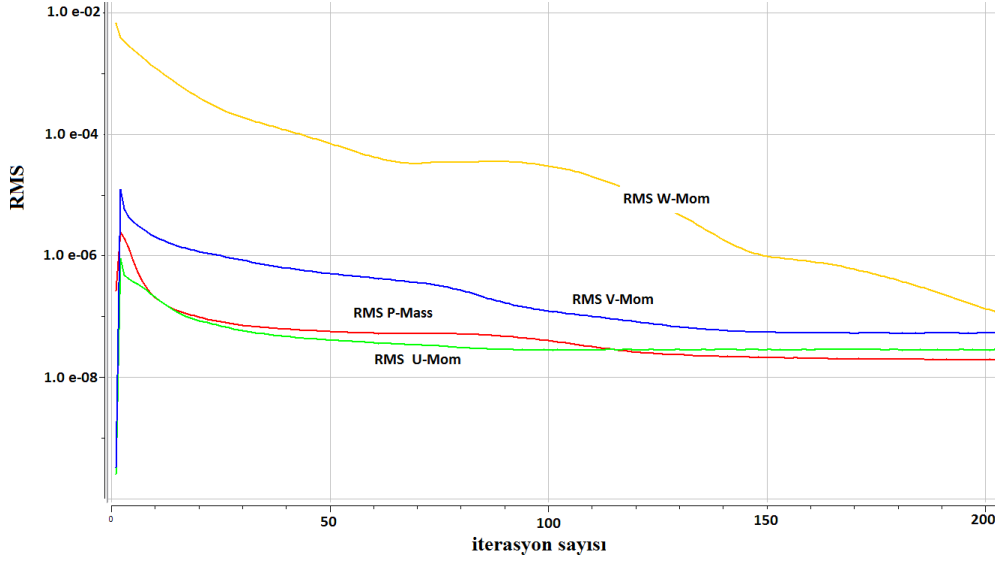
şekilde yakalama yeteneğinde olmadığını göstermiştir. Bunlar serbest akım türbülansı, basınç gradyenleri ve ayrılma gibi faktörlerdir [1].

İkinci yaklaşım ise deneysel bağıntıların kullanılmasıdır. Bu bağıntılar genellikle serbest akımdaki türbülans yoğunluğunu laminardan türbülansa geçiş noktasındaki momentum kalınlık Reynolds sayısı oranıyla (Re_θ) ilişkilendirmiştir. Ansys geçişi tetiklemede kullanılabilen "intermittency" için yerel olarak formüle edilmiş bir transport denklemi geliştirmiştir. Bu tam model iki transport denklemi üzerine kuruludur, biri "intermittency" içindir ve diğeri ise momentum kalınlık Reynolds sayısı ile ilişkilendirilmiş kritik geçiş noktası kriteri içindir. Bu modele "Gamma Theta Modeli" denir ve genel amaçlı uygulamalar için tavsiye edilen bir geçiş modelidir. Bu oluşturulan model SST türbülans modeliyle birlikte kullanımda geniş kapsamlı geçiş akışları için uygun olmaktadır. Bu model başka türbülans modellerinde de kullanılmaktadır. Ayrıca, "Gamma Theta modeli" kendinize ait kullanıcı tanımlı deneysel bağıntıları, momentum kalınlık Reynolds sayılı denklemi kontrol ederek, kullanabilmenize imkan sağlamıştır. Bu sayede deneyinize ait momentum kalınlık Reynolds sayısını girerek deneyinize ait geçiş noktasının yerini oluşturabilirsiniz. Bu iki denklemlilik model dışında sıfır denklemlilik model olan "specified intermittency" ve bir denklemlilik model olan "Gamma Modeli" ile kullanıcı tanımlı değerleri girebilmektesiniz. "specified intermittency" modelinde kullanıcı tanımlı "intermittency" değeri ile x , y ve z koordinatında geçiş sınırlarını belirleyebilirsiniz. Girilen "intermittency" değeri sıfır ise laminar akış ve bir ise türbülans akış şartları oluşturulur. Örneğin bu metodla bir türbin kanadı üzerindeki akışta laminar bölgesi belirtilebilir. "Gamma Model" 'inde ise momentum kalınlık Reynolds sayısı değeri kullanıcı tarafından girilir ve bu şekilde geçiş yeri belirtilmiş olunur. Bu iki durumda program bu belirtilen sınırlarda geçişi başlatır. Burada gelişen akışlar için "Gamma Theta Modeli" 'nin uygun olduğu görülmektedir. CFX-Pre programında SST modeli ile birlikte geçiş modelinin seçimi ve seçenekleri Şekil 4.18'de verilen pencerede gösterilmiştir [1].



Şekil 4.18. CFX-pre programında seçilen SST-Transitional Turbulence Modeli

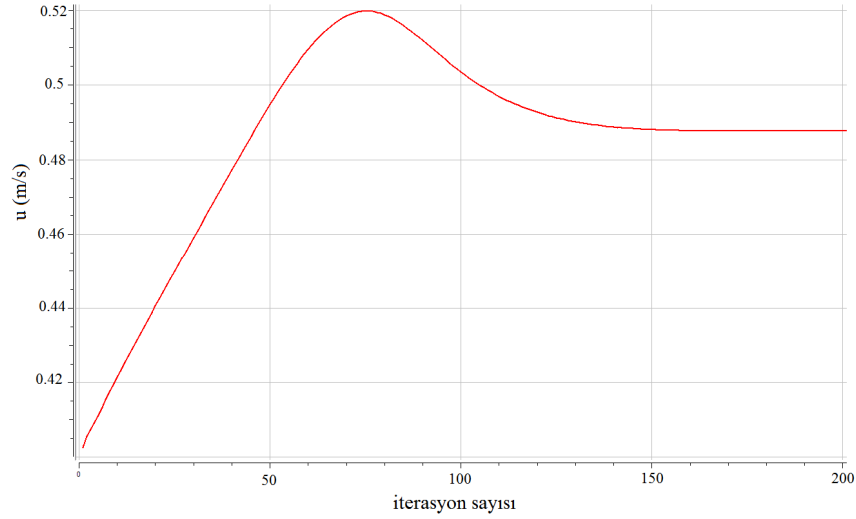
CFX-Pre programında, çözümü kontrol etmek amacıyla, "solver" seçeneği altında birim kontrol (unit control), çözücü kontrol (solver control) ve çıkış kontrol (output control) seçenekleri vardır. Birim kontrol penceresinde fiziksel büyüklüklerin birimleri oluşturulur. Çözücü kontrol penceresinde ise hesaplama çözünürlük durumu (yüksek çözünürlük gibi), yakınsama kontrolü için iterasyon sayısı ve yakınsama kriteri için RMS değerleri girilir. Bunlar problem türüne bağlı seçeneklerdir. Örneğin RMS değerleri hesaplanırken en son iterasyonda hesaplanan anlık değer o ana kadar hesaplanmış istatistiki ortalama değerden çıkarılır ve anlık değere bölünür. Eğer çözümde yakınsama problemi yoksa çıkan değer iterasyon sayısı arttıkça azalma gösterecektir. Çözümün sonuca yakınsadığını görmek için istenilen RMS değerleri girilir. Bu RMS değerleriyle çözümün yakınsamasından emin olunur. Genelde önerilen geçerli RMS değerleri 0,001 değeridir. Yani binde bir yakınsamadır. Tüm RMS değerleri bu değerin altına düştüğünde program çözümü durdurur veya girilen iterasyon sayısına kadar işlem sürdürülür. Bu şekilde çözüm aşaması kontrol altına alınır ve güvenilir bir çözüm elde edilmiş olunur. Örneğin 12172 Reynolds sayılı alüminyum boru akışında RMS değerlerinin iterasyon sayısına bağlı değişimleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir [1].



Şekil 4.19. Basınç-kütle ve momentum denklemlerinin iterasyon sayısına bağlı RMS değişimleri

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi RMS U-Mom, RMS P-Mass ve RMS V-Mom ilk bir kaç iterasyonundan sonra hemen 0.001 değerinin altına inmişler fakat akış yönündeki hızın RMS W-Mom ise diğerlerine göre biraz daha geç yakınsamıştır. Bu RMS değerlerine göre kütleli debi ve basınç doğru değerlerine yeterince yakınsamıştır.

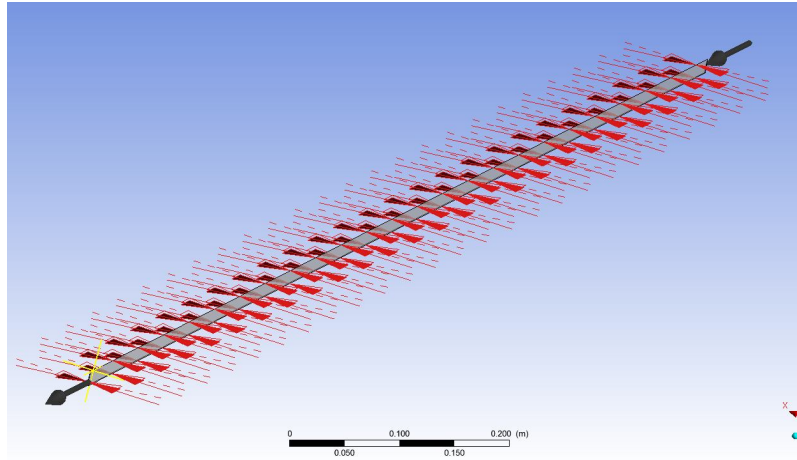
Çıkış kontrol seçeneğinde ise sonuçların kayıt altına alma seçenekleri ve monitor noktaları vardır. Monitor noktalarında akış alanındaki değişkenlerin bir noktadaki durumları çözüm süresince gözlemlenebilir. Bu monitor noktalarında değişkenlerin durumları, çözüm süresince, çözücü programda grafik olarak gösterilmektedir. Bu monitor noktalarındaki değişken değerleri sabit değerlere ulaştığında çözümün bu değişkenler için yakınsamış olduğu görülür. Bu değişkenlerin yakınsaması ile çözüm kullanıcı tarafından sonlandırılabilir. Bir değişkenin iki farklı monitor noktasındaki yakınsaması aynı iterasyon sayısında aynı olmayabilir. Bu, dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Örneğin boru girişine yakın noktada hız değeri çabuk yakınsarken boru çıkışına yakın noktada ise hız değeri en geç yakınsayabilmektedir. Sayısal boru akışında hız ve basınç değişkenleri için monitor noktaları boru çıkışına çok yakın seçilmiştir. Çünkü değişkenlerin çıkış noktalarındaki değerleri giriş noktalarındaki değerlere göre çok daha geç yakınsamaktadır. Şekil 4.20'de boru çıkışına yakın monitor noktasında hız değişkeninin iterasyon sayısına bağlı yakınsama eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Boru çıkışına yakın monitor noktasında hızın yakınsama eğrisi

Şekil 4.20.'de görüldüğü gibi hız ilk 150 iterasyondan sonra sabit değişmez değerlere yakınsamıştır. Bu sayede ilk 180 iterasyondan sonra çözüm sonlandırılmıştır.

Sınır şartları, fiziksel özellikleri ve çözüm kontrol şartları girilen boru akış modelinin CFX-Pre programındaki son hali Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. CFX-pre programında oluşturulan boru akış modelinin son hali

Şekil 4.21.'de gösterildiği gibi tek yönlü iki ok boru giriş ve çıkışını; karşılıklı oklar ise simetri sınır yüzeylerini göstermektedir. Bu sayısal çalışmada oluşturulan boru akış alanı ve kullanılan sayısal yöntemler ise aşağıdaki sonuç kısmında kısaca özetlenmiştir.

4.3 Sonuç

Yapılan deneysel çalışmalara uygun sayısal bir çalışma yapılmıştır. Sayısal çalışma, akış geometrisinin oluşturulması, geometriye ağ atılması, akış alanı için fiziksel ve sınır koşullarının belirlenmesi, türbülanslı akışlar için türbülans modelinin seçilmesi, çözümün kontrolü, çözümün gerçekleşmesi ve çıkan sonuçların derlenmesi gibi bir dizi aşama sonucunda tamamlanabilmektedir. İlk önce türbülanslı boru akışı için RANS çözümün uygun olduğu görülmüştür. Daha sonra RANS türbülans modellerinden biri olan SST modelinin "Gamma Theta Model" seçeneğiyle birlikte kullanılmasının gelişen boru akışlarının çözümü için uygun olduğu görülmüştür. Akış alanı için 2 m'lik uzunluğa ve beş derecelik açığa sahip bir boru geometrisi oluşturulmuştur. Bu akış geometrisinde boyutsuz duvar mesafesi $y^+ < 1$ olacak şekilde duvara yakın ağ çözünürlüğü ve aşağı akım yönlü ve açısız yönlü boyutsuz mesafeler ise sırasıyla $z^+ = 40$ ve $x^+ = 20$ olacak şekilde akış geometrisinin ağı oluşturulmuştur. Akışkan düzgün hız profilinde ve %7 türbülans yoğunluğu ile akış geometrisine girmekte ve çıkışta atmosfere açılmakta veya deney çıkış basıncı ile akış alanından çıkmaktadır. Çözümün kontrolü için monitor noktaları oluşturulmuş ve yakınsama için 0.001 RMS değeri girilmiştir. Çözüm ağdan bağımsız oluncaya kadar ağ boyutları küçültülmüştür. Boru akışının sayısal çözümünde yaklaşık 180 iterasyondan sonra yakınsama görülmüş ve bu şekilde çözümler sonuçlandırılmıştır. Her Reynolds sayılı akışın çözümü yaklaşık üç saat gibi bir bilgisayar işleme zamanı almıştır. Yapılan bu sayısal çalışma sonuçları ise bir sonraki bölümde değerlendirmeye alınmıştır.

5. REYNOLDS ORTALAMALI NAVIER-STOKES DENKLEMLERİ İLE YAPILAN SAYISAL ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Giriş

Bu bölümde sayısal çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. İlk önce, sayısal çalışmanın, statik basınç düşüşü yönünden, deney çalışmasıyla olan uyumu gözden geçirilmiştir. Deneyle uygunluğu görülen sayısal çalışma, sürtünme faktörü, duvar kayma gerilmesi, eksenel hız değişimi ve tam gelişmiş türbülans hız profilleri yönünden değerlendirmeye alınmıştır. Burada amaç burada gelişen akışın duvar kayma gerilmesini analiz etmek ve laminardan türbülansa geçiş mesafesi ile tam gelişmiş akışa geçiş mesafesini analiz etmektir. Bu analizler sonucunda sayısal bağıntılar türetmeye çalışmaktır. Çünkü gelişen boru akışlarında duvar kayma gerilmesini deneysel veya sayısal olarak analiz etmeye yönelik herhangi bir literatür çalışmasına rastlanamamıştır. Kısa borulu akışlarda statik basınç düşüşünün tam olarak hesaplanması için, kayma gerilmesinin analizi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca literatürde laminardan türbülansa geçiş mesafesinin bulunması için bazı deneysel bağıntılar önerilmesine rağmen gizemi hala net anlaşılmış değildir.

5.2. Sayısal Sonuçların Deneysel Değerlerle Karşılaştırılması

Yapılan deneysel boru akışlarında boru boyunca sadece statik basınç düşüş değerleri okunmuştur. Bu nedenle sayısal boru akışlarında çıkarılan statik basınç düşüş değerleri deneysel çalışma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Burada amaç sayısal çalışmanın deneysel çalışmayla desteklenmesidir. Tablo 5.1-5.5 arasındaki tablolarda beş farklı boru türünün değişik Reynolds sayılarındaki akış boyunca statik basınç düşüş değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Sayısal alüminyum boru çalışmasında statik basınç düşüş değerleri

Alüminyum Boru											
Re	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	21043
L (m)	Statik Basınc (Pa)										
0.034	170.1	230.6	350.0	401.1	470.9	504.5	586.9	671.8	913.2	1096.5	1408.1
0.102	168.1	228.0	345.5	395.3	464.2	497.1	578.8	662.4	901.2	1081.3	1386.6
0.203	166.1	225.4	341.0	389.7	457.6	489.5	570.0	652.3	885.5	1059.2	1354.3
0.305	164.5	223.3	337.3	384.7	451.2	481.5	560.3	640.5	868.5	1037.1	1324.6
0.407	163.2	221.5	333.4	378.9	443.6	472.7	550.2	628.5	852.2	1015.9	1296.2
0.508	161.9	219.9	328.9	372.6	436.0	463.8	540.1	616.7	836.1	995.3	1268.4
0.610	160.8	218.1	324.2	366.2	428.2	455.0	530.0	605.0	820.2	974.7	1240.8
0.712	159.6	216.2	319.4	359.8	420.4	446.2	519.8	593.2	803.9	953.9	1212.9
0.814	158.4	214.0	314.5	353.3	412.5	437.1	509.5	581.3	787.3	932.9	1184.7
0.915	157.0	211.6	309.4	346.6	404.4	428.0	499.1	569.2	770.6	911.8	1156.3
1.017	155.5	209.1	304.3	339.9	396.3	418.9	488.6	557.0	753.8	890.6	1127.9
1.119	153.8	206.5	299.2	333.2	388.2	409.7	478.1	544.9	737.0	869.4	1099.5
1.220	152.0	203.9	294.1	326.5	380.1	400.5	467.7	532.7	720.3	848.2	1071.0
1.322	150.2	201.3	289.0	319.8	372.0	391.3	457.2	520.6	703.5	827.1	1042.6
1.424	148.4	198.7	283.9	313.1	363.8	382.2	446.7	508.4	686.7	805.9	1014.2
1.525	146.5	196.1	278.8	306.3	355.7	373.0	436.2	496.3	669.9	784.7	985.7
1.627	144.7	193.4	273.7	299.6	347.6	363.8	425.8	484.2	653.2	763.5	957.3
1.729	142.8	190.8	268.5	292.9	339.5	354.7	415.3	472.0	636.4	742.3	928.9
1.831	141.0	188.2	263.4	286.2	331.4	345.5	404.8	459.9	619.6	721.1	900.5
1.932	139.1	185.6	258.3	279.5	323.3	336.3	394.3	447.7	602.8	699.9	872.0
2.000	137.9	183.9	254.9	275.1	317.9	330.2	387.4	439.7	591.7	685.8	853.1

Tablo 5.2. Sayısal bakır boru çalışmasında statik basınç düşüş değerleri

Bakır Boru											
Re	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	22084
L(m)	Statik Basınc (Pa)										
0.000	199.2	232.9	304.6	422.3	470.2	496.8	572.1	776.9	1042.4	1306.5	1651.3
0.068	197.3	230.3	300.7	416.2	462.6	488.9	561.8	763.5	1025.2	1285.1	1623.1
0.102	196.7	229.5	299.5	414.4	460.4	486.5	558.8	759.6	1020.0	1278.3	1613.9
0.203	195.4	227.7	296.7	410.2	455.2	481.1	551.6	749.8	1005.2	1257.9	1583.8
0.305	194.3	226.2	294.6	406.9	450.8	476.5	544.4	739.0	989.4	1237.0	1554.5
0.407	193.4	224.9	292.8	403.6	445.9	471.2	536.4	727.9	973.9	1216.7	1526.4
0.508	192.6	223.8	291.0	399.9	440.6	465.5	528.5	716.8	958.8	1197.0	1499.1
0.610	191.8	222.7	289.2	395.8	435.1	459.8	520.5	705.8	943.8	1177.4	1472.1
0.712	191.0	221.7	287.1	391.6	429.6	454.0	512.4	694.7	928.7	1157.7	1445.0
0.814	190.3	220.7	284.8	387.3	424.0	448.1	504.2	683.5	913.4	1137.8	1417.5
0.915	189.7	219.6	282.4	382.9	418.3	442.0	495.9	672.2	898.0	1117.7	1389.9
1.017	189.0	218.4	279.8	378.4	412.6	435.8	487.6	660.8	882.5	1097.6	1362.2
1.119	188.3	217.0	277.2	374.0	406.9	429.6	479.2	649.4	867.1	1077.4	1334.4
1.220	187.7	215.5	274.5	369.5	401.1	423.4	470.8	638.0	851.6	1057.2	1306.5
1.322	187.1	214.0	271.8	365.0	395.4	417.2	462.5	626.6	836.1	1037.1	1278.7
1.424	186.2	212.3	269.1	360.5	389.6	411.0	454.1	615.2	820.6	1016.9	1250.9
1.525	185.1	210.7	266.4	356.1	383.9	404.8	445.7	603.8	805.2	996.7	1223.1
1.627	184.0	209.1	263.7	351.6	378.1	398.7	437.4	592.4	789.7	976.6	1195.3
1.729	182.9	207.5	261.0	347.1	372.4	392.6	429.0	581.0	774.2	956.4	1167.5
1.831	181.8	205.8	258.4	342.6	366.6	386.6	420.6	569.6	758.8	936.2	1139.7
1.932	180.7	204.2	255.7	338.2	360.9	380.6	412.3	558.2	743.3	916.1	1111.9
2.000	180.0	203.1	253.9	335.2	357.1	376.5	406.7	550.7	733.0	902.7	1093.4

Tablo 5.3. Sayısal demir boru çalışmasında statik basınç düşüş değerleri

Demir Boru											
Re	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688
L (m)	Statik Basınç (Pa)										
0.000	135.4	213.4	280.2	360.5	467.2	547.2	676.5	782.4	1155	1392	1631
0.034	134.5	211.6	277.6	356.9	462.3	541.5	669.7	775.2	1145	1380	1617
0.102	133.3	209.5	274.5	352.6	456.7	534.9	661.9	766.8	1133	1366	1599
0.203	132.1	207.4	271.4	348.5	451.1	527.9	653	757.4	1117	1342	1570
0.305	131.2	205.7	269	345	445.8	520.3	642.9	746.3	1099	1320	1543
0.407	130.3	204.3	266.8	341.2	439.5	512.2	632.7	735.3	1082	1298	1518
0.508	129.6	203	264.4	336.8	433	504.1	622.6	724.5	1066	1277	1493
0.610	128.9	201.7	261.7	332.4	426.6	496.1	612.7	713.8	1050	1256	1468
0.712	128.2	200.4	258.7	327.8	420.1	488	602.6	702.9	1034	1235	1443
0.814	127.6	198.8	255.7	323.3	413.5	479.8	592.5	691.9	1017	1214	1417
0.915	127	197.1	252.5	318.6	406.7	471.5	582.2	680.7	1000	1193	1392
1.017	126.5	195.2	249.3	313.8	399.8	463.2	571.9	669.4	983.6	1171	1366
1.220	125.3	191.2	242.8	304.2	386	446.5	551.1	646.8	950.1	1128	1314
1.322	124.6	189.2	239.5	299.4	379.1	438.1	540.8	635.5	933.3	1106	1289
1.424	123.9	187.1	236.2	294.6	372.2	429.8	530.4	624.2	916.5	1085	1263
1.525	123.2	185.1	232.9	289.8	365.3	421.4	520.1	613	899.8	1063	1237
1.627	122.3	183	229.7	285	358.4	413	509.7	601.7	883	1042	1211
1.729	121.4	181	226.4	280.2	351.6	404.7	499.4	590.4	866.2	1020	1186
1.831	120.4	178.9	223.1	275.4	344.7	396.3	489	579.1	849.5	998.7	1160
1.932	119.5	176.9	219.8	270.7	337.8	388	478.7	567.8	832.7	977.1	1134
2.000	118.8	175.5	217.6	267.5	333.2	382.4	471.8	560.3	821.6	962.8	1117

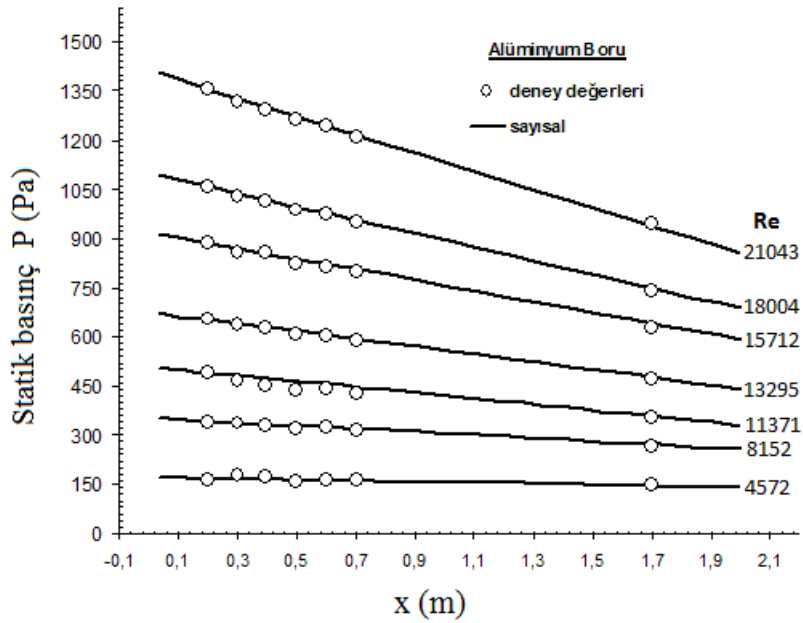
Tablo 5.4. Sayısal galvanizli boru çalışmasında statik basınç düşüş değerleri

Galvanizli Boru												
Re	2907	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439	22927
L (m)	Statik Basınc (Pa)											
0.000	148.9	221.9	371.3	475.6	550.2	666.4	749.7	828.3	958.5	1098.9	1430.2	1989.2
0.034	148.1	220.6	368.6	471.4	545.4	660.6	743.4	821.0	950.5	1090.4	1419.2	1974.1
0.102	147.3	218.9	365.3	466.6	539.8	653.9	736.1	812.5	941.3	1080.4	1405.9	1952.2
0.203	146.4	217.3	362.2	461.9	534.1	646.9	728.3	802.7	929.7	1067.7	1385.3	1918.3
0.305	145.7	216.0	359.6	457.8	528.5	639.1	719.4	791.2	916.5	1053.2	1365.0	1887.6
0.407	145.1	214.9	357.2	452.9	522.0	630.7	710.0	779.7	903.7	1039.3	1345.7	1858.6
0.508	144.5	213.8	354.6	447.7	515.4	622.5	700.7	768.4	891.2	1025.7	1326.8	1830.2
0.610	144.0	212.9	351.5	442.4	508.9	614.3	691.4	757.2	878.8	1012.1	1308.1	1802.1
0.712	143.5	212.0	348.3	436.9	502.2	606.0	682.1	745.9	866.4	998.4	1289.2	1773.6
0.814	143.0	211.1	345.1	431.4	495.4	597.5	672.7	734.4	853.7	984.5	1270.1	1744.8
0.915	142.5	210.1	341.8	425.8	488.5	588.9	663.1	722.8	840.9	970.4	1250.8	1715.8
1.017	142.1	209.0	338.3	420.1	481.6	580.2	653.5	711.2	828.1	956.3	1231.5	1686.8
1.119	141.6	207.7	334.9	414.4	474.6	571.5	643.8	699.5	815.2	942.1	1212.1	1657.6
1.220	141.2	206.3	331.4	408.7	467.7	562.9	634.2	687.8	802.3	927.9	1192.7	1628.5
1.322	140.8	204.9	327.9	403.0	460.7	554.2	624.5	676.1	789.5	913.8	1173.3	1599.3
1.424	140.4	203.4	324.4	397.3	453.7	545.5	614.9	664.4	776.6	899.6	1153.9	1570.2
1.525	140.0	201.9	320.9	391.6	446.8	536.8	605.2	652.8	763.7	885.5	1134.5	1541.1
1.627	139.6	200.4	317.4	385.9	439.8	528.1	595.6	641.1	750.9	871.3	1115.1	1511.9
1.729	139.2	198.9	313.9	380.1	432.8	519.5	585.9	629.4	738.0	857.1	1095.8	1482.8
1.831	138.8	197.4	310.3	374.4	425.9	510.8	576.3	617.7	725.1	843.0	1076.4	1453.7
1.932	138.4	195.9	306.8	368.7	418.9	502.1	566.6	606.1	712.3	828.8	1057.0	1424.6
2.000	138.2	194.9	304.5	364.9	414.3	496.4	560.2	598.3	703.7	819.4	1044.1	1405.2

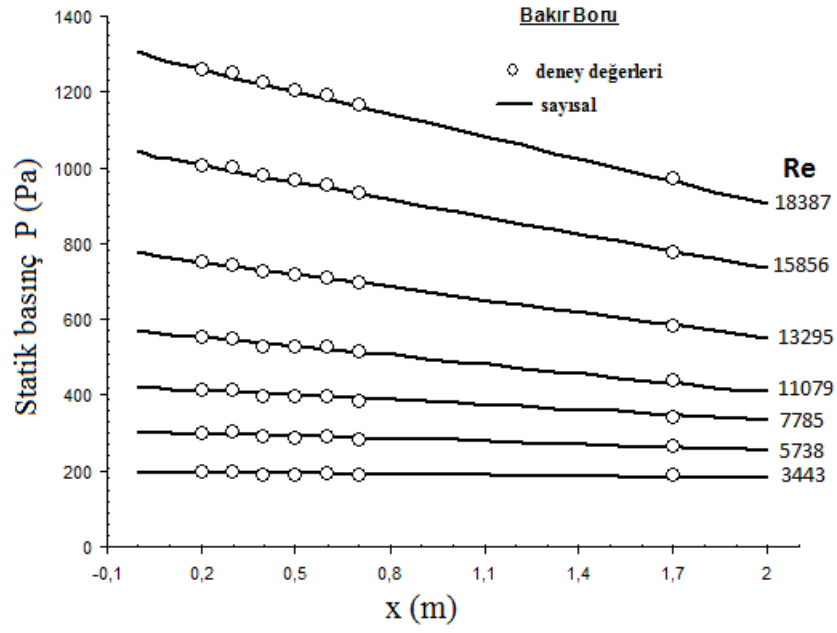
Tablo 5.5. Sayısal PPRC boru çalışmasında statik basınç düşüş değerleri

PPRC Boru							
Re	6890	12890	14458	16983	17540	20979	24317
L (m)	Statik Basınç (Pa)						
0.000	292.9	642.5	812.0	962.2	1023.7	1360.9	1505.7
0.034	287.4	628.4	795.4	941.2	1001.7	1332.1	1469.7
0.102	281.3	613.3	777.4	917.8	977.1	1297.7	1421.7
0.203	275.3	594.8	753.2	883.2	940.2	1244.0	1350.7
0.305	270.3	574.3	727.8	849.1	903.7	1193.3	1285.7
0.407	265.3	554.1	702.9	815.8	868.5	1144.6	1221.7
0.508	259.3	534.1	678.2	782.8	833.6	1096.5	1159.9
0.610	252.9	513.9	653.2	749.5	798.4	1047.8	1097.1
0.712	246.3	493.3	627.9	715.8	762.7	998.6	1033.5
0.814	239.4	472.7	602.5	681.8	726.9	949.2	968.8
0.915	232.4	452.0	577.0	647.9	690.9	899.6	904.0
1.017	225.4	431.2	551.5	613.9	655.0	850.0	839.2
1.119	218.4	410.5	526.0	579.9	619.1	800.4	774.3
1.220	211.5	389.8	500.5	545.9	583.2	750.8	709.5
1.322	204.5	369.1	475.0	511.9	547.3	701.2	644.7
1.424	197.5	348.4	449.5	477.9	511.3	651.6	579.9
1.525	190.5	327.7	424.0	444.0	475.4	602.0	515.1
1.627	183.6	307.0	398.5	410.0	439.5	552.5	450.3
1.729	176.6	286.3	373.1	376.0	403.6	502.9	385.5
1.831	169.6	265.6	347.6	342.0	367.7	453.3	320.7
1.932	162.6	244.9	322.1	308.1	331.8	403.7	255.9
2.000	158.0	231.1	305.1	285.4	307.9	370.7	212.7

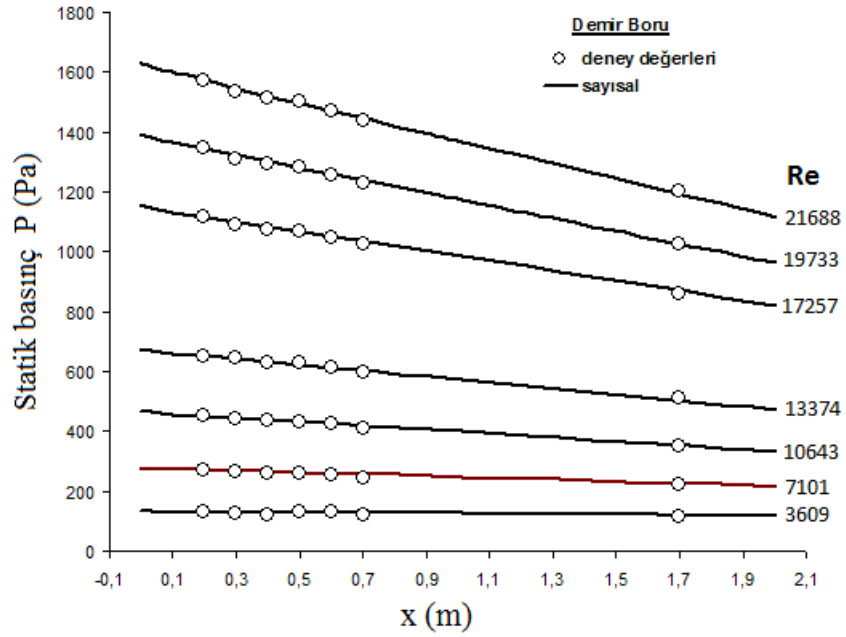
Tablo 5.1 ve 5.5 arasındaki tablolarda verilen sayısal statik basınç düşüş değerleri deneysel çalışma statik basınç düşüş değerleriyle Şekil 5.1 ve 5.5 arasındaki şekillerde karşılaştırılmıştır.



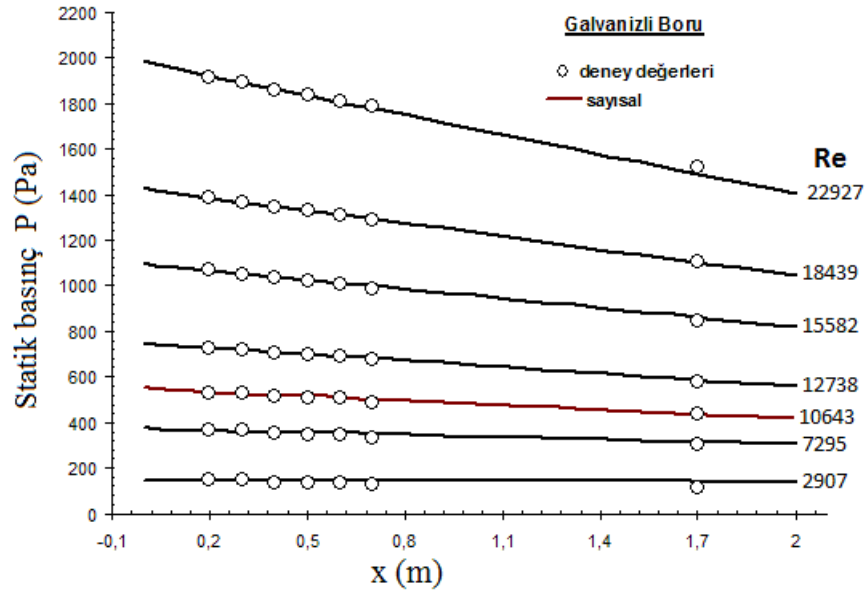
Şekil 5.1. Alüminyum boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması



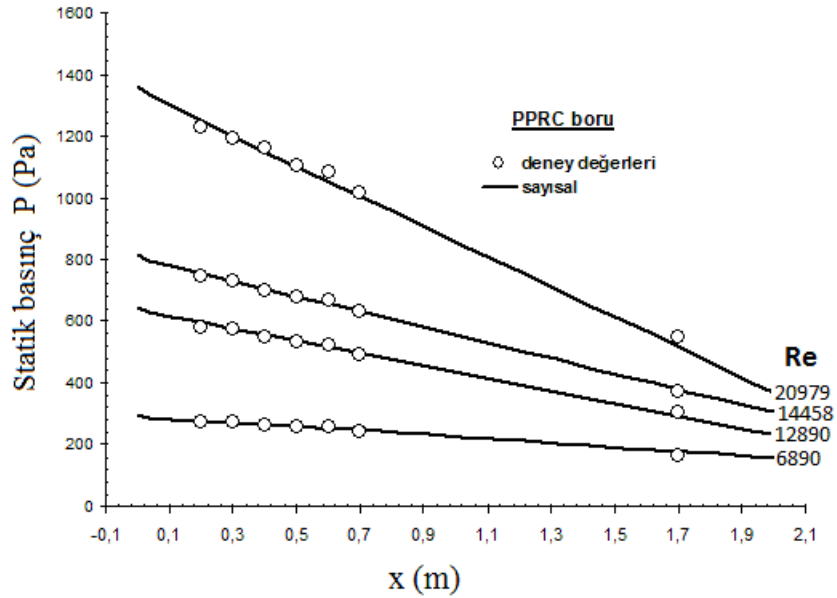
Şekil 5.2. Bakır boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.3. Demir boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.4. Galvanizli boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.5. PPRC boruda sayısal ve deneysel statik basınç düşüş değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.1-5.5 arasındaki şekillerde görüldüğü gibi sayısal çalışma statik basınç düşüş değerleri deney değerleriyle çok iyi uyum sağlamıştır. Bu şekillerde sayısal değerlerin çok az bir kısmı deney değerlerinden yüksek sapma göstermiştir. Boru akışının 0.2 - 1.7 m arasında hesaplanan sayısal statik basınç farkının deney farkından olan maksimum ve ortalama sapma yüzdesi ise aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Deney değerlerinden sapma yüzdesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Sapma \text{ yüzdesi} = \frac{(\Delta P_s - \Delta P_D)}{\Delta P_D} \times 100 \quad (5.1)$$

Tablo 5.6. 0.2 - 1.7 m arasındaki sayısal statik basınç farkının deney farkından maksimum ve ortalama sapma yüzdeleri

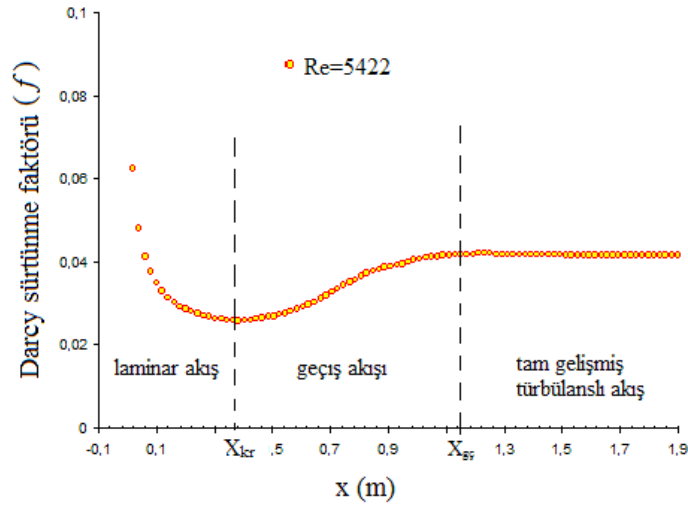
Sapma	Alüminyum Boru	Bakır Boru	Demir Boru	Galvanizli Boru	PPRC Boru
Maksimum	±%20	±%24	±%36	±%35	±%18
Ortalama	%7.30	%7.70	%7.60	%9.40	%9

Tablo 5.6'da görüldüğü gibi, tüm boru akışlarında, sayısal statik basınç farkı ortalama olarak %7-9 civarında deney değerlerinden sapma göstermiştir. Böyle bir sapmanın olması doğaldır. Çünkü boru girişindeki türbülans yoğunluğu ve akışkan sıcaklığı gibi fiziksel şartların tam olarak belirlenememesi ve deney çalışmalarındaki debi ölçümlerinde ve statik basınç okumalarında oluşan hatalar bu sapmalara neden olabilmektedir.

Her beş boru türünün sayısal değerleri deney değerleriyle iyi uyum gösterdiğinden gelişen boru akışlarının sayısal analizi değerlendirmeye alınabilir. Bundan sonraki kısımlarda sayısal çalışma verileri toplanmış ve gelişen akış bölgesi; Darcy sürtünme faktörü, kayma gerilmesi, eksenel hız değişimi ve tam gelişmiş hız profili yönünden değerlendirilmeye alınmıştır.

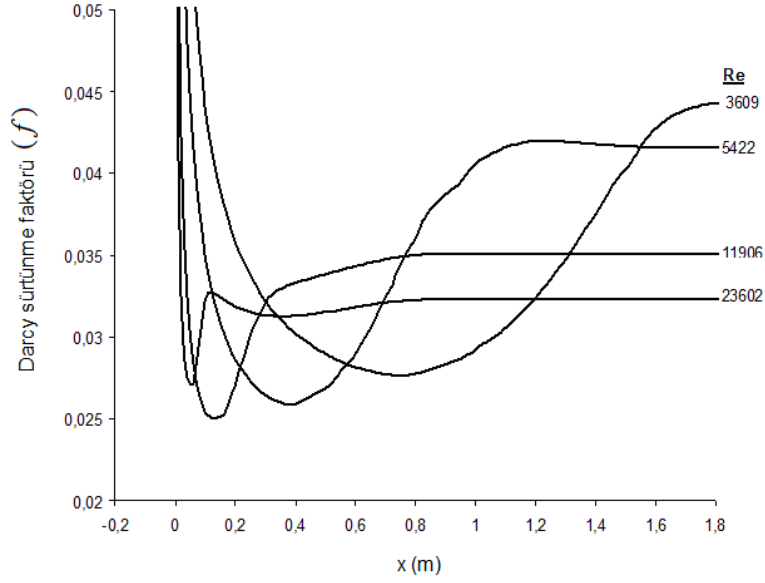
5.3. Darcy Sürtünme Faktörünün Sayısal Analizi

Boru akışı boyunca statik basınç düşüşlerinin hesaplanmasında Darcy sürtünme faktörü en önemli role sahip olmaktadır. Tam gelişmiş türbülanslı boru akışlarında statik basınç düşüşünün hesaplanmasında kullanılan Darcy sürtünme faktörü Moody diyagramı veya Colebrook denkleminden hesaplanabilmektedir. Boru girişlerinde hemen tam gelişmiş akış şartları başladığında gelişen boru akışında kullanılacak Darcy sürtünme faktörünün tam gelişmiş akış şartlarına göre hesaplanamamaktadır. Çünkü gelişen akışta Darcy sürtünme faktörü akış boyunca değişmektedir. Bu yapılan sayısal çalışma ile Darcy sürtünme faktörünün gelişen akış kısmındaki değişimi incelenecek ve bunun sonucunda sayısal bağıntılar türetilmeye çalışılacaktır. Herhangi bir sayısal boru akışında Darcy sürtünme faktörünün boru akışı boyunca değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



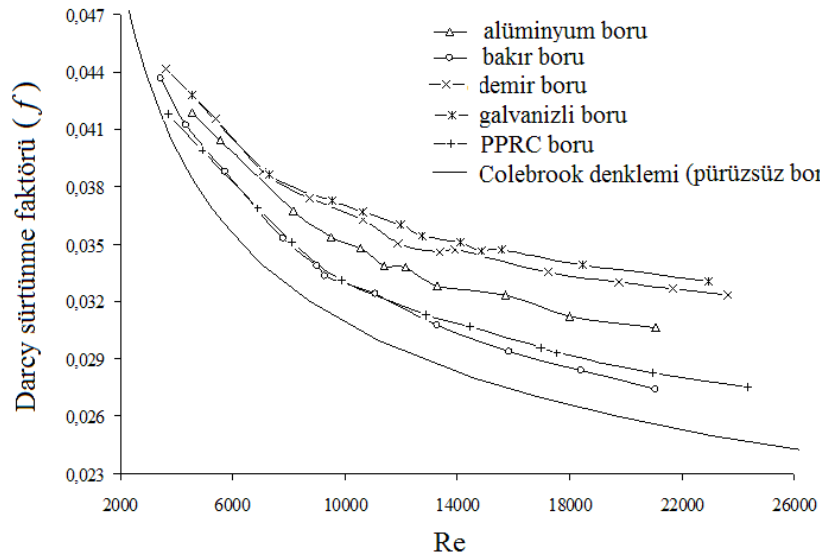
Şekil 5.6. Boru boyunca sayısal Darcy sürtünme faktörünün değişim eğrisi ve oluşan akış bölgeleri

Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi Darcy sürtünme faktörü boru girişinde hızlı bir düşüşe uğramış ve bir minimum noktasından sonra parabolik bir artışla tam gelişmiş türbülanslı akıştaki sabit değerlerine ulaşmıştır. Sürtünme faktöründeki bu değişim, laminardan türbülansa geçişi de göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi parabolun minimum noktasında akış türbülansa uğramıştır ve belirli bir geçiş mesafesinden sonra kayma gerilmesi sabit değerlere ulaşmıştır ve bu mesafeden itibaren tam gelişmiş türbülanslı akış şartları başlamaktadır. Şekilde görüldüğü gibi X_{kr} mesafesinde akış türbülansa uğramış ve $X_{gç}$ mesafesinde ise tam gelişmiş akış şartlarına geçmiştir. Burada X_{kr} mesafesine laminardan türbülansa kritik geçiş mesafesi ve $X_{gç}$ mesafesine ise hidrodinamik giriş mesafesi olmaktadır. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi akış tahminen 0.35 m civarında türbülansa uğramış ve 1.15 m civarında ise tam gelişmiş akış şartlarına geçmiştir. Sayısal çalışmada kullanılan 2 m'lik boru uzunluğunun tam gelişmiş akış şartlarının oluşması için yeteri uzunlukta bir boru uzunluğu olduğu, şekildeki Darcy sürtünme faktörünün değişiminden de görülmektedir. Örneğin farklı Reynolds sayılarında, alüminyum boru akışında Darcy sürtünme faktörünün değişimleri ise Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



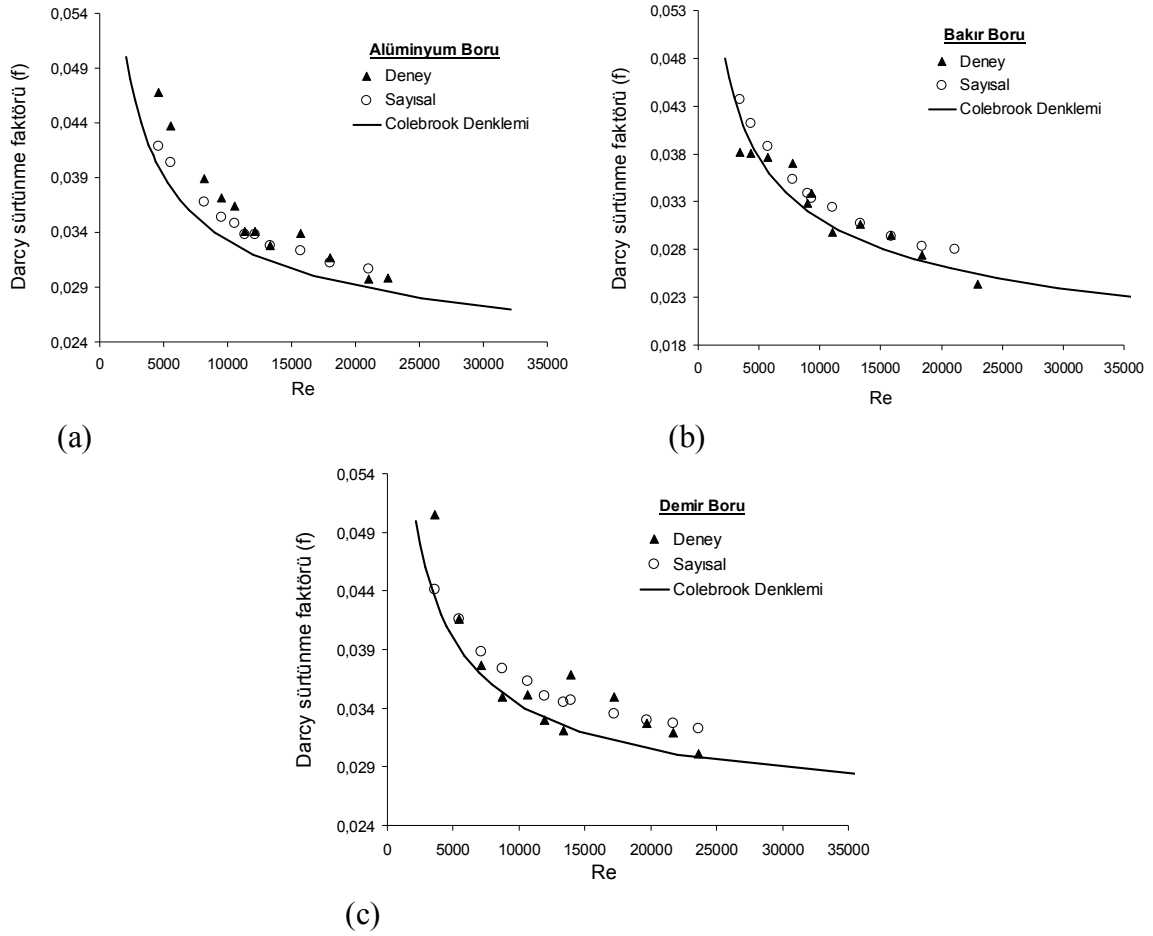
Şekil 5.7 Değişik Reynolds sayılarında demir deney borusu için Darcy sürtünme faktörünün akış boyunca değişimi

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi dört ayrı Reynolds sayısındaki Darcy sürtünme faktörlerinin değişimleri parabolik olmuştur. Şekilde, yüksek Reynolds sayılarına doğru laminar akış bölgesinin daraldığı ve tam gelişmiş akışın ise kısa boru mesafelerinde oluşmaya başladığı görülmektedir. Her boru akışının, *tam gelişmiş türbülanslı akış bölgesindeki* Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri ise Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

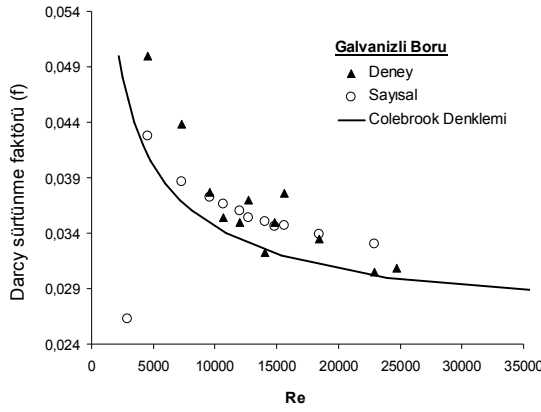


Şekil 5.8. Beş ayrı sayısal boru çalışmasında, tam gelişmiş akış bölgesindeki Darcy sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

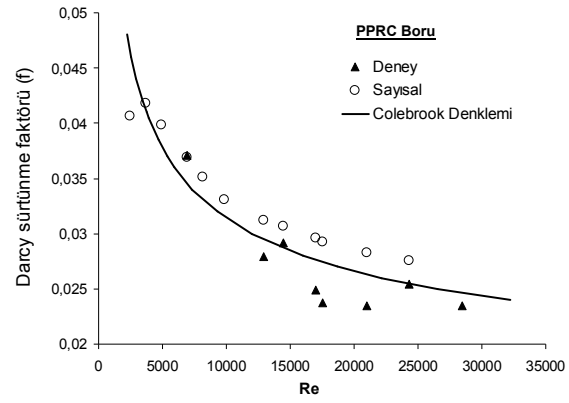
Şekil 5.8'de görüldüğü gibi her borunun Darcy sürtünme faktörü, Colebrook pürüzsüz boru denklem eğrisini üst değerlerde izlemiştir. Şekil 5.8'e göre sürtünme faktörü eğrileri azalan yönde sıralandığında galvanizli boru, demir boru, alüminyum boru, PPRC boru ve bakır borunun sırasıyla geldiği görülmektedir. Bu sıralamanın Tablo 1.7 'de verilen boruların bağıl pürüzlük değerlerinin büyüklüklerine uyduğu görülmektedir. Ayrıca sayısal çalışmadan hesaplanan Darcy sürtünme faktörleri deneysel çalışma değerleriyle ve aynı bağıl pürüzlülüğe sahip Colebrook denklem eğrileriyle Şekil 5.9'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.9 sonraki sayfada devam ediyor.



(d)



(e)

Şekil 5.9. (a-e) Beş ayrı boru çalışmasında 0.2-1.7 m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün sayısal değerlerin ve deney değerlerin Colebrook denklem eğrisiyle karşılaştırılması

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi sayısal Darcy sürtünme faktörleri, deney değerleriyle ve Colebrook denklem eğrileriyle iyi uyum sağlamışlardır. Deney değerleri dağınık olmasına rağmen genel ortalamaları Colebrook denklem eğrisine yakın olmuştur. Sayısal değerlerin deney değerlerinden maksimum ve ortalama sapma yüzdeleri ise Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Darcy sürtünme faktörü sayısal değerlerinin deney değerlerinden sapma yüzdeleri

Yüzde Sapma	Alüminyum Boru	Bakır Boru	Demir Boru	Galvanizli Boru	PPRC Boru
Maksimum (%)	10	14	7	14	23
Ortalama (%)	3.93	5.72	5.06	5.95	12.68

Tablo 5.7'de görüldüğü gibi sayısal değerler ortalama olarak %5-6 civarında deney değerlerinden sapma göstermiştir. PPRC boruda yüksek olmasının nedeni deney hatalarından kaynaklanıyor olabilir. Sonuç olarak sayısal ve deneysel çalışmalar Colebrook denklem eğrileriyle iyi uyum göstermişlerdir ve Colebrook denkleminde ortalama %4-6 civarında bir sapma göstermişlerdir. Boru girişinde gelişen akış boyunca basınç düşüşündeki değişim parabolik olduğundan borudaki basınç farkıyla doğrudan ilişkili olan Darcy sürtünme faktörü ve duvar kayma gerilmesi de aynı değişime uğramaktadır. Bu nedenle duvar kayma gerilmesinin sayısal olarak incelenmesi ve sayısal bağıntılarla ifade edilmeye çalışılması sürtünme faktörü ve basınç düşüşünün hesaplanması için yeterli olacaktır. Duvar kayma gerilmesinin sayısal olarak analizi ise bundan sonraki kısımda yer almaktadır.

5.4. Duvar Kayma Gerilmesinin Sayısal Analizi

Boru girişinde itibaren gelişen akış kısmında Darcy sürtünme faktöründe olduğu gibi duvar kayma gerilmesi de akış boyunca parabolik bir değişime uğramaktadır. Kayma gerilmesindeki bu değişim statik basıncın da boru girişinden itibaren parabolik bir düşüşüne neden olmaktadır. Gelişen akıştaki statik basınç düşümü tam gelişmiş akışlardaki gibi doğrusal bir düşüş değildir ve tam gelişmiş akış şartlarındaki gibi Moody diyagramındaki sabit sürtünme faktörü ile hesaplanamamaktadır. Bu nedenle boru girişinde kayma gerilmesinin sayısal olarak analiz edilmesi ve bunun sonucunda sayısal bağıntılar türetilmesi önemli olmaktadır. Çünkü bu bağıntılar sayesinde statik basınç düşüşü hesaplanabilecektir. Literatürde boru girişindeki kayma gerilmesinin analizine yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun önemli bir nedeni de uzun borulu akışlarda giriş etkilerinin ihmal edilebilir olduğudur. Fakat kısa borulu akışlar düşünüldüğünde giriş etkileri önemli olmaktadır. Δx diferansiyel kalınlığındaki bir boru akışında duvar kayma gerilmesinin statik basınç farkıyla olan ilişkisi denklem (3.2) ile aşağıdaki gibi sonuçlanmıştır.

$$\tau_d = \frac{1}{4} \frac{D}{\Delta L} \Delta P \quad (5.2)$$

Burada ΔP , ΔL kalınlığındaki akış kısmında gerçekleşen statik basınç farkıdır. Görüldüğü gibi duvar kayma gerilmesi boru çapı, uzunluğu ve basınç farkına bağlı bir değişken olmaktadır. Tam gelişmiş akışlarda basınç farkının hesaplanmasında kullanılan denklem (1.7) denklem (5.2)' de yerine yazılmasıyla duvar kayma gerilmesi ile Darcy sürtünme faktörü arasında ilişki aşağıdaki bağıntıyla ortaya çıkmaktadır.

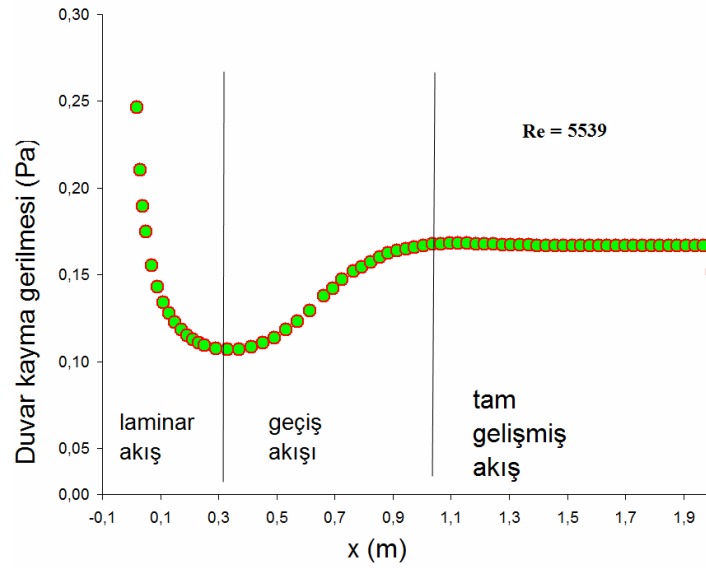
$$\tau_{duvar} = \frac{1}{8} f \rho U^2 \quad (5.3)$$

Bu bağıntıda duvar kayma gerilmesi Darcy sürtünme faktörüne, akışkan yoğunluğuna ve ortalama hıza bağlı bir değişken olmaktadır.

Türbülanslı boru akışlarının RANS denklemlerinde, toplam kayma gerilmesi; laminar ve türbülans kayma gerilmelerinden oluşmaktadır. Duvara çok yakın akış tabakalarında laminar kayma gerilmesi etkili olurken boru göbeğine yakın kısımlarda ise türbülans

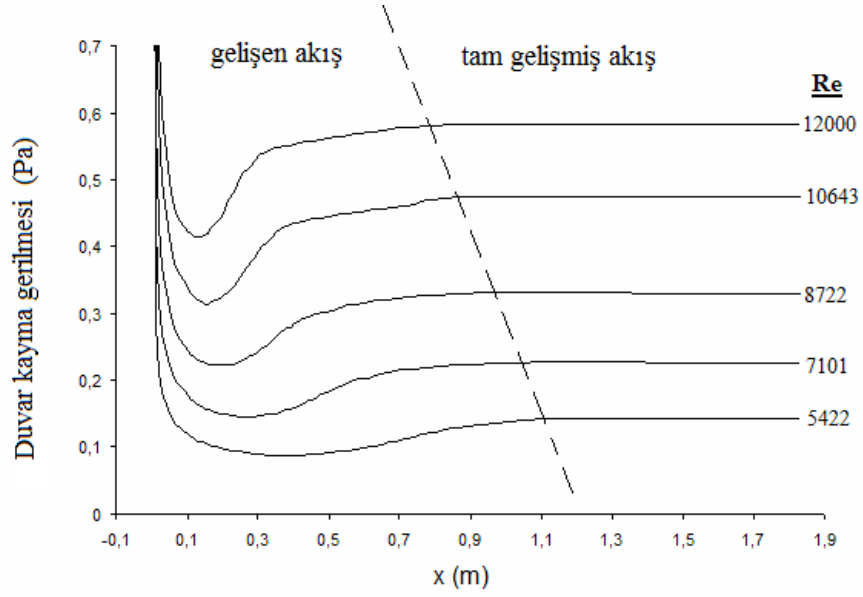
kayma gerilmesi daha çok etkili olmaktadır. Boru duvarına bitişik akışkan molekülleri ise maksimum bir kayma gerilmesine maruz kalmaktadır. Duvarda oluşan bu kayma gerilmesine duvar kayma gerilmesi denir. Boru akışlarında ana amaç basınç düşüşünün hesaplanmasında kullanılacak bu duvar kayma gerilmesinin hesaplanmasıdır.

Örneğin alüminyum borunun 5539 Reynolds sayılı akışında, duvar kayma gerilmesinin boru duvarı boyunca olan değişimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Sayısal alüminyum boru akışında boru duvarı boyunca kayma gerilmesinin değişimi

Şekil 5.10'da gösterildiği gibi duvar kayma gerilmesi boru girişinden tam gelişmiş akış şartlarına kadar, sürtünme faktöründe olduğu gibi, parabolik bir değişime uğramıştır. Tam gelişmiş akış şartlarında ise duvar kayma gerilmesi sabit değerlerde olmuştur. Örneğin alüminyum borunun farklı Reynolds sayısındaki akışlarında duvar kayma gerilmesinin akış boyunca değişimi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



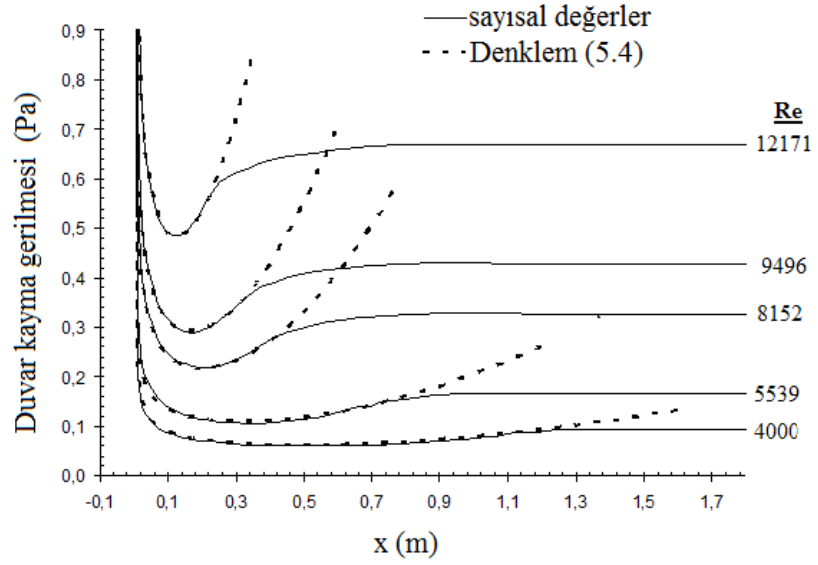
Şekil 5.11 Alüminyum boru çalışmasında değişik Reynolds sayılarındaki duvar kayma gerilmesinin boru duvarı boyunca değişimi

Şekil 5.11.'de gösterildiği gibi duvar kayma eğrilerinin Reynolds ile değişimleri incelendiğinde; Reynolds sayısının artmasıyla duvar kayma gerilmesindeki parabolik değişim alanı daralmakta ve tam gelişmiş akış şartları kısa boru mesafelerinde oluşmaya başlamaktadır. Burada görülen, Reynolds sayısı arttığında duvar kayma gerilmesinin minimum değeri ile tam gelişmiş akış değeri arasındaki farkın artmaya başlamasıdır. Ayrıca Reynolds sayısı arttığında duvar kayma gerilmesinin genel ortalama değeri de artmaktadır. Burada önemli olan duvar kayma gerilmesinin gelişen akış kısmındaki değişimini $x (m)$ 'ye bağlı bir fonksiyon olarak türetmektir.

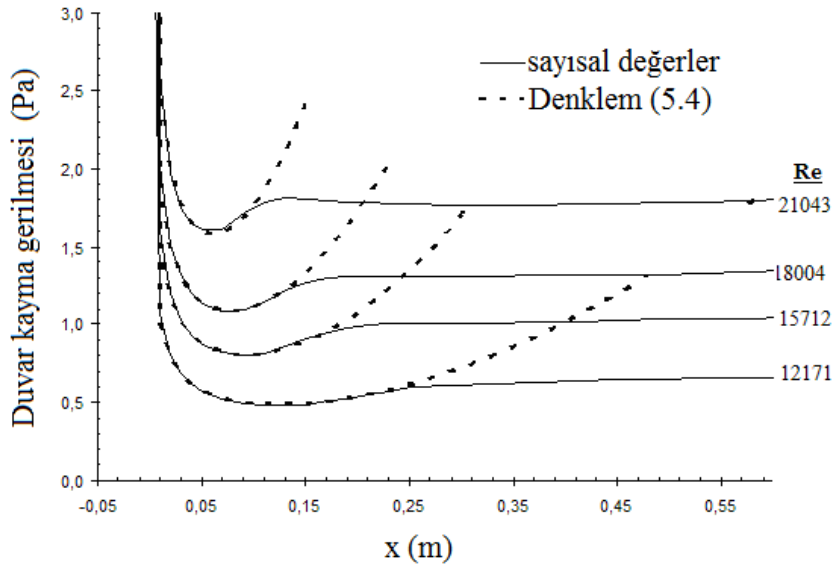
Yapılan eğri uydurma çalışmaları sonucunda aşağıda verilen sayısal bağıntının tüm boru akışlarındaki sayısal duvar kayma gerilmelerini, tam gelişmiş akış şartlarına kadar, çok iyi tahmin ettiği görülmüştür.

$$\tau_{(x)} = a x^2 + b x^{-7/20} \quad (5.4)$$

Bu bağıntıda x , akış yönündeki mesafedir. a ve b ise denklem katsayıları olup Reynolds sayısına ve bağıl pürüzlülüğe bağlı oldukları görülmüştür. Bu bağıntının sayısal duvar kayma değerleriyle uyum sağlaması için a ve b katsayıları her Reynolds sayısı için ayrı ayrı değerleri bulunur. Bu değerlerle Denklem (5.4) alüminyum boruda duvar kayma eğrilerini Şekil 5.12'de görüldüğü gibi tahmin etmiştir.



(a)

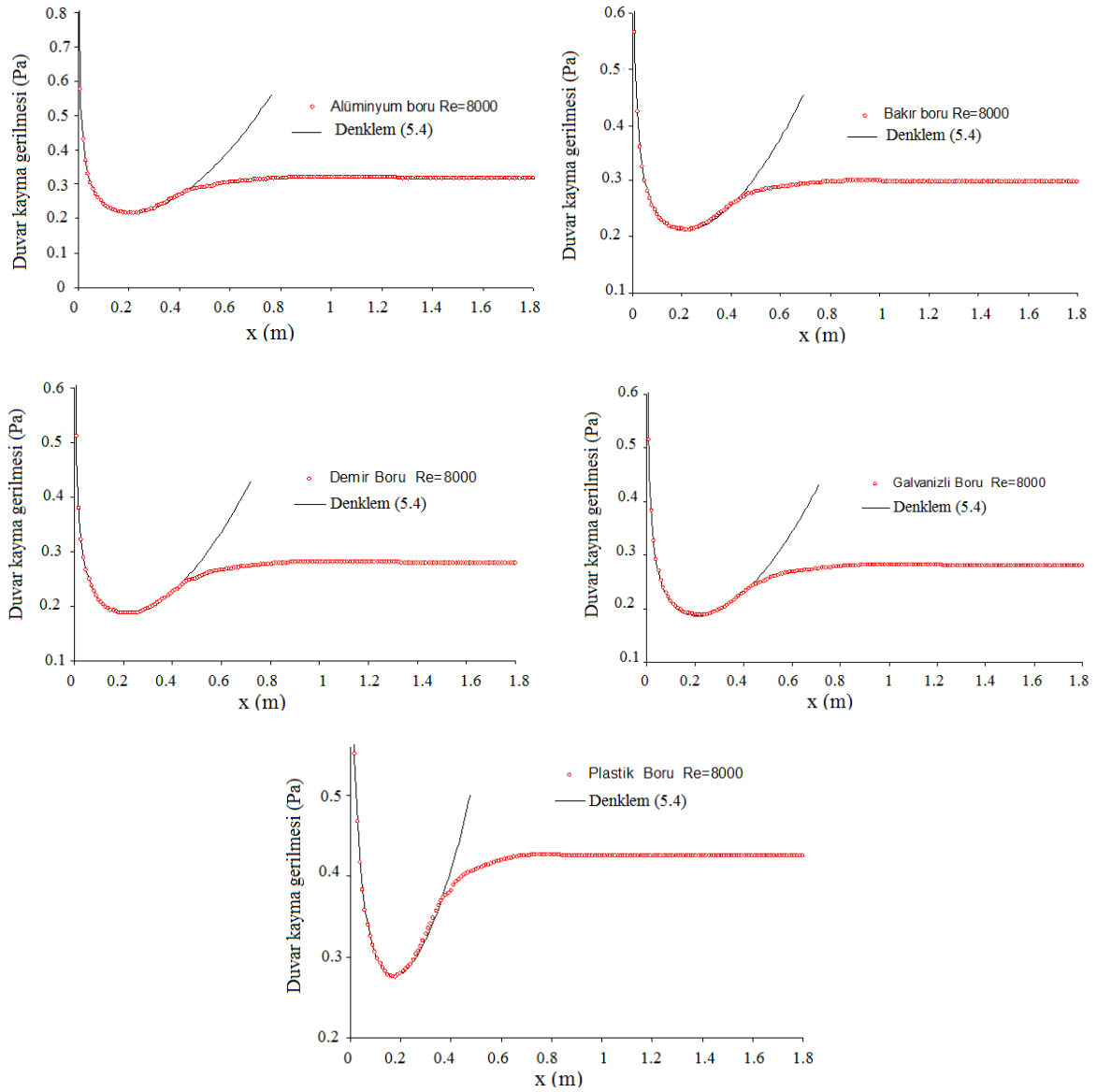


(b)

Şekil 5.12. Alüminyum boruda duvar kayma gerilmesi sayısal değerlerinin denklem (5.4) ile tahmin edilmesi, (a) 4000-12171 ve (b) 12171-21043 arasındaki Reynolds sayıları

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi Denklem (5.4) eğrileri sayısal duvar kayma eğrileriyle tüm Reynolds sayılarında üst üste çakışmıştır. Burada denklem (5.4)'ün tam gelişmiş akışın yakın mesafelerine kadar sayısal duvar kayma gerilmelerini çok iyi tahmin ettiği görülmektedir. Bu şekillerde Denklem (5.4), boru girişindeki ilk 1cm mesafeden itibaren, sayısal değerlerden ortalama olarak $\pm\% 1,7$ ve maksimum olarak ise $\pm\% 10$ oranında sapma

göstermiştir. Boru girişinden ilk 1 cm akış mesafesine kadar ortalama sapma %7-8 civarında fakat 1 cm 'den itibaren ise sapma miktarı çok düşük olmuştur ve parabolik değişim bitinceye kadar sayısal değerlerle çok iyi uyum sağlanmıştır. Denklem (5.4)'teki a ve b katsayıları her Reynolds sayısındaki değerleri farklı olmaktadır. Burada, denklem (5.4) eğrilerinin sayısal değerlerle uyumlu hale getirilmesi için uygun a ve b değerleri bulunmuştur. Bu durum tüm boru akışları için yapılmış ve aynı şekilde sayısal değerlerle uyumlu denklem (5.4) eğrileri elde edilmiştir. Aşağıdaki şekiller ise her beş borunun 8000 Reynolds sayısındaki sayısal duvar kayma değerlerinin denklem (5.4) ile tahmin edilmesini göstermiştir.



Şekil 5.13. Beş farklı borunun 8000 Reynolds sayısındaki akışlarında elde edilen sayısal kayma gerilmesi verilerinin Denklem (5.4) ile tahmin edilmesi

Şekil 5.13'te görüldüğü gibi Denklem (5.4) farklı pürüzlülüğe sahip boruların sayısal duvar kayma gerilmelerini çok iyi tahmin etmiştir. Sonuç olarak Denklem (5.4), 3000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında, beş borunun sayısal duvar kayma gerilmelerini çok iyi tahmin ettiği görülmüştür. Tüm sayısal boru akışlarında, denklem (5.4)'ün sayısal verilerden maksimum ve ortalama olarak sapma yüzdesi ise Tablo 5.8'de gösterilmiştir

Tablo 5.8. Beş ayrı boru çalışmasında denklem (5.4) ile hesaplanan duvar kayma gerilmesi değerlerinin sayısal değerlerden sapma yüzdeleri

Sapma Miktarı (%)											Genel
Alüminyum Boru											Sapma (%)
Re	4000	4572	5539	8152	9496	11371	12171	15712	18004	21043	
Maksimum	13.142	16.228	42.228	9.965	7.041	1.701	1.522	5.994	12.419	21.948	
Ortalama	1.543	1.860	1.578	2.102	2.100	2.234	1.580	1.210	1.145	1.987	1.734
Bakır Boru											
Re	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	21077
Maksimum	10.194	7.915	6.296	2.666	1.243	1.722	5.545	9.656	16.668	21.772	29.697
Ortalama	2.681	1.307	0.931	1.215	1.005	1.106	2.302	1.501	2.307	2.787	3.357
Demir Boru											
Re	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688
Maksimum	23.816	17.369	16.022	11.553	9.022	5.010	1.746	1.586	3.697	5.996	9.135
Ortalama	3.333	1.105	1.504	1.665	2.016	1.659	1.539	1.425	1.549	2.236	2.165
Galvanizli Boru											
Re	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439	22927
Maksimum	12.825	5.879	3.446	0.099	0.560	0.678	2.904	3.654	9.671	15.979	6.155
Ortalama	2.871	1.727	1.454	1.240	1.306	1.344	1.860	1.869	1.774	1.939	2.869
PPRC Boru											
Re	4000	4921	6890	8120	9843	12890	14458	16983	17540	20979	24317
Maksimum	22.871	20.245	16.073	14.894	2.158	5.166	1.417	4.886	5.969	12.526	19.162
Ortalama	1.825	1.192	1.544	1.417	1.130	1.923	1.919	1.886	1.511	2.140	3.349

Tablo 5.8'de görüldüğü gibi Denklem (5.4) sayısal değerlerden genel ortalama olarak %1.83 civarında ve maksimum olarak %12 civarında sapma göstermiştir. Maksimum sapmalar ise borunun ilk 1cm mesafesinde oluşmuş sapmalardır. Denklem (5.4) boru girişindeki ilk 1cm mesafedeki sayısal verilerden yüksek sapma göstermekte fakat 1cm'den itibaren tam gelişmiş akış şartlarına varıncaya kadar ise çok düşük sapma göstermektedir. Borunun ilk 1 cm mesafesi giriş etkileri üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Sonuç olarak denklem (5.4) tüm boru akışlarında sayısal duvar kayma gerilmesi değerlerini tam gelişmiş akış şartlarına kadar çok iyi tahmin etmiştir.

Denklem(5.4)'te bulunan a ve b katsayıları Reynolds sayısına ve bağıl pürüzlülüğe bağlı değişkenler oldukları görülmüştür. Tüm boru çalışmalarında sayısal duvar kayma gerilmelerinin Denklem (5.4) ile tahmin edilmesinde kullanılan a ve b katsayıları ise Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Denklem (5.4)'de bulunan a ve b katsayılarının her beş boru çalışması için bulunan değerleri

	Alüminyum Boru									
Re	4572	5539	8152	9496	11371	12171	15712	18004	21043	
a	0.062	0.135	0.79	1.52	3.2	4.6	13.8	26.5	63	
b	0.046	0.067	0.105	0.133	0.178	0.195	0.296	0.376	0.505	
	Bakır Boru									
Re	3443	4326	5738	7785	9282	11079	13295	15856	18387	21077
a	0.015	0.047	0.155	0.58	1.21	2.55	5.4	12	23	43
b	0.0314	0.0434	0.0636	0.098	0.129	0.168	0.22	0.293	0.37	0.497
	Demir Boru									
Re	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13907	17257	19733	21688
a	0.016	0.105	0.34	0.89	1.93	3.46	6.8	18.2	33.4	58.5
b	0.028	0.053	0.076	0.105	0.14	0.17	0.217	0.307	0.378	0.445
	Galvanizli Boru									
Re	4559	7295	9553	10643	11977	14078	15582	18439	22927	
a	0.046	0.42	1.2	2.17	3.7	7	11.7	29	97	
b	0.04	0.079	0.1214	0.1435	0.174	0.218	0.258	0.345	0.5	
	PPRC Boru									
Re	3691	4921	6890	8120	9843	12890	14458	17540	20979	24317
a	0.05	0.2	0.79	1.8	3.6	13	21	43	92	181
b	0.048	0.073	0.12	0.15	0.2	0.3	0.36	0.495	0.66	0.84

Tablo 5.9'da görüldüğü gibi a ve b katsayıları Reynolds sayısına ve boru türüne bağlı olarak değişmektedir. Bu tabloda verilen a ve b değerleri Reynolds sayısına, boru pürüzlülüğüne ve boru çapına göre değişimleri incelenmiş ve sayısal bağıntılarla ifade edilmeye çalışılmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda b katsayısının, Reynolds sayısına ve boru çapına bağlı bir değişken olarak, aşağıdaki sayısal bağıntıyla tahmin edilebildiği görülmüştür.

$$b = \frac{8665.10^{-13}}{D^{1.813}} [0.00134 Re^2 + 10.42 Re + 1005.4] \quad (5.5)$$

Bu bağıntıda D boru çapıdır ve "m" birimindeki değerleri kullanılmalıdır. Bu bağıntı ile bulunan b değerleri Tablo 5.9.'daki " b " değerlerinden genel ortalama olarak $\pm\%3$ ve maksimum olarak $\pm\%10$ sapma göstermiştir. a katsayı değerlerinin ise duvar kayma gerilmesinin minimum değeri için denklem (5.4) 'ün türevi alınıp sıfıra eşitlenmesiyle bağıntısı ortaya çıkmaktadır. Kayma gerilmesinin minimum noktası aynı zamanda laminar akışın bitiş noktası olan X_{kr} noktasıdır. Bu durumda a katsayısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$a = 0.175 \frac{b}{X_{kr}^{2.35}} \quad (5.6)$$

Bu bağıntıyla a değerlerinin tahmin edilebilmesi için X_{kr} ve b değerinin bilinmesini gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak borunun gelişen akış kısmındaki sayısal kayma gerilmesi, denklem (5.4) ile tahmin edilebilmiştir. Duvar kayma gerilmesinin denklem (5.4) ile tahmin edilebilmesi için de a ve b katsayılarının bilinmesini gerekli kılmaktadır. Bu katsayılar ise boru çapına, kritik geçiş mesafesine ve Reynolds sayısına bağlı değişkenler oldukları görülmüştür. Sayısal çalışmalar sonucunda a ve b değerlerinin hesaplanması için sırasıyla denklem (5.5) ve denklem (5.6) sayısal bağıntıları önerilmiştir. Denklem (5.6) ile a katsayısının tahmin edilebilmesi için de X_{kr} değerinin bilinmesini gerekli kılmaktadır.

Bundan sonraki kısım ise laminardan türbülansa geçiş noktası olan X_{kr} mesafesi ve tam gelişmiş akış şartlarının başladığı nokta olan $X_{gç}$ mesafesinin bulunmasına yönelik sayısal analizleri içermektedir.

5.5. Hidrodinamik Gelişme Uzunluğunun Sayısal Analizi

Boru girişinden tam gelişmiş akış şartlarının başladığı noktaya kadar alınan mesafeye hidrodinamik gelişme uzunluğu ($X_{gç}$) denir. Laminar ve Türbülanslı akışların hidrodinamik gelişme uzunlukları birbirinden farklı olmaktadır. Örneğin türbülanslı akışlarda hidrodinamik gelişme mesafesi laminar akışlara göre çok daha kısa olmaktadır. Türbülanslı akışlarda hidrodinamik gelişme mesafesinin bulunmasına yönelik tam kesin bir bağıntı önerilmemesine rağmen literatürde farklı deneysel bağıntılar önerilmiştir. Örneğin bazı yazarlar, hidrodinamik gelişme uzunluğu için $X_{gç} / D = 1.6 \times \text{Re}^{1/4}$ kanununu önerirken, bazı yazarlarda $X_{gç} / D = 4.4 \times \text{Re}^{1/6}$ kanunu önermiştir. Douglass Gasiorek akışkanlar mekaniği kitabında $X_{gç} = 60D$ mesafesinden itibaren tam gelişmiş türbülans akış şartları kabul edilebileceğini söylemiştir [26]. Bunlara benzer bir çok deneysel çalışmayla farklı önerilerde bulunulmuştur.

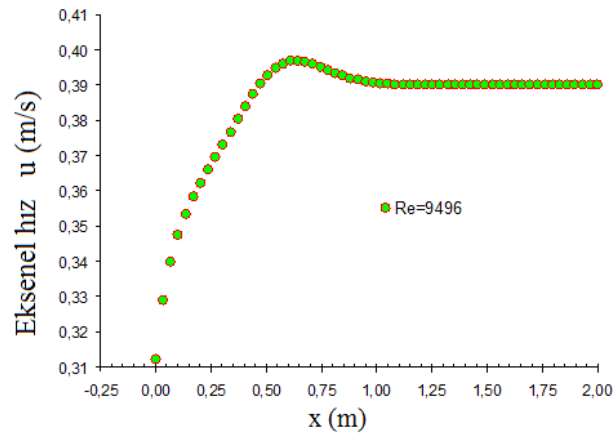
Serbest akımlı pürüzsüz bir plaka yüzeyindeki akışta ise geçiş süreci $\text{Re} = 1 \times 10^5$ gibi bir kritik Reynolds sayısı ile başlamakta ve $\text{Re} = 4 \times 10^6$ gibi bir Reynolds sayısına kadar tamamıyla türbülanslı oluncaya kadar devam etmektedir. Burada $\text{Re} < 10^5$ için laminar akış kararlı kalmakta ve $\text{Re} > 4 \times 10^6$ sayılarında ise akış tamamıyla tam gelişmiş türbülanslı akış olmaktadır. Yüzey boyunca pürüzlülük, serbest akım bozuklukları, akustik gürültü, akış kararsızlıkları ve titreşim gibi olasılıklar bu iki kritik Reynolds sayısını daha da düşürebilmektedir [39]. Örneğin hiç bozuntuların oluşmasına izin verilmediği hassas akış

şartlarında pürüzsüz, parlak bir yüzeyde geçiş süreci en fazla 1×10^6 Reynolds sayısına kadar geciktirilebilmiştir [20]. Plakadaki akışa değinmenin sebebi boru akışındaki gelişme kısmının plakayla benzer olmasıdır. Fakat boru akışında sınır tabaka büyümesi boru yarı çapı ile sınırlı kalmaktadır. Boru akışının plakadan farkı ise eğer gelişen laminar sınır tabakası geçiş olmadan boru merkezinde birleşirse akış geçiş olmadan laminar olarak kalır ve boru akışı tam gelişmiş laminar akış olarak devam eder. Eğer laminar sınır tabakası boru merkezinde birleşmeden geçiş sürecine girerse plakadaki gibi türbülans oluşur ve borunun kalan kısmı türbülanslı akış olur.

Burada beş boru türünün sayısal çalışmaları hidrodinamik gelişme uzunluğu yönünden analiz edilmiştir. Hidrodinamik gelişme uzunluğunun ise duvar kayma gerilmesindeki değişim eğrileri ile veya merkezi eksen çizgisi boyunca gelişen hız değişim eğrileri ile bulunabileceği öngörülmektedir. Boru akışlarında giriş türbülans yoğunluğunun değiştirilmesi gelişme uzunluğu üzerinde etkili olduğu, yapılan bir çok deneysel çalışmayla kanıtlanmıştır. Bu nedenle burada yapılan sayısal çalışma %7 giriş türbülans yoğunluğu ile sınırlı kalmıştır.

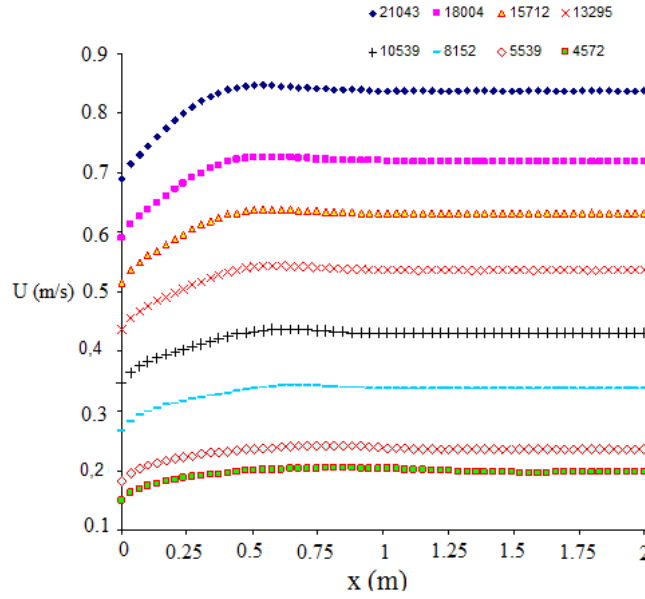
5.5.1. Kritik ve Geçiş Mesafelerinin Sayısal Analizi

Tekrar tanımlanacak olursa X_{kr} mesafesi laminar akışın türbülansa uğradığı boru giriş mesafesidir. $X_{gç}$ mesafesi ise tam gelişmiş akışın başladığı hidrodinamik gelişme mesafesidir. Bu iki mesafenin duvar kayma gerilmesi veya hız değişim eğrilerinden bulunabileceği öngörülmektedir. Bakır borunun 9496 Reynolds sayılı sayısal boru akışında merkezi aksenal hızın değişimi Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



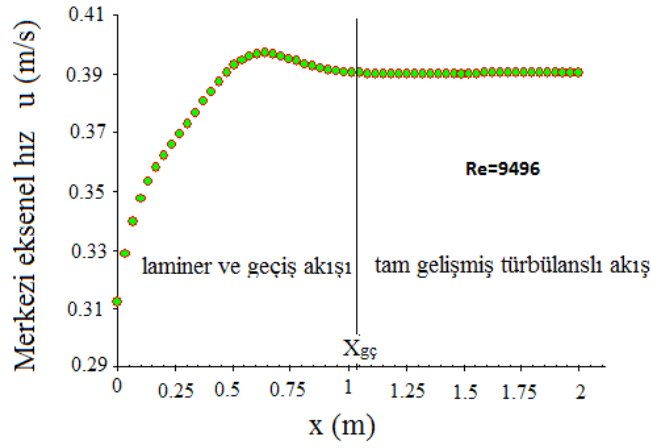
Şekil 5.14. Boru akışında aksenal hız değişimi

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi eksenel hızın sabit değerlere varmasıyla tam gelişmiş akış şartları başlamıştır. Burada boru merkezindeki hız girişten itibaren artmaya başlıyor ve bir maksimum hız değerine ulaştıktan sonra tam gelişmiş akış şartlarına doğru azalmaya başlamaktadır. Şekil 5.15'te ise sayısal alüminyum boru akışlarında farklı Reynolds sayılarındaki merkezi eksenel hızın değişim eğrilerini göstermiştir.

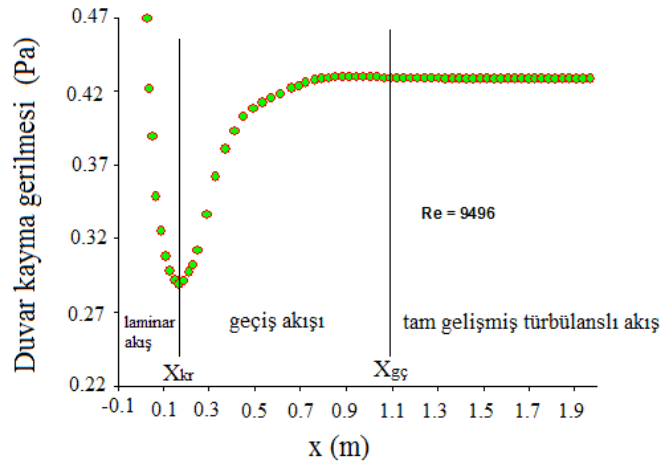


Şekil 5.15. Farklı Reynolds sayılarında merkezi eksenel hızın akış boyunca değişimi

Şekil 5.15'te görüldüğü gibi yüksek Reynolds sayılı akışlara doğru tam gelişmiş akış şartları boru girişine yakınlasmaya başlamaktadır. Buradaki hız gelişme eğrilerinden tam gelişmiş akış şartlarının hangi mesafeden itibaren başladığı analiz edilebilmesine rağmen laminardan türbülansa uğrama mesafesi ise analiz edilmektedir. Bu durum eksenel hız değişim eğrilerinin ve duvar kayma gerilmesi değişim eğrilerinin karşılaştırılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Her iki değişimin aynı Reynolds sayısındaki durumları Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



(a)



(b)

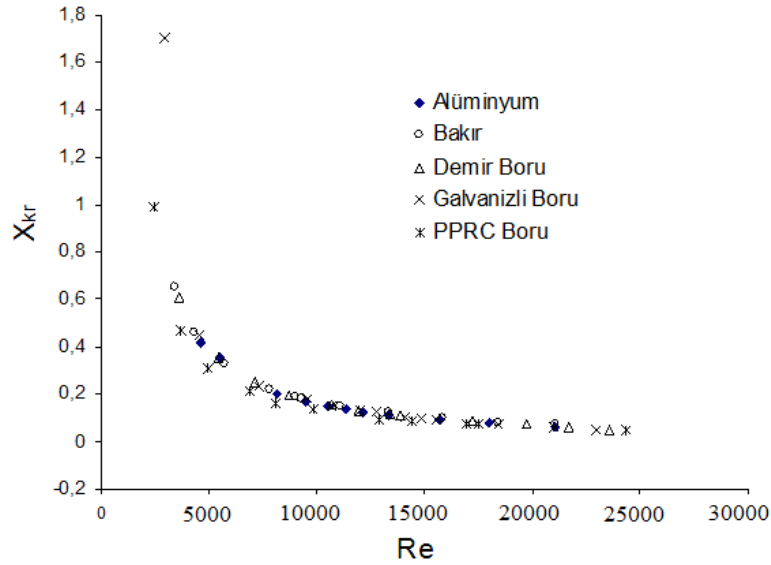
Şekil 5.16. (a,b) bakır borunun 9496 Reynolds sayılı akışında merkezi eksenel hız ve duvar kayma gerilmesi değişim eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.16'da gösterildiği tam gelişmiş türbülansa geçiş mesafesi bulunabilirken laminardan türbülansa geçiş mesafesi ise yalnız duvar kayma gerilmesi değişiminden bulunabilmektedir. Şekil 5.16'da görüldüğü gibi X_{kr} ve $X_{gç}$ mesafeleri duvar kayma gerilmesi değişim eğrilerinden bulunabilmektedir. Bu nedenle gelişme mesafeleri duvar kayma gerilmesi değişim eğrilerinden bulunacaktır. Her beş boru türünün sayısal çalışmasındaki duvar kayma gerilmesi eğrilerinden çıkarılan X_{kr} ve $X_{gç}$ mesafelerinin farklı Reynolds sayılarındaki değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Beş farklı boru türünün farklı Reynolds sayılarındaki sayısal kritik ve geçiş mesafe değerleri

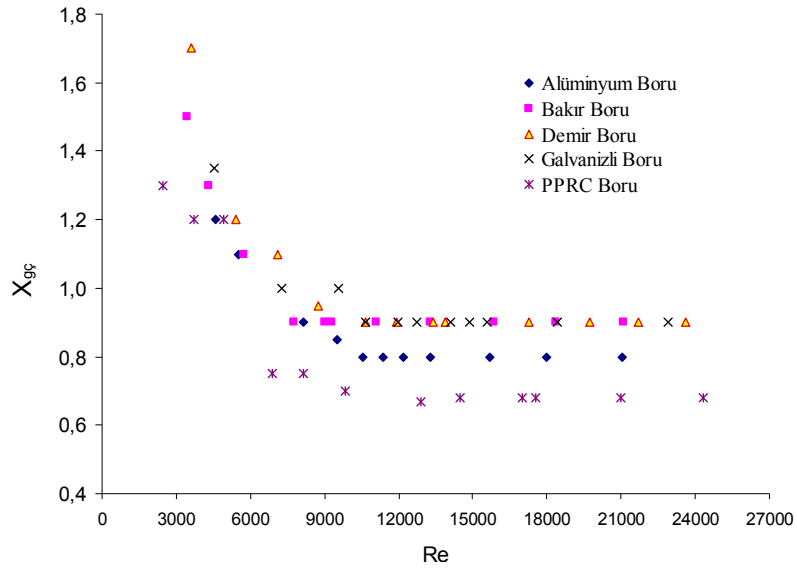
	Alüminyum Boru											
Re	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	21043	
X_{kr} (m)	0.4520	0.3618	0.2110	0.1708	0.1608	0.1507	0.1306	0.1206	0.1000	0.0804	0.0603	
$X_{gç}$ (m)	1.2000	1.1000	0.9000	0.8500	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	
	Bakır Boru											
Re	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	21077	
X_{kr} (m)	0.7739	0.5427	0.3518	0.2311	0.2010	0.1909	0.1507	0.1307	0.1005	0.0900	0.0700	
$X_{gç}$ (m)	1.5000	1.3000	1.1000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	
	Demir Boru											
Re	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688	23602
X_{kr} (m)	0.7437	0.3719	0.2714	0.1909	0.1208	0.1306	0.1206	0.1206	0.0900	0.0703	0.0600	0.0503
$X_{gç}$ (m)	1.7000	1.2000	1.1000	0.9500	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
	Galvanizli Boru											
Re	2907	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439	22927
X_{kr} (m)	1.9096	0.4925	0.2513	0.1809	0.1508	0.1307	0.1307	0.1206	0.1005	0.1005	0.0704	0.0503
$X_{gç}$ (m)	yok	1.3500	1.0000	1.0000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
	Plastik Boru											
Re	2460	3691	4921	6890	8120	9843	12890	14458	16983	17540	20979	24317
X_{kr} (m)	1.0653	0.5829	0.3216	0.2211	0.1709	0.1407	0.1005	0.0804	0.0704	0.0804	0.0603	0.0503
$X_{gç}$ (m)	1.3000	1.2000	1.2000	0.7500	0.7500	0.7000	0.6700	0.6800	0.6800	0.6800	0.6800	0.6800

Tablo 5.10'da verilen X_{kr} değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Beş ayrı deney borusunun sayısal X_{kr} değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

Şekil 5.17'de görüldüğü gibi düşük Reynolds sayılarına doğru X_{kr} değerleri hızlı bir yükselişe geçmiştir. Her beş borunun X_{kr} değerleri birbirine yeterince yakın çıkmıştır. Tablo 5.10' daki $X_{gç}$ değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Beş farklı borunun sayısal çalışmasında Reynolds sayısına bağlı $X_{gç}$ değerleri

Şekil 5.18'de gösterildiği gibi hidrodinamik gelişme uzunlukları ($X_{gç}$) 10000'den daha düşük Reynolds sayılarına doğru doğrusal bir artış sergilemiş ve 10000 'den daha büyük Reynolds sayılarında ise sabit değerlerde olmuşlardır. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi PPRC borunun değerleri diğer boru değerlerine göre daha düşük olmuştur. Bunun nedeni ise PPRC boru çapının küçük olmasıdır. Bakır ve alüminyum boru çaplarının aynı olmasına rağmen $Re = 10000$ 'den itibaren bakır borunun gelişme uzunluğu alüminyum borununkinden daha büyük olmuştur. Bunun nedeni olarak da bakır boru pürüzlülüğünün alüminyum borununkinden daha düşük olmasıdır. Şekil 5.18'den çıkarılan sonuç şudur: aynı pürüzlülüğe sahip borularda küçük çaplı boruların hidrodinamik gelişme mesafeleri daha kısa olmakta ve aynı çaplı borularda ise pürüzlülüğe yüksek olan boruların hidrodinamik gelişme mesafeleri daha kısa olmaktadır.

Tablo 5.10'da verilen X_{kr} ve $X_{gç}$ uzunluklarının deneysel çalışmalarla uygunluklarının test edilmesi gerekir. Boruda gelişen akış plaka üzerinden gelişen akışa benzediğinden karşılaştırma plaka akışıyla yapılacaktır. Pürüzsüz bir plaka üzerindeki akışta laminardan türbülansa geçiş 1×10^5 gibi bir Reynolds sayısında başlar ve 4×10^6 gibi bir Reynolds sayısında da tam türbülanslı akış olarak devam eder. Boru akışında laminardan türbülansa geçiş noktası ve tam gelişmiş akış başlama noktasındaki Reynolds sayısı, plaka üzerindeki akışta olduğu gibi, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Re_{kr} = \frac{\rho u X_{kr}}{\mu} \quad (5.7)$$

$$Re_{gç} = \frac{\rho u X_{gç}}{\mu} \quad (5.8)$$

Tablo 5.10'da verilen X_{kr} ve $X_{gç}$ değerleri yerine yazılıp Reynolds sayıları hesaplandığında Tablo 5.11 oluşmaktadır.

Tablo 5.11. Her beş boru türü için hesaplanan kritik ve geçiş Reynolds sayı değerleri

	Alüminyum											
Re	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	21043	
Re _{kr}	79446	77158	66014	62443	65193	65866	61060	61613	60463	55584	48754	0
Re _{gç}	227791	237786	273441	304939	321871	342618	357103	379948	443557	514150	593209	0
	Bakır											
Re	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	21077	
Re _{kr}	102468	90302	77490	69053	69480	68225	64277	66748	61236	63697	56760	0
Re _{gç}	227479	227423	243422	273103	305573	301636	364250	420973	508171	583890	673015	0
	Demir Boru											
Re	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688	23602
Re _{kr}	95859	71896	68682	59502	45862	55551	57515	59917	55471	49507	46402	42378
Re _{gç}	257788	255210	272185	291327	331956	350540	378603	394467	507871	566201	623332	685794
	Galvanizli Boru											
Re	2907	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439	22927
Re _{kr}	199147	80210	65361	61684	57233	55878	59399	60624	53346	55937	46329	41100
Re _{gç}	yok	299691	364184	332391	347218	365366	388389	444586	437451	458695	549295	690464
	Plastik Boru											
Re	2460	3691	4921	6890	8120	9843	12890	14458	16983	17540	20979	24317
Re _{kr}	124828	102455	75370	72545	66065	65947	61707	55303	56881	67173	60273	58176
Re _{gç}	217866	206682	374965	263788	283670	325033	401111	449336	511929	545786	632863	826103

Tablo 5.11'de görüldüğü gibi tüm deney boruları için ölçülen kritik Reynolds sayıları $4 \times 10^4 < Re_{kr} < 1 \times 10^5$ değerleri arasına düşmekte ve geçiş Reynolds sayıları ise $2 \times 10^5 < Re_{gç} < 9 \times 10^5$ değerleri arasına düşmektedir. Tablo 5.11'de görüldüğü gibi kritik Reynolds sayıları 1×10^5 değerinden düşük ve geçiş Reynolds sayıları da 3×10^6 değerinden düşük olmuştur. Bu beklenen bir durumdur çünkü sayısal değerler boru pürüzlülüğünü ve giriş türbülansını içermektedir. Plakalarda 1×10^5 ve 3×10^6 Reynolds sayıları serbest akımlı, pürüzsüz bir plaka üzerindeki akıştan alınan değerlerdir. Dolayısıyla pürüzlülük ve giriş türbülansı kritik ve geçiş Reynolds sayılarını bu değerlerin altına düşürmüştür. Buradan çıkarılan sonuç sayısal çalışmanın deneysel çalışmaya uygun sonuçlar verdiğidir.

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 'de incelendiğinde kritik ve geçiş mesafelerinin borunun bağlı pürüzlülüğüne ve Reynolds sayısına bağlı birer fonksiyon olabilecekleri görülmektedir. Bu durumda X_{kr} ve $X_{gç}$ değerleri, aşağıda gösterildiği gibi, değişkenlere bağlı bir fonksiyon olarak değerlendirilebilir.

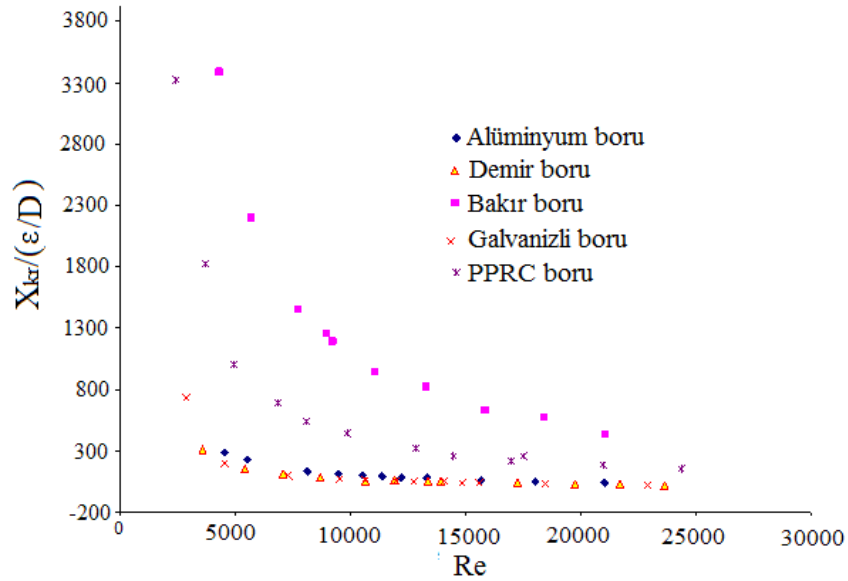
$$X_{kr} = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, \text{Re}\right) \quad X_{g\zeta} = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, \text{Re}\right) \quad (5.9)$$

Her beş borunun X_{kr} ve $X_{g\zeta}$ değerlerinin bağıl pürüzlülük ve Reynolds sayısına bağlı değişimlerinin incelenebilmesi için boruların bağıl pürüzlülük değerleri Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12. Beş ayrı deney borusunun bağıl pürüzlülük değerleri

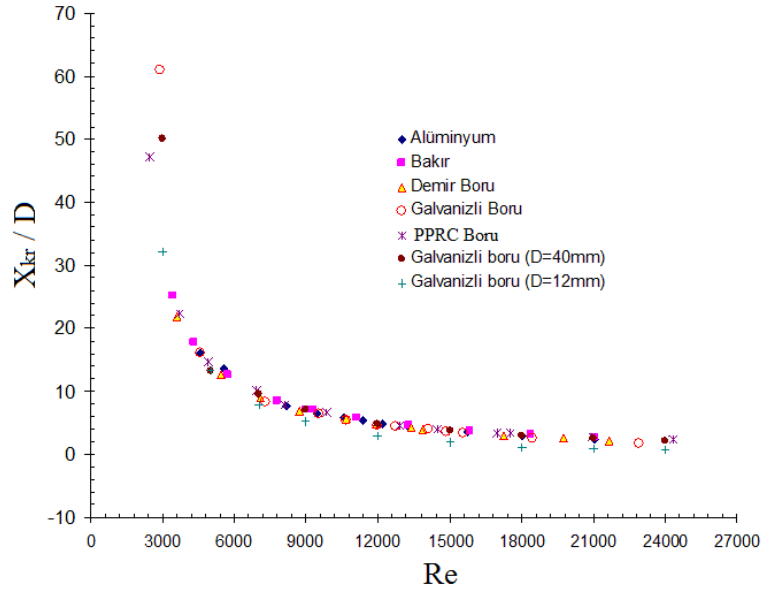
Alüminyum	Bakır Boru	Demir Boru	Galvanizli Boru	Plastik Boru
Bağıl Pürüzlülük (ε/D)				
0.00159	0.000163	0.00236	0.00256	0.000331

Kritik geçiş mesafesinin Reynolds sayısına ve bağıl pürüzlülüğe bağlı değişimi ise şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. $X_{kr}/(\varepsilon/D)$ sayısal değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

Şekil 5.19'da görüldüğü gibi X_{kr} değerinin bağıl pürüzlülük değerine oranlanması kritik değerleri birbirinden ayırmaktadır. Bu şekilde değerleri Reynolds sayısına bağlı tek bir fonksiyon ile ifade etmek mümkün değildir. Burada pürüzlülük (ε) değerinden çok boru çapının etkili olduğu görülmektedir. Boru çapı etkisi düşünülerek boyutsuz X_{kr}/D değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri Şekil gösterilmiştir.

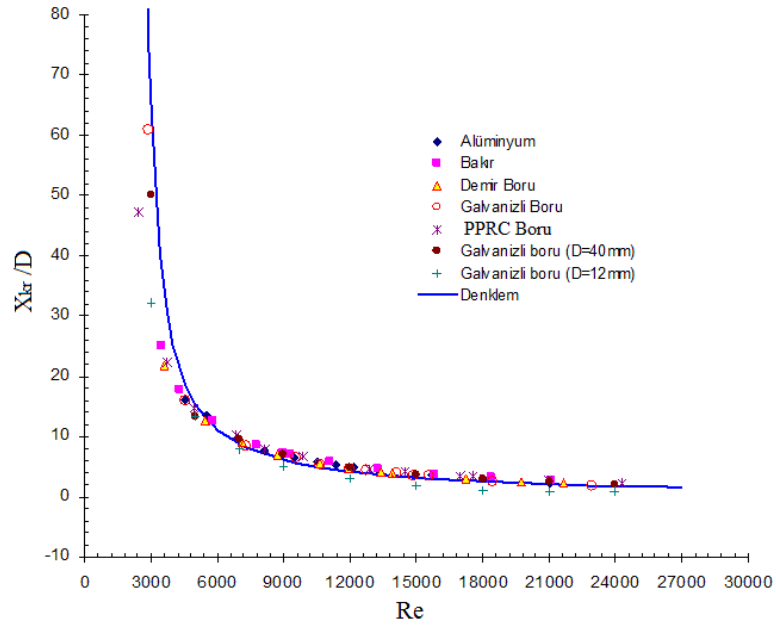


Şekil 5.20. Boyutsuz X_{kr}/D değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

Şekil 5.20'de görüldüğü gibi her boru türü için hesaplanan X_{kr}/D değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri hemen hemen üst üste çakışmıştır. Yalnız burada her beş borunun çapı birbirine yakın olduğundan galvaniz boru pürüzlülüğüne sahip 40 mm ve 12 mm çaplı borularla yeni ayrı iki sayısal çalışma daha yapılmış ve sonuçları Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Yapılan eğri uydurma çalışmaları ile boyutsuz X_{kr}/D değerlerinin aşağıdaki sayısal bağıntı ile ifade edilebildiği görülmüştür.

$$\frac{X_{kr}}{D} = 297.3 \left[(Re - 2000)^{-1.18} - 9230.5 Re^{-2.2} \right] \quad (5.10)$$

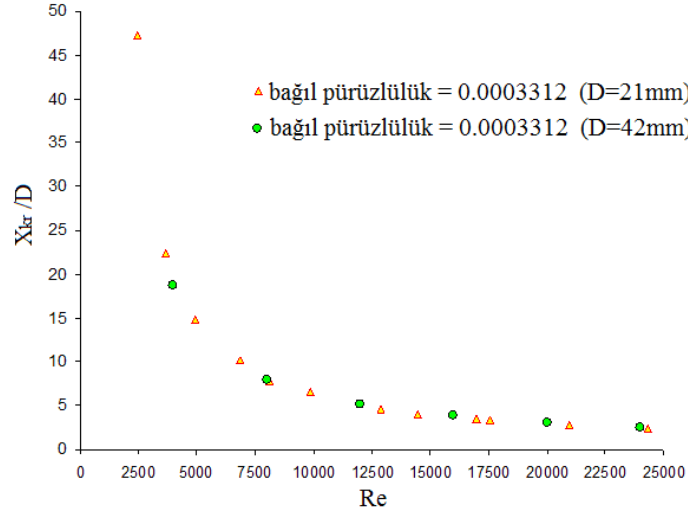
Bu bağıntı, 3000-25000 Reynolds aralığındaki sayısal X_{kr} / D değerlerini aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tahmin etmiştir.



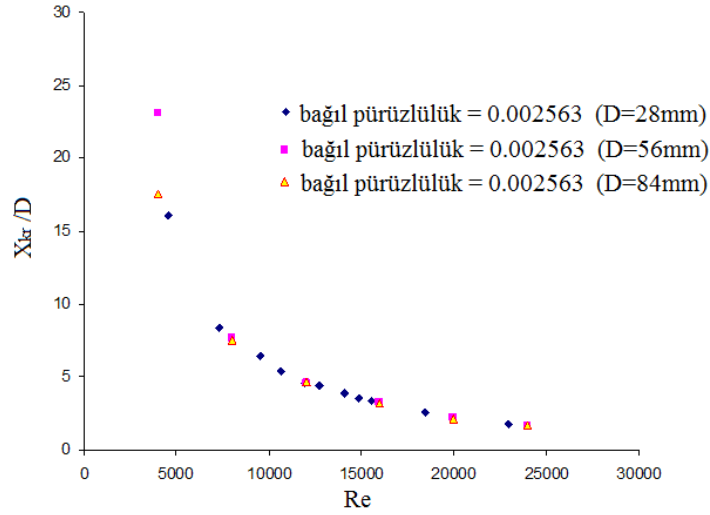
Şekil 5.21. Reynolds sayısına bağlı X_{kr}/D sayısal değerlerinin Denklem (5.10) tahmin edilmesi

Şekil 5.21'de görüldüğü gibi Denklem (5.10) bağıntısı sayısal değerlerden maksimum $\pm\%20$ ve genel ortalama olarak da $\pm\%10$ sapma göstermiştir.

Denklem (5.10) ile hesaplanacak X_{kr} değerlerinin Denklem (5.4)'te yer alan " a " katsayısını hesaplamak için kullanılması pek uygun olmadığı görülmektedir. Çünkü bu şekilde bulunan " a " değerleri Denklem (5.4)'te yerine yazılarak kayma gerilmesi hesaplandığında hata derecesinin yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yerine " a " değerlerini hesaplamak için bulunması gereken kritik değerlerin çok düşük hata paylarıyla hesaplanabileceği başka bağıntıların bulunması gerekli görülmektedir. Yalnız boru akışlarında, tahmini kritik mesafeleri bulmak için denklem (5.10) ile verilen sayısal bağıntının kullanılmasının yeterince uygun olduğu görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda bağıl pürüzlülükleri aynı olan boru akışlarında bulunan X_{kr} değerleri incelendiğinde değerlerin Şekil 5.22, 5.23'te görüldüğü gibi üst üste çakıştıkları görülmüştür.



Şekil 5.22. Bağıl pürüzlülükleri aynı ve çapları farklı olan iki boru akışının boyutsuz kritik mesafe değerleri



Şekil 5.23. Bağıl pürüzlülükleri aynı ve çapları farklı olan üç boru akışının boyutsuz kritik mesafe değerleri

Şekil 5.22, 5.23'te görüldüğü gibi bağıl pürüzlülükleri aynı olan boru akışlarının boyutsuz kritik mesafe değerleri, Reynolds sayısına bağlı değişimlerinde, üst üste çakışmaktadır. Burada bağıl pürüzlülükleri aynı olan boru akışlarında bulunan değerlerin Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyon olduğu görülmektedir. Bu şekilde farklı bağıl pürüzlülüğe sahip borular ile yapılacak kapsamlı bir sayısal çalışma ile X_{kr} değerlerin çok düşük hatalarla tahmin edilebilecekleri öngörülmektedir. Çok düşük hatalarla tahmin edilen bu X_{kr} değerleri "a" katsayısını hesaplamak için kullanılabilir ve bu şekilde bulunan "a" değerleri denklem (5.4)'te yerine yazılmasıyla duvar kayma gerilmesi değerleri düşük hata payları ile tahmin edilebilecektir. Farklı bağıl pürüzlülükteki borular için yapılacak geniş

kapsamlı sayısal çalışmalar bu tez konusunun kapsamı dışında olduğundan sadece bir öneri olarak sunulmuştur.

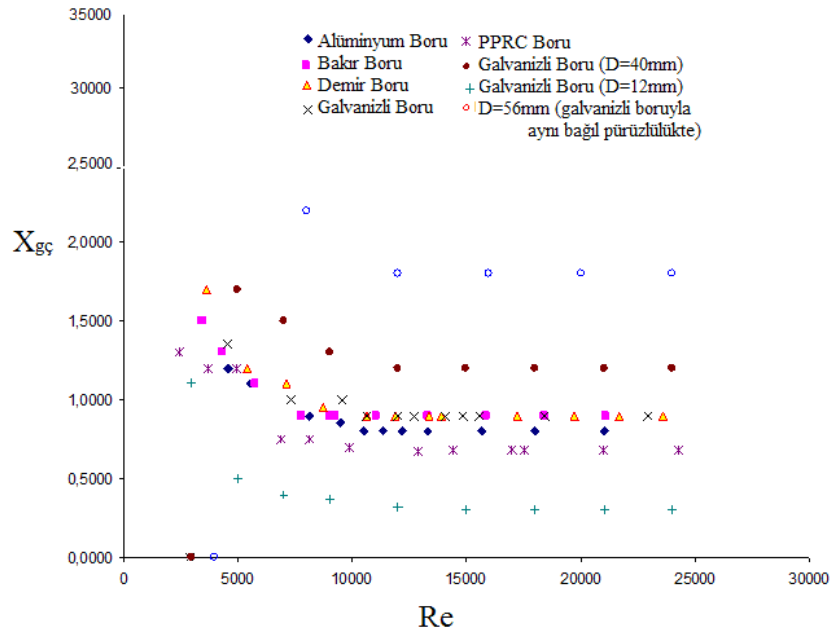
5.5.2 Hidrodinamik Gelişme Mesafesinin Sayısal Analizi

Tam gelişmiş boru akışları, hidrodinamik gelişme mesafesinden itibaren başlar. Hidrodinamik gelişme mesafesi ise duvar kayma gerilmesinin veya eksenel hızın sabit değişmez değerlere ulaştığı boru mesafesidir. Beş borunun sayısal çalışmasından çıkarılan X_{gc} değerleri ise Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13. Beş farklı borunun sayısal çalışmasından çıkarılan X_{gc} mesafe değerleri

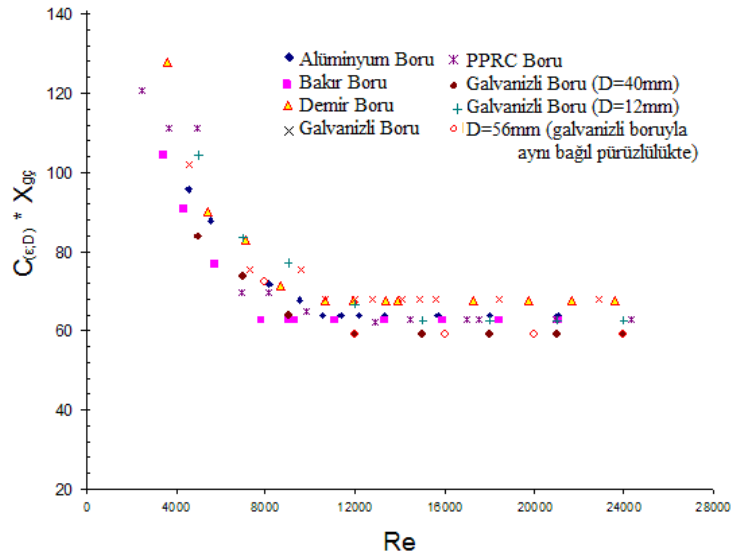
Alüminyum Boru												
Re	4572	5539	8152	9496	1053	1137	1217	1329	1571	1800	2104	
X_{gc} (m)	1.200	1.100	0.900	0.850	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	
Bakır Boru												
Re	3443	4326	5738	7785	9002	9282	1107	1329	1585	1838	2107	
X_{gc} (m)	1.500	1.300	1.100	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	
Demir Boru												
Re	3609	5422	7101	8722	1064	1190	1337	1390	1725	1973	2168	2360
X_{gc} (m)	1.700	1.200	1.100	0.950	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
Galvanizli Boru												
Re	2907	4559	7295	9553	1064	1197	1273	1407	1486	1558	1843	2292
X_{gc} (m)	yok	1.350	1.000	1.000	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
PPRC Boru												
Re	2460	3691	4921	6890	8120	9843	1289	1445	1698	1754	2097	2431
X_{gc} (m)	1.300	1.200	1.200	0.750	0.750	0.700	0.670	0.680	0.680	0.680	0.680	0.680
Galvanizli Boru (D=40mm)												
Re	3000				1200	1500	1800	2100	2400			
X_{gc} (m)	yok	1.7	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2			
Galvanizli Boru (D=12mm)												
Re	3000			9000	1200	1500	1800	2100	2400			
X_{gc} (m)	1.1	0.5	0.4	0.37	0.32	0.3	0.3	0.3	0.3			
Galvanizli Boruyla Aynı Bağlı Pürüzlülükte Boru (D=56mm)												
Re	4000	8000	1200	1600	2000	2400						
X_{gc} (m)	3	2.200	1.800	1.800	1.800	1.800						

Tablo 5.13'te verilen geçiş değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri ise Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Farklı pürüzlülükteki borularda $X_{gç}$ mesafelerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

Şekil 5.24'te görüldüğü gibi her boru akışının geçiş mesafe değerleri birbirinden farklı olmuştur. Geçiş değerleri $Re < 10000$ 'den düşük Reynolds sayılarına doğru doğrusal bir artış göstermiş ve $Re > 10000$ 'den itibaren ise sabit değerleri izlemiştir. Bu şekilde tüm boru akışlarının geçiş mesafelerini tek bir bağıntı ile ifade edilmesi imkansız olmaktadır. Bunun için geçiş mesafeleriyle birlikte boru çapı ve pürüzlülük değerine bağlı bir çarpan ($C_{(ε,D)}$) kullanıldığında değerlerin birbirine yakınlaştığı görülmüştür. Bu durum Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



Şekil 5.25. $C_{(ε,D)}$ $X_{gç}$ değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimleri

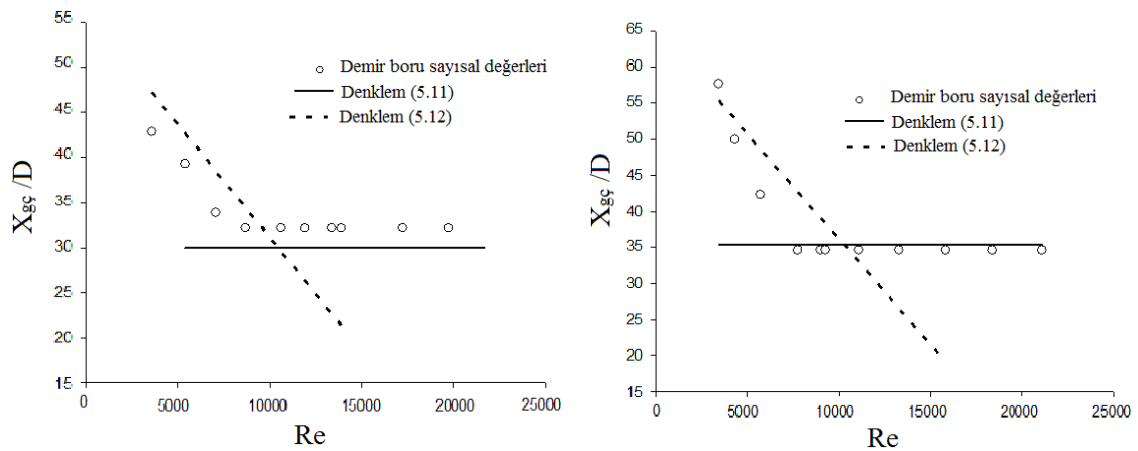
Şekil 5.25'te görüldüğü gibi geçiş değerlerinin pürüzlülük ve boru çapı değerlerine bağlı bir katsayı ile çarpılmaları halinde değerleri birbirine yakınlaştırmaktadır. Burada geçiş değerleri iki kısma ayrılmıştır. $Re > 10000$ itibaren sabit değerler ve $Re < 10000$ altındaki değerlerde ise değişen değerler olmuştur. Yapılan eğri uydurma çalışmaları ile bu iki kısım aşağıdaki bağıntılarla ifade edilebilmiştir.

$$\frac{X_{gç}}{D} = 35 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} \quad 10000 < Re < 25000 \quad (5.11)$$

$$\frac{X_{gç}}{D} = 0.546 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (118.5 - 0.005 Re) \quad Re < 10000 \quad (5.12)$$

Bu iki sayısal bağıntıyla $X_{gç} / D$ değerleri tahmini olarak hesaplanabilmektedir. Bu bağıntılarda D ve ε , sırasıyla, çap ve pürüzlülüktür ve bağıntılardaki işlevleri sadece bir çarpan olmuştur. Bu nedenle bağıntılarda birimleri geçerli değildir fakat bağıntılarda "m" birimindeki değerleri yazılmalıdır. Denklem (5.11) bağıntısıyla bulunan $X_{gç} / D$ değerleri Reynolds sayısına bağlı değilken denklem (5.12) bağıntıda ise Reynolds sayısına bağlı bir değişken olmuştur. Denklem (5.11) ile bulunan $X_{gç}$ değerleri Tablo 5.13 'teki sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3$ sapma göstermiştir. Denklem (5.12) ile bulunan $X_{gç}$ değerleri ise Tablo 5.13'teki sayısal değerlerden maksimum $\pm\%20$ ve genel ortalama olarak $\pm\%8$ sapma göstermiştir.

Denklem (5.11) ve denklem (5.12) ile demir borunun boyutsuz geçiş değerleri Şekil 5.26'da görüldüğü gibi tahmin edilmiştir.



Şekil 5.26. Demir boru $X_{gç}/D$ sayısal değerlerinin Denklem (5.11) ve Denklem (5.12) ile tahmin edilmesi

Boyutsuz mesafeler için bulunan bu iki sayısal bağıntının deneysel bağıntılarla olan karşılaştırması ise aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Literatürde hidrodinamik gelişme uzunluk-ları için aşağıdaki bağıntılar önerilmektedir.

$$\frac{X_{g\zeta}}{D} = 1.6x Re^{1/4} \quad (5.13)$$

$$\frac{X_{g\zeta}}{D} = 4.4x Re^{1/6} \quad (5.14)$$

$$\frac{X_{g\zeta}}{D} = 60 \quad (5.15)$$

Her iki sayısal bağıntıdan çıkarılan $X_{g\zeta}/D$ değerlerinin bu deneysel bağıntılarla karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir.

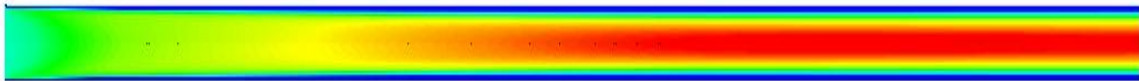
Tablo 5.14. Sayısal bağıntılardan elde edilen $X_{g\zeta}/D$ değerlerinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması

Re	Alüminyum boru										
	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	21043
Denklem (5.11)	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842	30.842
Denklem (5.13)	13.157	13.803	15.203	15.794	16.211	16.522	16.806	17.181	17.913	18.534	19.271
Denklem (5.14)	17.925	18.508	19.739	20.248	20.602	20.865	21.103	21.416	22.020	22.526	23.119
Denklem (5.15)	60										
Re	Bakır boru										
	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	21077
Denklem (5.11)	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383	35.383
Denklem (5.13)	12.256	12.976	13.925	15.029	15.585	15.705	16.415	17.181	17.954	18.631	19.278
Denklem (5.14)	17.098	17.761	18.617	19.588	20.068	20.171	20.775	21.416	22.054	22.605	23.125
Denklem (5.15)	60										
Re	Demir boru										
	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688
Denklem (5.11)	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985	29.985
Denklem (5.13)	12.401	13.730	14.688	15.462	16.251	16.713	17.206	17.375	18.338	18.963	19.417
Denklem (5.14)	17.233	18.442	19.290	19.963	20.636	21.026	21.437	21.577	22.367	22.873	23.236
Denklem (5.15)	60										
Re	Galvanizli boru										
	2907	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439
Denklem (5.11)	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842	29.842
Denklem (5.13)	11.748	13.147	14.787	15.818	16.251	16.738	16.998	17.428	17.666	17.876	18.645
Denklem (5.14)	16.622	17.917	19.377	20.268	20.636	21.046	21.264	21.621	21.817	21.990	22.616
Denklem (5.15)	60										
Re	PPRC boru										
	2460	3691	4921	6890	8120	9843	12890	14458	16983	17540	20979
Denklem (5.11)	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329	34.329
Denklem (5.13)	11.268	12.471	13.401	14.577	15.188	15.937	17.048	17.545	18.265	18.413	19.256
Denklem (5.14)	16.166	17.297	18.147	19.194	19.726	20.369	21.306	21.717	22.308	22.428	23.107
Denklem (5.15)	60										

Tablo 5.14'te görüldüğü gibi Denklem (5.11)'de verilen sayısal bağıntı X_{kr}/D değerlerini 30-40 aralığında tahmin etmişken diğer iki deneysel bağıntı ise X_{kr}/D değerlerini daha düşük değerlerle tahmin etmiştir. Tahmini 60 çap mesafesi ise sayısal ve deneysel bağıntılardan çok daha yüksek olmuştur. Burada deneysel bağıntılar Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyonken sayısal bağıntı ise boru çapı ve pürüzlülüğe bağlı bir fonksiyon olmuştur. Yalnız Denklem 5.13 ve 5.14 'te verilen deneysel bağıntılar 10^5 - 10^6 Reynolds sayıları arasındaki deneysel değerlerle iyi uyum gösterdikleri görülmüştür. Bu sayısal çalışma ise 25000'den daha düşük Reynolds sayılarını kapsamıştır. Bu tablodan çıkan sonuç sayısal boyutsuz geçiş mesafeleri bu deneysel bağıntılarla iyi uyum göstermemiştir.

5.6. Hız Profilleri

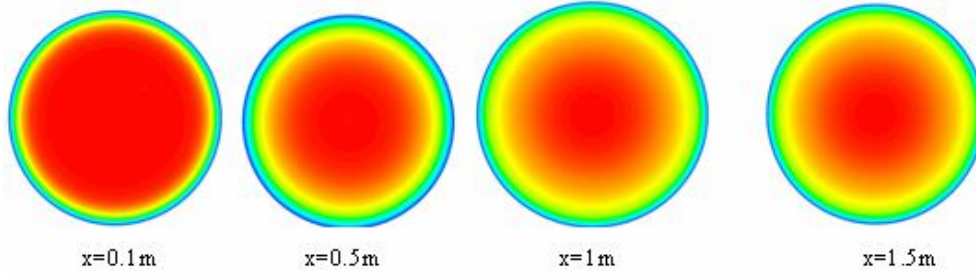
Boru girişinde düzgün bir hız profiline sahip olan akış, boru cidarı etkisiyle, gelişmeye başlayan sınır tabakanın etkisiyle hız profili değişmeye başlar ve sınır tabaka kalınlığının boru merkezinde birleşmesiyle tam gelişmiş laminar veya türbülans hız profiline dönüşür. Eğer gelişen akış, sınır tabaka birleşiminden önce türbülansa uğramazsa tam gelişmiş laminar akışa eğer akış türbülansa uğrarsa tam gelişmiş türbülanslı akışa dönüşür. Yapılan bu sayısal boru akışlarında gelişen ve tam gelişmiş akış hız profilleri görsel olarak, "CFD-Post processing" programında simule edilmiş ve sayısal değerleri analiz edilerek deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. CFD-Post processing programı ise Ansys CFX proje penceresinde "result" seçeneği ile açılan bir programdır. Bu program sayesinde akış alanındaki tüm değişkenlerin sayısal sonuçları görsel ve grafiksel olarak değerlendirilebilmektedir. Burada değişkenler durumları renk kontörleri veya vektörlerle görselleştirilebilmektedir. Örneğin gelişen akışın merkez düzlemi üzerindeki hız durumu Şekil 5.27'de renk kontörleriyle gösterilmiştir.



Şekil 5.27. Eksenel merkezi düzlem üzerinde gelişen hızın renk kontörleri ile gösterilmesi

Şekil 5.27'de gösterildiği gibi boru girişindeki yeşil renk düşük akış hızını, kırmızıya doğru olan renkler ise yüksek akış hızını göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi boru

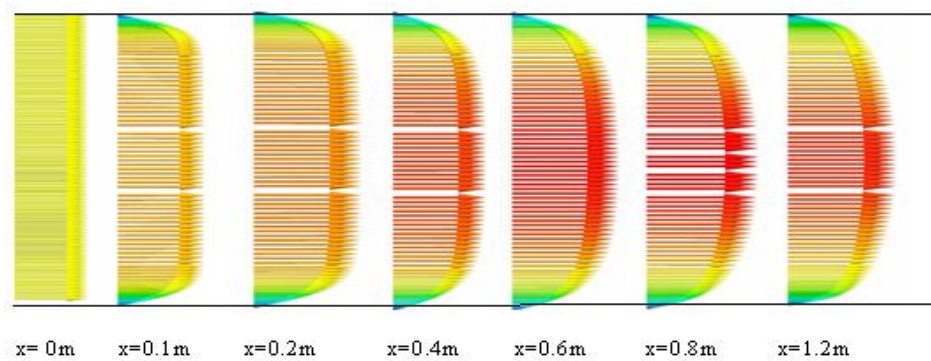
girişinde gelişen akış kısmında hız kontörünün rengi değişmekte fakat tam gelişmiş akış kısmında ise hız kontörünün rengi değişmez duruma gelmiştir. Renk kontörü ayrıca merkez çizgiden boru cidarına doğru renk değişimi ile hız azalmasını da göstermiştir. Borunun değişik mesafelerindeki akış en kesit hız dağılım durumu ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Borunun değişik mesafelerinde, en-kesit hız dağılımının renk kontörleriyle gösterilmesi

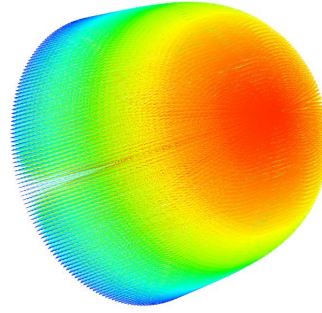
Bu kontörlerdeki renk değişimleri hız değişimini göstermiştir. Örneğin boru girişine çok yakın olan $x = 0.1 \text{ m}$ 'deki hız kontörü boru cidarına yakın bölgeler hariç tamamıyla kırmızı renge hakimdir. Kırmızı renk, bu akış kısmının aynı hız değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu da akışın boru girişinde düzgün bir hız profilinde olduğunu göstermektedir. Borunun aşağı akım mesafelerinde bulunan diğer renk kontörlerinde ise kırmızı rengin boru merkezine doğru daraldığı görülmektedir. Bu en kesitteki renk değişimleri ise hız dağılımının parabolik olduğunu göstermiştir. Renk kontörlerinde, boru cidarına bitişik renk hızın düşük olduğunu ve cidardan uzak renkler ise hızın yüksek olduğunu göstermiştir.

Boru akışındaki hız durumu ayrıca vektörlerle de gösterilebilmektedir. Örneğin gelişen akıştaki hız profillerinin değişik mesafelerdeki değişimleri vektörlerle aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



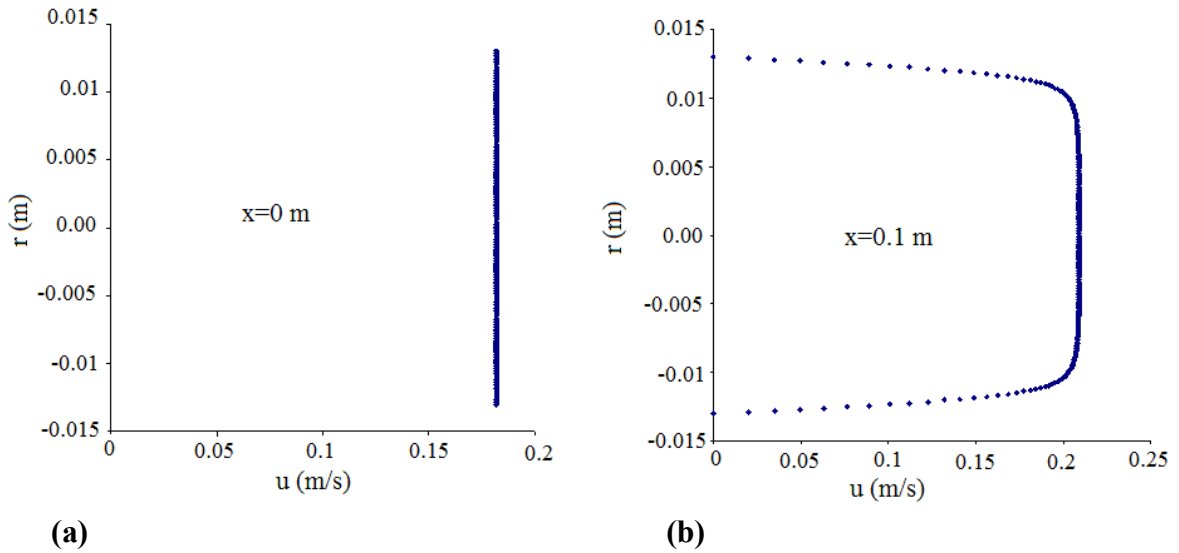
Şekil 5.29. Borunun değişik mesafelerinde alınan hız dağılım vektörleri

Şekil 5.29'da görüldüğü gibi boru girişinde ($x = 0$ m) hız düzgün profildedir. Aşağı akım hız vektörlerine doğru ise hız profilleri gelişmekte ve sonuçta $x = 0.8$ m ve $x = 1.2$ m 'deki hız vektörleri ise tam gelişmiş hız profillerinde olmuşlardır. Bu vektörlerdeki renk durumu da aynı zamanda hız değişimini göstermiştir. Tam gelişmiş hız profilinin vektörel olarak üç boyutlu gösterimi ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

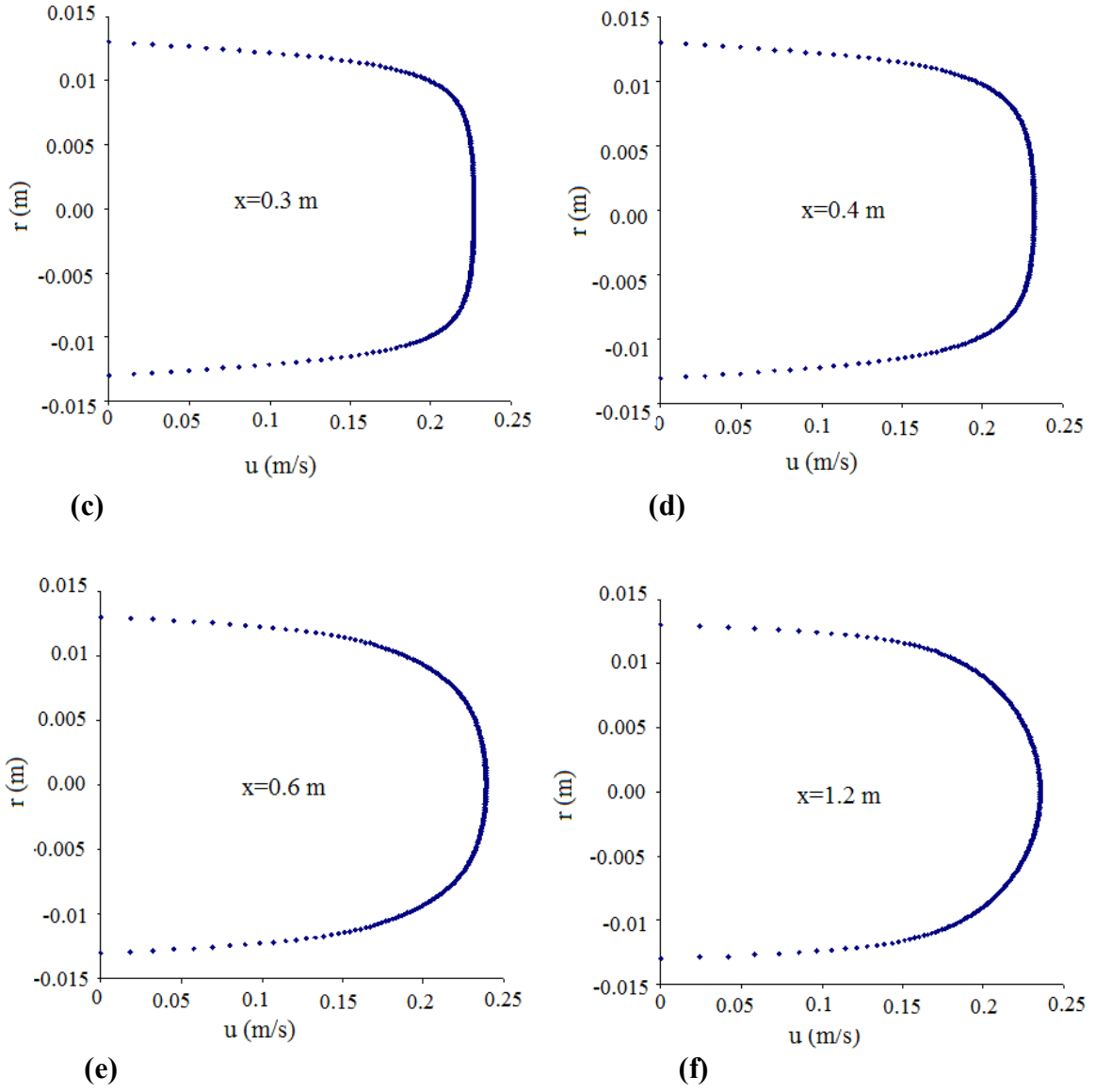


Şekil 5.30. Akış en kesitinde üç boyutlu hız dağılım vektörü

Boru girişinden tam gelişmiş akış mesafesine kadar değişik aşağı akım yönlü mesafelerdeki hız profillerinin durumları ise Şekil 5.31'de grafiksel olarak da gösterilmiştir.

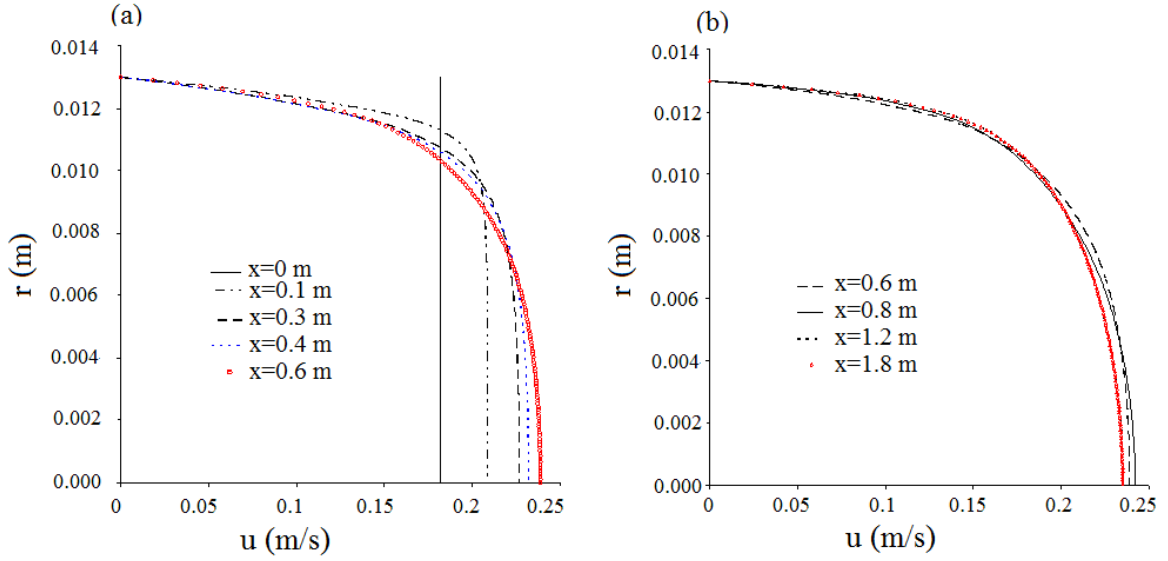


Şekil 5.31. sonraki sayfada devamı diyor.



Şekil 5.31. $Re=5539$ sayılı alüminyum boru akışında değişik mesafelerde (a-e) alınan hız profilleri

Şekil 5.31'de a-e aralığında verilen şekiller akış boyunca hız profilinin değişimini ve sonunda ($x = 1.2$ m) tam gelişmiş türbülans hız profiline dönüşümünü göstermiştir. $x = 1.2$ m 'nin yazıldığı şekilde bulunan hız profili boru cidarına yakın bölgede hızlı bir değişime uğramış ve diğer akış bölgelerinde ise değişimi az olmuştur. Bu şekillerde verilen hız profilleri Şekil 5.32 üzerinde ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 5.32. Re = 5539 sayılı alüminyum boru akışında hız profilleri (a) $x = 0-0.6$ m mesafeleri arasındaki hız profilleri (b) $x = 0.6-1.8$ m mesafeleri arasındaki hız profilleri

Şekil 5.32'de a-b şekillerinde gösterildiği gibi $x = 0.8$ m'ye kadar hız profilleri gelişmekte, 1.2 m ve 1.8 m'deki hız profilleri ise üst üste çakışmaktadır. Hız profillerinin üst üste çakışması hız gelişmesinin tamamlandığını ve tam gelişmiş türbülanslı akışın başladığını göstermektedir.

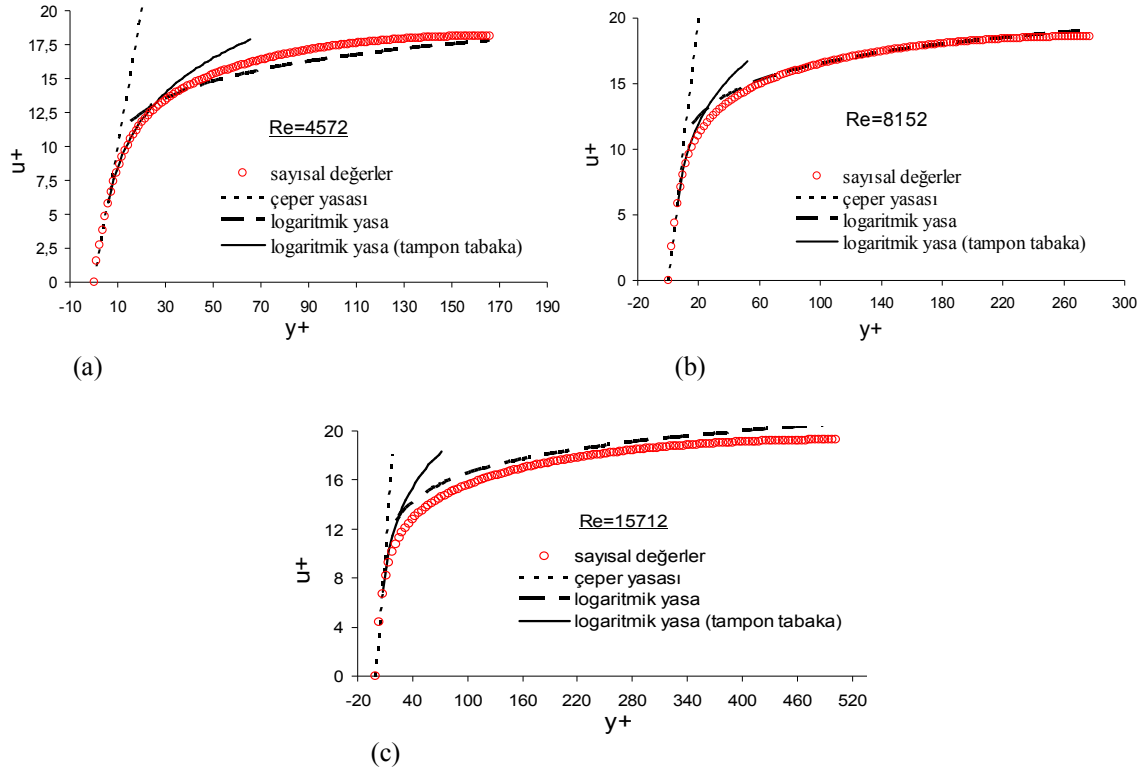
Beş borunun sayısal çalışmasından çıkarılan tam gelişmiş türbülanslı hız profillerinin deneysel bağıntılarla ve diğer deneysel çalışmalarla karşılaştırılması bundan sonraki kısımda yer edinmiştir.

5.7. Sayısal Hız Profillerinin Deneysel Bağıntılarla Karşılaştırılması

Tam gelişmiş boru akışlarında laminar ve türbülans hız profilleri Şekil 1.9'da gösterilmiştir. Tam gelişmiş laminar hız profili tüm Reynolds sayılı akışlarda aynı kalırken türbülans hız profili ise değişkenlik göstermektedir. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi tam gelişmiş türbülans boru akışlarında hız profili boru cidarından merkez çizgisine kadar kısımlara ayrılmıştır. Bunlar laminar alt tabaka, tampon tabaka, örtüşme tabakası ve türbülanslı tabakadır. Deneysel çalışmalar sonucunda bu tabakalardaki hız profilleri bazı deneysel bağıntılarla ifade edilmiştir. Laminar alt tabaka "çeper yasası" (Denklem (1.24)) ile; tampon tabaka, örtüşme tabakası ve türbülans tabakasının bir kısmı ise "logaritmik yasa" (Denklem (1.27 ve 1.28)) ile ifade edilmiştir.

Bu kısımda ise beş farklı boru çalışmasından çıkarılan hız profilleri bu deneysel yasalarla karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm boru akışlarında 1.8 m mesafesinde tam gelişmiş akış şartları olduğundan bu en kesitteki hız profilleri kullanılmıştır.

Örneğin alüminyum borunun değişik Reynolds sayılarındaki çalışmasından çıkarılan hız profilleri çeper yasasıyla ve logaritmik yasayla aşağıdaki şekillerde karşılaştırılmıştır.

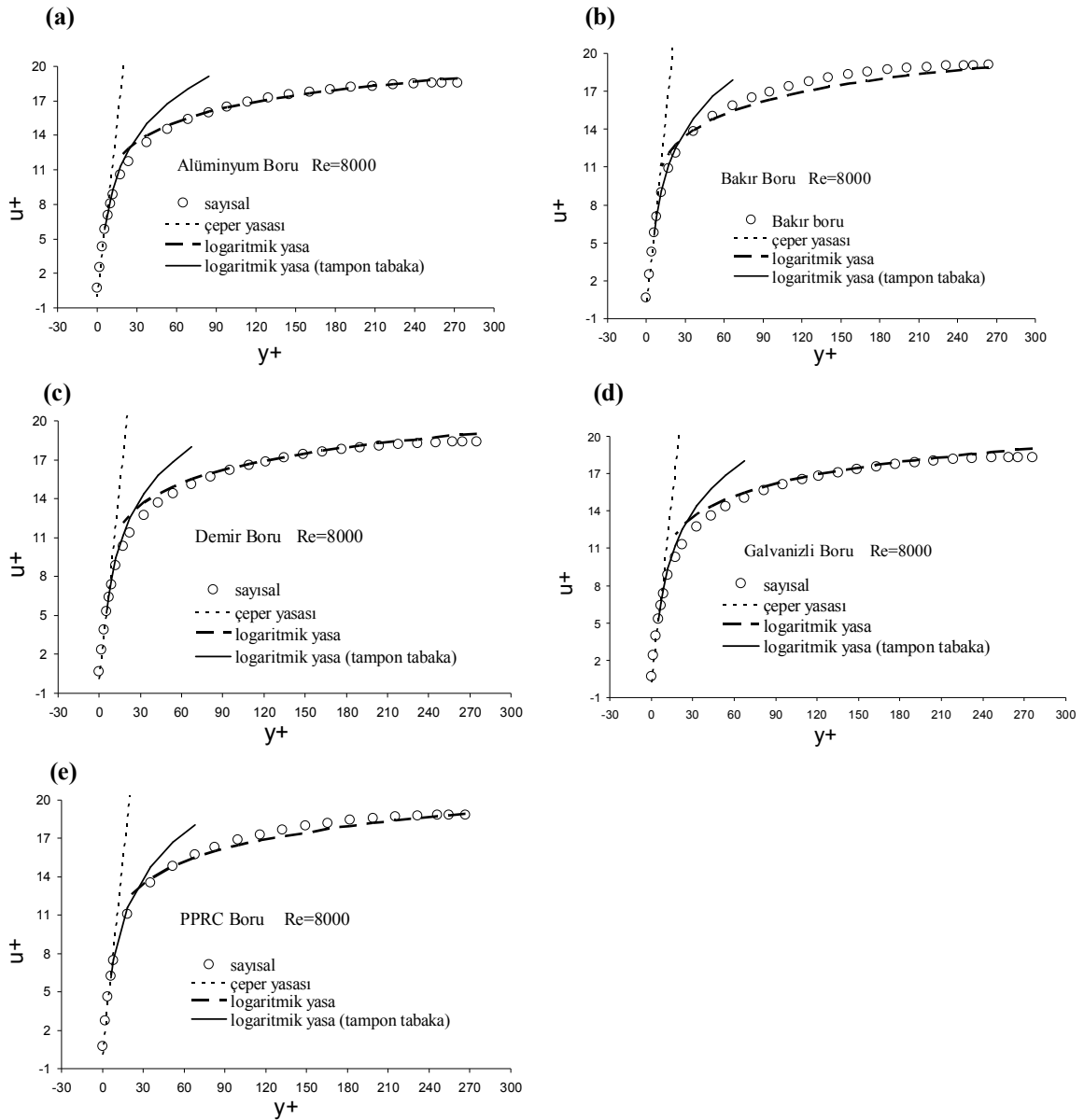


Şekil 5.33. (a-c) Alüminyum boru çalışmasında boyutsuz hız profillerinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması

Şekil 5.33 (a-c)'de görüldüğü gibi, sayısal boyutsuz hız değerleri, $0 < y^+ < 5$ boyutsuz mesafe aralığında çeper yasası ile iyi uyum göstermişlerdir. Bu aralıkta çeper yasası sayısal değerlerden ortalama $\pm \%13$ sapma göstermiştir. $5 < y^+ < 30$ boyutsuz mesafe aralığında ise sayısal boyutsuz hız değerleri tampon tabaka için verilen logaritmik yasa denklem değerlerinden ortalama $\pm \%10$ civarında sapma göstermiştir. $y^+ > 30$ boyutsuz mesafe değerinden itibaren ise sayısal boyutsuz hız değerleri logaritmik yasa denklem değerleriyle çok iyi uyum göstermiştir. Burada logaritmik yasa değerleri $30 < y^+ < 60$ aralığında ortalama $\pm \%5$ civarında, $60 < y^+ < 300$ aralığında ise ortalama $\pm \%3$ civarında ve $300 < y^+ < 600$ aralığında ise ortalama $\pm \%4$ civarında sayısal değerlerden sapma göstermiştir. $30 < y^+ < 600$ boyutsuz mesafe aralığı düşünüldüğünde ise genel ortalama olarak

$\pm 3.5\%$ civarında sayısal değerlerden sapma göstermiştir. Logaritmik yasanın tampon tabaka denklemine ve çeper yasasına göre sayısal değerlerle olan uyumu çok daha iyi olmuştur. Burada görülmesi gereken bu üç bağıntının deneysel bağıntı olmasıdır ve sayısal hız profilleri bu deneysel bağıntılarla çok iyi uyum sağlamışlardır. Bu da sayısal çalışmanın güvenilirliğini pekiştirmektedir.

Şekil 5.34 (a-e)'de ise beş farklı borunun 8000 Reynolds sayısındaki çalışmalarından çıkarılan boyutsuz hız profillerinin deneysel bağıntılarla olan karşılaştırmasını göstermiştir.



Şekil 5.34. Aynı Reynolds sayılı akışta beş farklı borunun (a-e) sayısal boyutsuz hız profilinin deneysel bağıntılarla karşılaştırılması

Şekil 5.34 (a-e)'de görüldüğü gibi her beş borunun boyutsuz hız değerleri deneysel bağıntılarla iyi uyum sağlamıştır. Burada önemli olan deneysel çalışmanın sayısal çalışmayı desteklemiş olmasıdır. Beş farklı boru türü için 2000-25000 Reynolds sayı aralığında yapılan tüm sayısal çalışmalardan çıkarılan boyutsuz hız değerleri deneysel bağıntılarla karşılaştırılmış ve sonuç olarak tüm Reynolds sayılarında genel ortalama olarak iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Tablo 5.15'te ise deneysel bağıntıların, beş farklı boru türüyle yapılan tüm sayısal çalışmalardaki boyutsuz hız profili değerlerinden genel ortalama yüzde sapmalarını göstermektedir.

Tablo 5.15. Deneysel bağıntıların sayısal değerlerden genel ortalama sapma yüzdeleri

	Alüminyum boru	Bakır boru	Demir boru	Galvanizli boru	PPRC boru
	Sapma yüzdeleri - genel ortalama				
Çeper Yasası	± %14	± %15	± %13	± %18	± %18
Logaritmik Yasa	± %3	± %3	± %5	± %7	± %3
Tampon Tabaka	± %9	± %6	± %10	± %13	± %6

Tablo 5.15'te verilen değerlere göre logaritmik yasa, çeper ve tampon tabaka yasasına göre, sayısal değerlerle çok iyi uyum sağlamıştır. Tampon tabakayı ifade eden logaritmik yasa denkleminin de çeper yasasına göre sayısal değerlerden daha iyi uyum sağladığı görülmektedir. Çeper yasasının yüksek sapmasının nedeni ise duvara çok yakın boyutsuz mesafe değerlerine doğru ($y^+ < 2$) sapmasının yüksek olmaya başlamasıdır. Bunun nedeni de boruların pürüzlü olmasıdır. Çünkü çeper yasası genellikle pürüzsüz boruların deney değerleriyle iyi uyum sağlamaktadır. Yukarıdaki sapma yüzdeleri boyutsuz mesafenin 600 değerine kadarki karşılaştırmalarını içermektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda, logaritmik yasa $30 < y^+ < 600$ aralığında, çeper yasası $0 < y^+ < 5$ aralığında ve tampon tabaka denklemi ise $5 < y^+ < 30$ aralığında sayısal boyutsuz hız değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak sayısal çalışmadaki tam gelişmiş hız profilleri deneysel bağıntılarla iyi uyum sağlamıştır. Buradaki sayısal ve deneysel bağıntıların karşılaştırılmasının nedeni sayısal çözümdeki güvenilirliği göstermek içindir. Bu karşılaştırmalara göre sayısal çalışmanın doğruluk derecesi yüksek olmaktadır.

5.8. Boyutsuz Hız Profillerinin Başka Deneysel Çalışmalarla Karşılaştırılması

Şimdiye kadar sayısal hız profilleri deneysel bağıntılarla karşılaştırıldı ve sonuç olarak iyi uyum gösterdikleri görüldü. Burada ise literatürde bulunan başka deneysel çalışmalarla karşılaştırılacaktır. Taishi vd. [34], iki farklı Ultrasonik Hız Profili (UVP) cihazını kullanarak tam gelişmiş türbülanslı boru akışında ölçtükleri ortalama hız profillerinin akış debisi ölçümlerindeki yeterliliklerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadaki amaç UVP metodunun ortalama hız profili ölçümlerindeki uygunluğunu test etmektir. Deney çalışmaları sonucunda akış debisi ölçümlerinde UVP metodunun kullanılmasının uygun olduğu bulunmuştur. Deneysel çalışmalar 5300-20000 aralığındaki Reynolds sayılarında yapılmıştır. 5300, 8000 ve 20000 Reynolds sayılarında yapılan deney çalışmalarını sayısal çalışmayla karşılaştırmak için bu üç deney Reynolds sayısında sayısal çalışma yapılmıştır. Deney çalışmasında kullanılan boru çapı, akış şartları ve akışkan özellikleri ise Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.16. Taishi vd. [34] deney çalışmalarında kullanılan boru geometrisi akış ve akışkan özellikleri

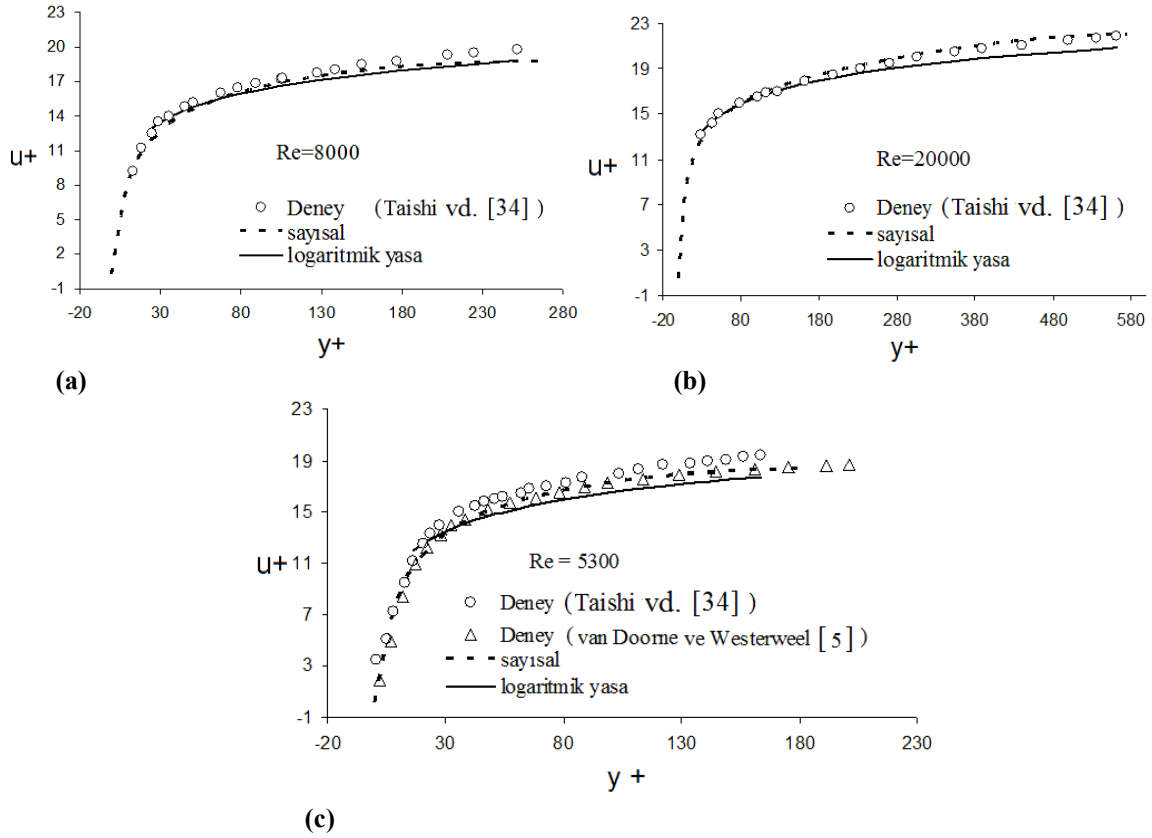
	Re	5300	8000	20000
Ortalama akış hızı : U		0.1063	0.1608	0.399
Sürtünme hızı : u^*		0.00729	0.0104	0.02306
Boru çapı : D		50 mm		
Dinamik viskozite : μ		0.001 Pa.s		
Akışkan yoğunluğu : ρ_{su}		998 kg/m ³		
Pürüzlülük yüksekliği : ε		0.0225 mm		
Giriş türbülans yoğunluğu : I		% 5 (orta yoğunluklu türbülans)		

Ayrıca Van Doorne ve Westerweel [5] stereoskopik-PIV (SPIV) cihazına yönelik laminer, geçiş ve türbülans boru akışı için deneysel bir çalışma yapmışlardır. SPIV cihazı boru akışlarında borunun tüm dairesel kesiti üzerinden üç boyutlu anlık hız alanını ölçebilen bir cihazdır. Bu çalışma, cihazın hız ölçümlerindeki hatalarını belirlemek ve geçişsel akışlar için uygunluğunu test etmek için yapılmıştır. Tam gelişmiş laminar ve türbülanslı boru akış ölçümleri DNS verileriyle karşılaştırılmış ve iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Çalışmalarında 5300 Reynolds sayılı boru akışında türbülans hız profilini ölçmüşlerdir. Bu nedenle bu Reynolds sayılı akış paralelinde yapılan sayısal çalışma ile bulunan sayısal hız profilleri bu deney hız profilleriyle karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan boru geometrisi, akış şartları ve akışkan özellikleri ise Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17. Van Doorne ve Westerweel'in [5] deney çalışmasında kullanılan boru geometrisi, akış şartları ve akışkan özellikleri

Re = 5300		
Ortalama akış hızı	: U (m/s)	0.113 m/s
Sürtünme hızı	: u^* (m/s)	9 mm/s
Boru çapı	: D	40 mm
Dinamik viskozite	: μ	0.00085 Pa.s
Akışkan yoğunluğu	: ρ_{su}	996 kg/m ³
Pürüzlülük yüksekliği	: ε	0.009 mm
Giriş türbülans yoğunluğu	: I	%5 (orta yoğunluklu türbülans)

Sayısal çalışmalardan çıkarılan boyutsuz hız profilleri her iki deney hız profilleriyle Şekil 5.35'te karşılaştırılmıştır.



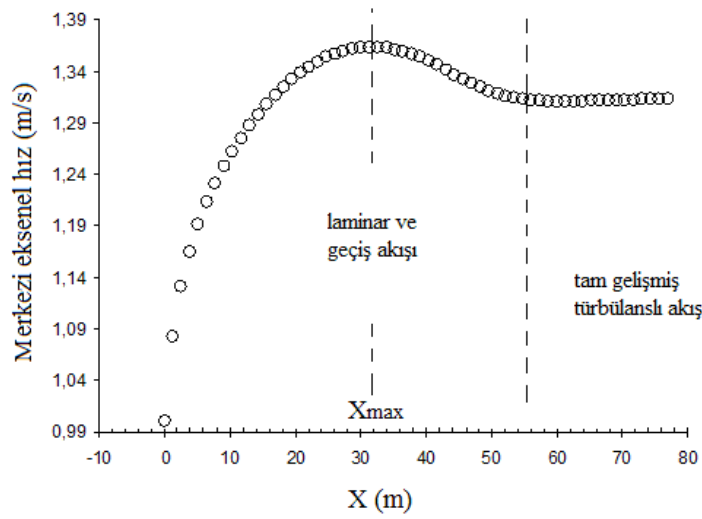
Şekil 5.35. Üç farklı Reynolds sayılı akışta sayısal boyutsuz hız profillerinin Taishi vd. [34] ve Van Doorne ve Westerweel'in [5] deneysel hız profilleriyle karşılaştırılması (a-c)

Şekil 5.35 görüldüğü gibi her üç Reynolds sayılı akışta sayısal hız profilleri deneysel hız profilleriyle iyi uyum göstermişlerdir. 8000 ve 20000 Reynolds sayılı şekil-lerde, sayısal değerler ve logaritmik yasa Taishi vd.'nin [34] deneysel çalışması ile karşılaştırılmıştır. Bu iki şekilde sayısal değerler logaritmik yasaya göre deney değerleriyle daha iyi uyum sağlamıştır. 5300 Reynolds sayılı şekilde ise sayısal değerler ve

logaritmik yasa her iki deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde sayısal değerler logaritmik yasaya göre her iki deney değerleriyle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Her üç Reynolds sayılı akışta sayısal değerler deney değerlerinden ortalama olarak %2'yi aşmayan sapma göstermişlerdir. Burada deneysel bağıntılar dışında diğer deney çalışmalarının da sayısal çalışmayı desteklediği görülmüştür.

5.9. Eksenel Hız Profiline Sayısal Analizi

Sayısal çalışmalardan çıkarılan eksenel hız profilleri burada analiz edilmiştir. Merkezi eksenel hız, gelişen sınır tabaka etkisiyle azalan debiyi karşılamak için boru girişinden tam gelişmiş akışa kadar ivmeli bir hız artışı göstermektedir. Merkezi eksenel hızın sayısal çalışmadaki durumu ise Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.36. 4572 Reynolds sayılı sayısal alüminyum boru akışında merkezi eksenel hız değişimi

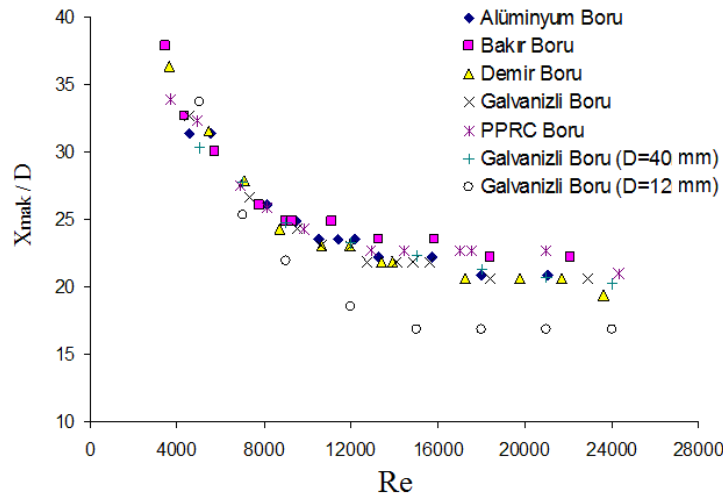
Şekil 5.36'da görüldüğü gibi eksenel hız boru girişinden itibaren artmaya başlamış ve maksimum bir hıza ulaştıktan sonra tam gelişmiş türbülans değerine doğru azalmaya başlamıştır. Eksenel hız değişiminden türbülansa geçiş mesafesi belirlenebilirken laminardan türbülansa kritik geçiş mesafesi ise belirlenememektedir. Çoğu deneysel çalışmalarda eksenel hız değerlerinin, genelde, 30-40 çap mesafesi aralığında maksimum oldukları görülmüştür [7].

Yapılan sayısal çalışmalarda, merkezi eksenel hızların maksimum oldukları boyutsuz çap mesafeleri (X_{mak}/D) Tablo 5.18'de gösterilmiştir.

Tablo 5.18. Merkezi eksenel hızın maksimum olduğu boyutsuz X_{mak}/D değerleri

	Alüminyum Boru											
	4572	5539	8152	9496	10539	11371	12172	13295	15712	18004	21043	
X_{mak}/D	31.29	31.29	26.08	24.77	23.47	23.47	23.47	22.16	22.16	20.86	20.86	
	Bakır Boru											
	3443	4326	5738	7785	9002	9282	11079	13295	15856	18387	22084	
X_{mak}/D	37.81	32.59	29.99	26.08	24.77	24.77	24.77	23.47	23.47	22.16	22.16	
	Demir Boru											
	3609	5422	7101	8722	10643	11906	13374	13907	17257	19733	21688	
X_{mak}/D	36.32	31.48	27.85	24.21	23.00	23.00	21.79	21.79	20.58	20.58	20.58	
	Galvanizli Boru											
	2907	4559	7295	9553	10643	11977	12738	14078	14861	15582	18439	
X_{mak}/D	67.80	32.69	26.63	24.21	23.00	23.00	21.79	21.79	21.79	21.79	20.58	
	PPRC Boru											
	3691	4921	6890	8120	9842	12890	14458	16983	17540	20979	24317	
X_{mak}/D	33.90	32.28	27.44	25.83	24.21	22.60	22.60	22.60	22.60	22.60	20.98	
	Galvanizli Boru (D = 40 mm)											
	5000	7000	9000	12000	15000	18000	21000	24000				
X_{mak}/D	30.30	27.78	24.75	23.23	22.22	21.21	20.71	20.20				
	Galvanizli Boru (D = 12 mm)											
	3000	5000	7000	9000	12000	15000	18000	21000	24000			
X_{mak}/D	43.77	33.67	25.25	21.89	18.52	16.84	16.84	16.84	16.84			

Tablo 5.18'de verilen X_{mak}/D değerlerinin şekil üzerindeki gösterimi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Maksimum eksenel hız için X_{mak}/D değerlerinin Re 'ye göre değişimi

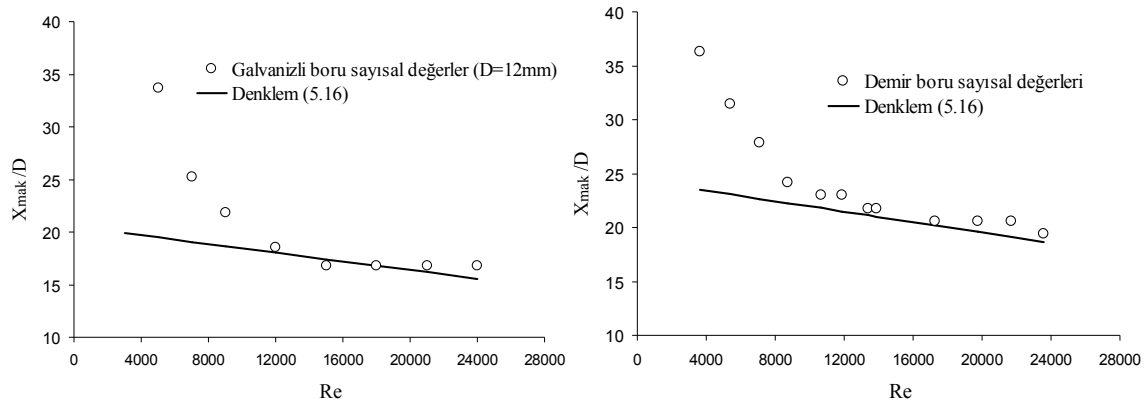
Şekil 5.37'de görüldüğü gibi X_{mak}/D değerleri 10000 Reynolds sayısına kadar hızlı bir düşüş göstermiş ve bu Reynolds sayısından itibaren eğimi düşük olan doğrusal bir düşüşe

geçmiştir. 10000 Reynolds sayısından itibaren ki doğrusal düşüşler için yapılan eğri uydurma çalışmaları sonucunda aşağıdaki sayısal bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{X_{mak}}{D} = \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (28 - 0.00028 Re) \quad Re > 10000 \quad (5.16)$$

Bu bağıntıda boyutsuz çap mesafesi boru çapı, pürüzlülük ve Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyon olmuştur. Bu bağıntıda çap ve pürüzlülük sadece bir katsayıdır ve "m" birimindeki değerleri bağıntıda yazılmalıdır. Bu bağıntı ile bulunan değerler sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3.5$ sapma göstermiştir.

Demir boru ve galvanizli borunun sayısal X_{mak}/D değerlerinin Denklem (5.16) ile tahmin edilmiş durumları ise aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Galvanizli ve demir boru sayısal çalışmasında merkezi aksel hızın maksimum olduğu X_{mak}/D değerlerinin Denklem (5.16) ile tahmin edilmesi

5.11. Sonuç

Deneysel çalışması yapılmış olan beş boru türü için deney paralelinde sayısal çalışma yapılmıştır. Bu sayısal çalışma Ansys CFX akış çözücü programı ile gerçekleştirilmiştir. LES ve DNS yöntemlerindeki çok yüksek olan hesaplama maliyetleri türbülans boru akışlarının çözümünde RANS yöntemi tercih ettirmiştir. RANS yöntemde, türbülans akış çalkantıları modellenerek çözülür ve bu nedenle bilgisayar işleme zamanı diğer iki yönteme göre çok daha düşük olmaktadır. Gelişen boru akışlarının çözümü için RANS türbülans modellerinden SST modeli uygun görülmüştür. SST ile birlikte "Gamma Theta Model" seçeneği gelişen boru akışlarının çözümünde kullanılmıştır. Gamma Theta modeli

deneysel bağıntılardan yararlanarak laminardan türbülansa geçiş akışlarını oluşturan bir modeldir.

Yapılan sayısal çalışmalar 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarını kapsamaktadır. Sayısal çalışmada her beş boru türü için elde edilen basınç düşüş değerleri bu boruların deneysel basınç düşüş değerleriyle karşılaştırılmış ve çok iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Sayısal çalışma yapılmasındaki amaç duvar kayma gerilmesi, kritik ve geçiş mesafeler ve eksenel hızın maksimum olduğu akış mesafesini sayısal olarak analiz etmek ve sonucunda sayısal bağıntılar türetmeye çalışmaktır. Bu sayısal çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Sayısal çalışmalardan çıkarılan duvar kayma gerilmesi gelişen akıştaki parabolik değişimden sonra tam gelişmiş akış şartlarında sabit değerlere ulaştığı görülmüştür. Tüm boru çalışmaları için duvar kayma gerilmesi analiz edilmiş ve sonucunda duvar kayma gerilmesindeki parabolik değişimin aşağıdaki sayısal bağıntı ile ifade edilebildiği görülmüştür.

$$\tau_{(x)} = a x^2 + b x^{-7/20} \quad (5.17)$$

Burada a ve b denklem katsayılarıdır. Değerlerinin ise Reynolds sayısına ve bağlı pürüzlülüğe bağlı olarak değiştikleri görülmüştür. Yapılan eğri uydurma çalışmaları ile b katsayısının aşağıdaki bağıntıyla tahmin edilebildiği görülmüştür.

$$b = \frac{8665 \cdot 10^{-13}}{D^{1.813}} [0.00134 \text{ Re}^2 + 10.42 \text{ Re} + 1005.4] \quad (5.18)$$

Bu bağıntıda bulunan D boru çapıdır ve bağıntıda "m" birimindeki değerleri kullanılmalıdır. Bu bağıntı ile bulunan b katsayı değerleri sayısal b değerlerinden ortalama olarak $\pm\%10$ sapma göstermiştir. a katsayısı ise denklem (5.17)'nin minimum noktası için türevinin alınmasıyla aşağıdaki bağıntıyla sonuçlanmaktadır.

$$a = 0.175 \frac{b}{X_{kr}^{2.35}} \quad (5.19)$$

Bu bağıntıda a katsayısının laminardan türbülansa geçişteki X_{kr} mesafesine bağlı olduğu görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda bağıl pürüzlülük değeri aynı olan boruların boyutsuz X_{kr}/D değerlerinin aynı oldukları görülmüştür. Farklı bağıl pürüzlülüğe sahip borularla yapılacak kapsamlı sayısal çalışmalar sonucunda X_{kr} değerleri bulunup tablo haline getirilebilir ve bu tablolardan a katsayılarının tahmin edilebileceği öngörülmektedir.

Yapılan hata analizlerinde, uygun a ve b değerlerinin kullanılması ile bulunan denklem (5.17) değerleri, sayısal değerlerden maksimum $\pm\%10$ ve genel ortalama olarak $\pm\%2$ sapma göstermiştir.

Sayısal duvar kayma gerilmesindeki değişimden yararlanarak türbülansa başlama kritik mesafesi (X_{kr}) ile tam gelişmiş türbülansa geçiş mesafesi ($X_{gç}$) sayısal çalışmalardan çıkarılmış ve tablo haline getirilmiştir. Bu tablolardan iki mesafenin Reynolds ile olan değişimleri incelenmiş ve sonucunda bu iki mesafenin aşağıdaki sayısal bağıntılarla ifade edilebildikleri görülmüştür.

$$\frac{X_{kr}}{D} = 297.3 \left[(\text{Re} - 2000)^{-1.18} - 9230.5 \text{Re}^{-2.2} \right] \quad 4000 < \text{Re} < 25000 \quad (5.23)$$

$$\frac{X_{gç}}{D} = 35 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} \quad 10000 < \text{Re} < 25000 \quad (5.24)$$

$$\frac{X_{gç}}{D} = 0.546 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (118.5 - 0.0053 \text{Re}) \quad \text{Re} < 10000 \quad (5.25)$$

Bu bağıntıların sağ tarafında bulunan D ve ε , sırasıyla, çap ve pürüzlülüktür. Bağıntılarda "m" birimindeki değerleri yazılmalıdır. Yukarıda verilen sayısal bağıntılardan ilki sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3$, ikinci bağıntı ise sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3$ ve son bağıntı ise sayısal değerlerden maksimum $\pm\%20$ ve genel ortalama olarak $\pm\%8$ sapma göstermişlerdir.

Sayısal çalışmadan çıkarılan merkezi eksenel hızların akış boyunca değişimleri incelenmiş ve maksimum oldukları akış mesafeleri ölçülmüştür. Bu mesafelerin Reynolds sayısı ile değişimleri incelenmiş ve sonucunda 10000'den büyük Reynolds sayılarında aşağıdaki sayısal bağıntıyla tahmin edilebildikleri görülmüştür.

$$\frac{X_{mak}}{D} = \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (28 - 0.00028 Re) \quad Re > 10000 \quad (5.26)$$

Bu sayısal bağıntı ile bulunan boyutsuz çap değerleri sayısal değerlerden genel ortalama olarak $\pm\%3.55$ ve maksimum olarak da $\pm\%8$ sapma göstermiştir.

Bu sayısal çalışmadan çıkarılan sonuçlar, deneysel bağıntılarla ve literatürde bulunan başka deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sayısal boyutsuz hız dağılımı çeper yasasıyla, logaritmik yasayla, tampon tabaka için logaritmik yasayla, Taishi vd.'nin [34] ve Van Doorne ve Westerweel'in [5] deneysel hız profilleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yapılan bu sayısal çalışmanın deneysel çalışmalarla iyi uyum sağladığı görülmüştür.

6. BÜYÜK EDDY SİMULASYONU İLE SAYISAL ÇÖZÜM

6.1 Giriş

DNS ile çözümün imkansızlığı ve RANS türbülans modellerinin çözümlerindeki yetersizlikler başka çözüm yöntemlerinin araştırılmasına zemin hazırlamıştır. Bu nedenle DNS ile RANS çözüm yöntemlerini bir arada kullanabilen LES hibrid çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu çözüm yönteminin oluşmasındaki en büyük etken belirli bir boyutun altındaki türbülans çalkantılarının akış alanında izotropik bir dağılıma ve davranışa sahip olmasıdır. Çünkü akış alanında izotropik davranış gösteren çalkantılar modellenerek çözüldüğünde doğru sonuç verme ihtimalleri çok daha yüksek olmaktadır. LES çözümde, ağ boyutundan küçük çalkantılar RANS çözümde olduğu gibi modellenir ve ağ boyutundan büyük çalkantılar ise DNS çözümde olduğu gibi birebir çözülür. Bu nedenle LES çözümlerde, ağ boyutu izotropik dağılıma sahip çalkantıların boyutuna kadar küçültülmesi gerekli olmaktadır. LES çözümün gerçek akış şartlarına yaklaşması ağ boyutunun küçültülmesiyle artmaktadır [18]. Eğer ağ boyutu kolmogorov ölçeğine kadar küçültülürse akış alanındaki tüm çalkantılar çözüleceğinden DNS çözümü elde edilir. Eğer ağ boyutu büyük seçilirse çalkantıların çoğu modellenmiş olur bu oranda da gerçek akış şartlarından uzaklaşmış olur.

DNS ile çözümleri imkansız olan yüksek Reynolds sayılı kompleks akışlar, LES ile çözülebilecek imkanı sağlamıştır. Yüksek Reynolds sayılı akışlarda en küçük çalkantı ile en büyük çalkantılar arasındaki ölçek aralığı geniş olmaktadır. Ağdan küçük çalkantıların modellenmesi halinde ağdan büyük hala çözülmesi gereken çok sayıda çalkantı kalmaktadır. Bu nedenle zaman yönünden yüksek Reynolds sayılarında LES simülasyon masrafları da çok büyük olmaktadır. Bu nedenle LES yöntemi ticari alanda tercih edilmemesine rağmen bilimsel araştırmalarda kullanımı daha çok yaygın olmuştur.

Türbülanslı akışların sayısal çözümlerinde gerçek akış koşullarını yaratabilme dereceleri DNS, LES, RANS sırasında azalma göstermektedir. DNS deneysel gerçeklikte akış oluştururken LES ve RANS akış probleminin doğasına göre gerçek akış şartlarını yakalayabilmeleri değişebilmektedir. RANS çözümün yetersiz olduğu veya akış içerisindeki çalkantıların çözülmesinin istendiği akış türlerinde LES çözüm tercih edilir. LES metodun zaman yönünden yüksek maliyetli olması RANS metodunun yaygın olarak

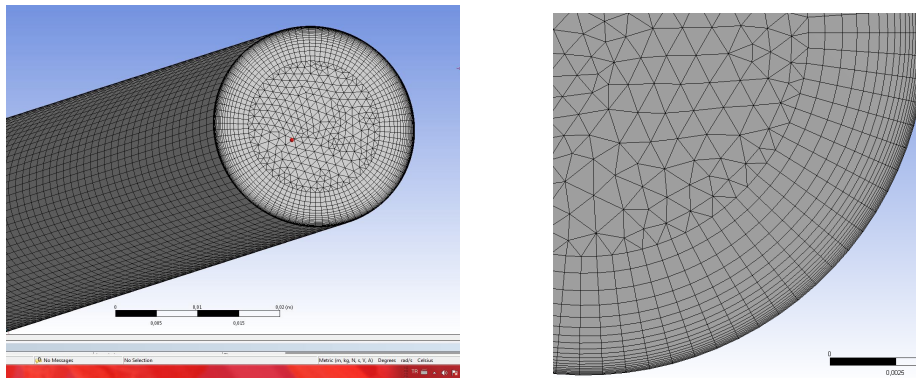
kullanılmasına neden olmuştur. Çünkü yapılan pek çok uygulamayla RANS türbülans modellerin doğrulukları yüksek derecede çıkmıştır.

Bu bölümde boru akışları LES yöntemi ile çözülmüştür. LES modeli, CFX ve FLUENT akış çözücü programlarda türbülans modelleri arasında yer almaktadır. CFX ve FLUENT programlarında bulunan LES türbülans modeli yeterince geliştirilememiş ve hala eksiklikler mevcuttur. Örneğin CFX programındaki LES modelin kullanılması halinde giriş türbülans yoğunluğu girilememekte bunun yerine akış girişine türbülans yaratıcı elemanların yerleştirilmesi önerilmektedir. FLUENT programında ise LES model kullanımında ise sadece pürüzsüz boru akışlarına imkan tanınmıştır. Bu bölümde LES çözümün yapılmasının nedeni boru akışındaki çalkantıları görselleştirmek ve LES sonuçları RANS çözüm ve deneysel değerlerle karşılaştırmaktır.

LES yönteminde boru akışları üç boyutlu çözülür. Çünkü ağdan büyük çözülen çalkantılar akış simetrilğine sahip değildir. Burada LES çözüm için FLUENT programı tercih edilmiştir. FLUENT programının tercih edilmesinin nedeni ise boru giriş türbülans değerinin girilebilmesidir. LES çözüm için oluşturulan boru geometrisi ve ağ yapısı ise aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

6.2 Boru Geometrisi ve Ağ Yapısı

LES modelin zaman maliyetinin yüksek olması ve yüksek bilgisayar hafızası gerektirmesi, uzunluğu 1.3 m olan kısa bir boru akış geometrisi oluşturulmasına neden olmuştur. Bu boru boyu tam gelişmiş akış şartlarının oluşması için yeterli görülmüştür. Akış geometrisinde oluşturulan ağın yapısı ise Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Akış geometrisini oluşturan ağın yapısı

Akış geometrisinde oluşturulan ağ, boru merkezine yakın bölgede yüzeysel üçgen elemanlardan (tetrahedron) ve boru cidarına yakın ise inflasyon katmanlarından oluşturulmuştur. Boyutsuz duvar mesafesi $y^+ < 1$ olması için boru cidarına bitişik olan ilk inflasyon katman kalınlığı 2.5×10^{-5} m olarak seçilmiştir. Daha sonra gelen inflasyon katman kalınlığı ise 1.2 oranında artırılmıştır. Yüzeysel üçgen elemanların maksimum ve minimum boyutları ise sırasıyla 0.9 mm ve 0.6 mm seçilmiştir. Boru uzunluğu "sweep" metoduyla 2.5 mm'lik kalınlığındaki elemanlara bölünmüştür. Bu ağ oluşturma işlemlerinin oluşturulduğu detay pencereleri ise Şekil 6.2' de resmedilmiştir.

Details of "Mesh"	
Defaults	
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	6,e-004 m
Max Face Size	9,e-004 m
Max Tet Size	Default (0,129650 m)
Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	8,1681e-002 m

(a)

Details of "Sweep Method" - Method	
Scope	
Definition	
Suppressed	No
Method	Sweep
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Manual Source
Source	1 Face
Target	Program Controlled
Free Face Mesh Type	All Tri
Type	Element Size
Sweep Element Size	2,5e-003 m
Sweep Bias Type	No Bias
Element Option	Solid

(b)

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Boundary	1 Edge
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	2,5e-005 m
Maximum Layers	20
Growth Rate	1,2

(c)

Şekil 6.2. Ağ oluşturmak için ağ detayları, sweep metod ve inflasyon detayları (a-c)

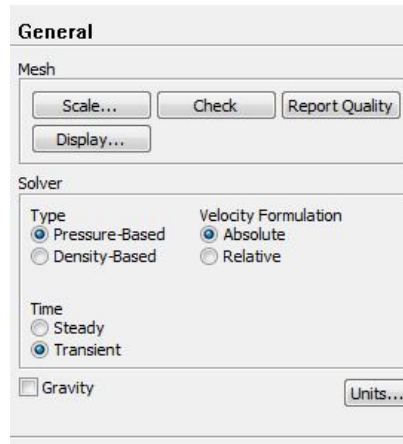
Boru akış geometrisinde oluşturulan ağ, akış yönlü ve açısal yönlü boyutsuz mesafeler, sırasıyla, $z^+ = 150$ ve $x^+ = 40$ olacak şekilde yapılandırılmıştır. Türbülanslı boru akışlarının LES ile çözümünde boyutsuz duvar, akış yönlü ve açısal yönlü mesafelerin, sırasıyla, $y^+ < 1$, $x^+ = 15-40$ ve $z^+ = 50-150$ değerleri arasından seçilebilecekleri önerilmiştir [38]. Boru akış geometrisinde oluşturulan ağın toplam düğüm nokta sayısı 1122234 ve eleman sayısı ise 1245400 kadar olmuştur.

"Mesh Statistics" seçeneği altında ağ elemanlarının kalite durumları gözden geçirilmiştir. Bu ağ elemanların çarpıklığının bir göstergesi olan "skewness" değerleri ortalama

olarak 0.06 ve maksimum olarak 0.5 değeri olmuştur. Skewness değerlerine göre ağ elemanlarının çarpıklığı çok azdır. Bu yönden eleman kalitesi iyidir. Uzun kenarın kısa kenara oranı olarak bilinen ve eleman kalitesini belirleyen "aspect ratio" değeri ise maksimum 100 ve ortalama olarak 26 değerlerinde olduğu görülmüştür. "Aspect ratio" değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni duvara yakın inflasyon katmanlarından dolayıdır. Çözücü program inflasyon katmanlarında bu durumu tolere edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle geometride oluşturulan ağın kalitesi iyi olmuştur.

6.3 Sınır Şartları ve Fiziksel Koşulların Atanması

Sınır şartları girilmeden önce akışın genel durumu "general" başlığı altında belirtilir. LES çözümlerde akış zamana bağlı olarak çözüldüğünden daimi olmayan akışlar için "transient" seçeneği seçilir. RANS türbülans modellerinde ise akış çalkantıları zamana bağlı çözülmediğinden ve modellenliğinden akış daimidir ve "steady" seçeneği seçilmiştir. FLUENT 'te akış türü basınç temelli (pressure based) ve yoğunluk temelli (density based) olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Yüksek hızlı sıkıştırılabilir akışlar için "density based" ve sıkıştırılamaz akışlar için de "pressure-based" seçeneği önerilmektedir [1]. Boru akışı sıkıştırılamaz akış olduğundan "pressure-based" seçeneği seçilmiştir. Bu durumun detaylı penceresi ise aşağıda resmedilmiştir.

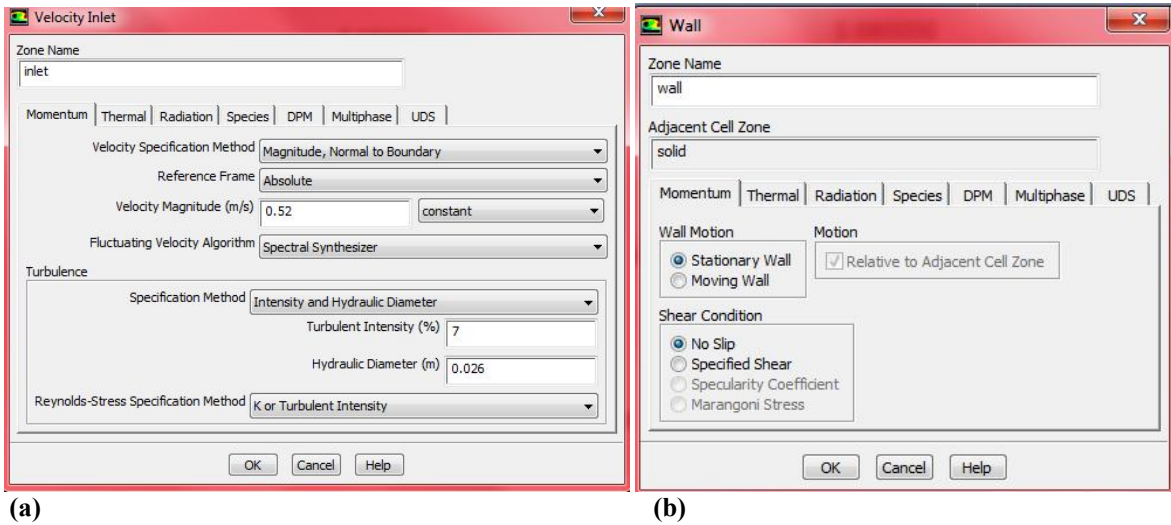


Şekil 6.3. akışın genel durumunu gösterir pencere

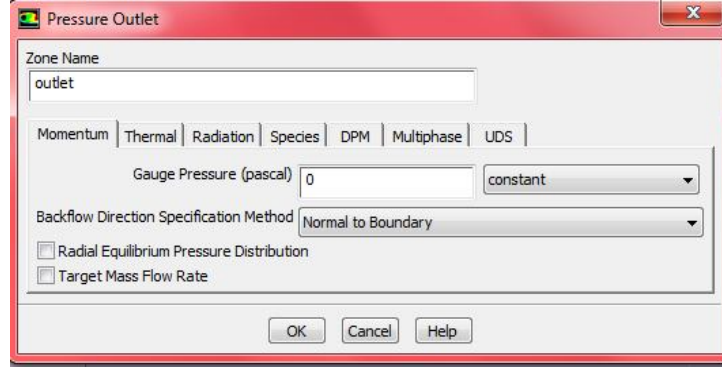
"Modeller" seçeneğinde açılan pencerede LES türbülans modeli seçilmiştir. LES modelinde dört farklı SGS modeli önerilmektedir. Bunlar Smagorinsky-Lilly model,

dinamik Smagorinsky-Lilly model, WALE model ve dinamik kinetic energy subgrid-scale modelleridir. Smagorinsky-Lilly modeli ilk çıkan modeldir. Bu model SGS türbülans viskozitesini tüm akış alanı için sabit bir katsayı ile modellemektedir. Dinamik Smagorinsky-Lilly model'inde ise Smagorinsky-Lilly modelindeki eksiklikleri gidermek amacıyla çıkarılmış bir başka modeldir farkı ise birinci filtrenin iki katı büyüklüğünde ikinci bir filtre kullanmasıdır ve Smagorinsky katsayısını akış durumuna göre değiştirir. Bu modelin çözümleri daha fazla zaman almaktadır. WALE modeli ise laminardan türbülansa geçiş akışları için oluşturulan bir modeldir. Bu model laminar kısımda SGS modelini iptal eder çalışmaz. Dinamik kinetic energy subgrid-scale modeli ise SGS türbülans viskozitesini enerji transferinden giderek modeller. Gelişen boru akışlarının çözümü için WALE modelinin uygun olduğu görülmüştür.

Sınır şartları kısmında sınır şartları belirtilir. Bunlar giriş, çıkış ve duvar olmak üzere üç sınır şartıdır. Giriş sınır şartında akış düzgün hız profilinde ve %7 türbülans yoğunluğu ile akış alanına girmektedir. Boru girişinde türbülans çalkantılarının oluşmasını sağlayan çalkantı hız algoritma seçeneği vardır. Bu seçenekte "no perturbation" seçildiğinde çalkantılar oluşmaz, "spectral synthesizer" veya "vortex method" seçildiğinde ise çalkantılar oluşturulur. Son iki algoritma birbirine benzerdir ve bunlardan herhangi biri seçilebilir. Burada "vortex method" seçilmiştir. Çıkış sınır şartında ise akışkan, sıfır etkin basınç değeri ile akış alanından çıkmaktadır. Duvar sınır şartında, LES modeli kullanıldığı için, pürüzsüz duvar seçeneği geçerli durumdadır. Bu üç sınır şartının detay pencereleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. sonraki sayfada devam ediyor.



(c)

Şekil 6.4. Akış oluşmasını sağlayan sınır şartı detayları; giriş, duvar ve çıkış (a-c)

Çözüm metodunda (solution method) ise çözücü algoritmaları seçilir. Bunlar SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled ve FSM olmak üzere beş ayrı çözücü algoritmasıdır. SIMPLE ve SIMPLEC genellikle daimi akışlar için kullanılır. PISO ise daha çok büyük zaman adımlarının kullanıldığı akışlar için önerilmektedir. PISO ayrıca yüksek çarpıklığa sahip ağlarda daimi ve daimi olmayan akışlar için kullanışlı olabilmektedir. Coupled algoritması ise diğer dört algorithmadan farklı olarak tüm denklemleri (basınç ve hız denklemleri) birbirine bağlı olarak çözer. Bu nedenle daimi durumlu akışlarda diğer algoritmalarla göre daha sağlam ve daha verimli çözümler sağlar. FSM algoritması ise NITA seçeneği seçildiğinde kullanılabilir.

Bu çalışmada türbülanslı boru akışı zamana bağlı olduğundan PISO algoritması seçilmiştir. PISO algoritmasında "neighbour correction" ve "skewness correction" seçenekleri vardır. "Neighbour correction" zamana bağlı tüm akışlar için, özellikle yüksek zaman adımları kullanılıyorsa, yüksekçe, önerilmektedir. Eğer çok küçük zaman adımları kullanılmak zorundaysa PISO çözüm çok zaman harcadığından bunun yerine SIMPLE veya SIMPLEC algoritmaları tercih edilebilir. "Skewness Correction" seçeneği ise yüksek derecede çarpıklığa sahip ağlar için hem daimi ve hem de daimi olmayan akışlar için tercih edilmektedir. Neighbour correction seçeneği tek başına seçilirse "under relaxation factors" adı altındaki tüm denklemler bir veya bire yakın seçilmelidir. Eğer "Skewness correction" tek başına seçilmişse "under relaxation factors" altındaki basınç ve momentum değerlerinin toplamı 1 olacak şekilde girilmelidir. Eğer her ikisi beraber seçilirse Neighbour correction gibi denklem değerleri düzenlenir. Boyutsal ayrıklaştırma seçeneğinde ise momentum denklemi için merkezi farklandırma (bounded central differencing) önerilmekte ve basınç denklemi içinse geçerli durum olarak "standart" seçeneği seçilir. Zaman adımı formülasyonunda ise çözüm doğruluğunu hassaslaştırmak için "ikinci dereceden kapalı" (second

order implicit) seçim yapılır. LES seçeneği seçildiğinde tüm bu seçenekler geçerli durum olarak oluşturulur.

Monitor seçeneğinde ise çözüm esnasında akış değişkenlerin herhangi bir konumdaki zamana bağlı durumları izlenebilir. Çözüm başlatma (run calculation) penceresinde ise zaman adımı ve sayısı girilir. Zaman adımı, zamana bağlı en küçük türbülans ölçeklerin çözülmesini sağlayacak şekilde yeterince küçük seçilmelidir. DNS ve LES için gerekli olan zaman adımı iki sınırlama ile yapılır. İlki viskoz sınırlamadır. Uygun bir zaman adımı aşağıda verilen formülasyonla tahmin edilebilmektedir.

$$C = \frac{\Delta t u}{\Delta x} \quad (6.1)$$

burada Δx ağ eleman boyutudur, u akış hızı, Δt zaman adımı ve C ise "courant" sayısıdır. "Courant" sayısı bir zaman adımında akışkanın geçtiği ağ eleman sayısını göstermektedir. 2-10 arasındaki tipik değerleri tercih edilmektedir. İkinci sınırlamada ise zaman adımının, en küçük türbülans ölçeğinin $t = \frac{\Delta x}{U}$ ile verilen zaman ölçüsünden daha küçük olması gerektiğidir. U ortalama akış hızıdır. Seçilen zaman adımında işlemler bir veya bir kaç iterasyon sayısı ile yapılır. İterasyon sayısı ise, bir zaman adımında gerçekleşen işlemlerin yakınsamasında kullanılır. Girilen iterasyon sayısı ile bir zaman adımı sonunda çözümün yakınsadığından emin olunmalıdır. Zaman adımı büyük olan akışlarda iterasyon sayısı çözümün doğruluk derecesini artırır. Bir zaman adımı için gerekli iterasyon sayısı ise genelde 3-5 arasında tercih edilebilir [1]. Daha karmaşık durumlar için bu sayı artırılabilir. Bazı durumlarda iterasyon sayısı artırmak yerine zaman adımının küçültmek yakınsamayı daha iyi yapmaktadır.

Yapılan sayısal çalışmalarda genelde zaman adımı $\Delta t = 0.001$ s ve altındaki değerlerde seçilmiştir. Bu zaman adımı, ağ eleman boyutundan büyük ve küçük çalkantıları çözmek için yeterli bir zaman adımı olduğu hesaplanmıştır. Zaman adımı çok küçük olduğundan iterasyon sayısı 2 olarak girilmiştir. Zaman adımı ve iterasyon sayısı girildikten sonra toplam zaman adım sayısı girilir. LES ile çözülen akışlarda, 5000-7000 arasındaki zaman adımlarından sonra çözümün sabit değişmez değerlere yakınsadığı görülmüştür. Bu zaman adımlarından sonra veya değişmez istatistiki değerlere ulaşıldıktan sonra akış değişkenlerinin (basınç ve hız gibi) istatistiki değerlerinin elde edilebilmesi için akışın

geometrideki geçiş zamanının ($t = L / U$) bir kaç katı kadar çözümün devam ettirilmesi gerekmektedir. Burada L boru boyudur.

FLUENT'le yapılan sayısal çalışmalarda her bir Reynolds sayılı akışın çözümü için toplam 10000-15000 arasında değişen zaman adımları kullanılmıştır. Her bir zaman adımındaki çözüm ise 40-50 saniye kadar bir bilgisayar işleme zamanını almıştır. Her bir Reynolds sayılı boru akışının çözümü ise yaklaşık olarak 150-180 saat arasında bir bilgisayar işleme zamanı almıştır. Bu sayısal çalışma intel (R) Core (TM) i7-2630 QM işlemci, 6GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip kişesal dizüştü bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir.

6.4 Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi

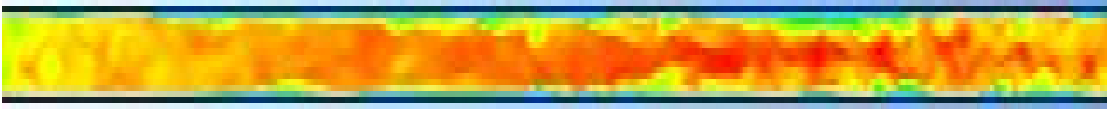
Bu kısımda 2000-20000 aralığındaki Reynolds sayılarında yapılan LES pürüzsüz boru akışlarının sonuçları değerlendirilmiştir. Türbölans LES modeli ile özölen bu sayısal çalışmalar basınç değişimi, hız gelişimi, kayma gerilmesi, sürtünme faktörü, basınç ve hız çalkantıları yönünden analiz edilmiş ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır. İlk önce sayısal boru akışındaki hız ve basınç gibi alan değişkenlerin görselleştirilmesi ve RANS özüm ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

6.4.1 Türbölanslı Akış Karakteristikleri

LES özüm ağdan büyük çalkantıları özölediğinden bunların akış alanındaki anlık durumları görselleştirilebilmektedir. Ağdan büyük özölen bu çalkantılar hız ve basınç gibi akış özelliklerinde dalgalı bir değişim yarattığından türbölanslı akışın durumu bu alan değişkenlerinin renk kontörü, vektör ve akım çizgileri şeklinde gösterilmesi ile görüntölenebilmektedir.

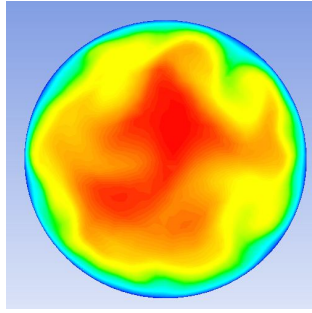
6.4.1.1 Hız Görselleştirme

Akış görselleştirme için 15856 Reynolds sayılı sayısal boru akışı örnek olarak gösterilmiştir. Boru akışında, anlık hızın merkezi eksenel akış düzlemi üzerindeki renk kontörüyle gösterilmesi şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. $x = 0-1.3$ m aralığında anlık akım yönlü hızın renk kontörleriyle gösterilmesi

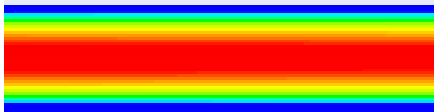
Şekil 6.5'te akış yönündeki anlık hız dağılımını göstermiştir. Şekilde kırmızı renk bölgeleri, yüksek akış hızlarını, sarı, yeşil ve maviye doğru olan renklerde ise sırasıyla düşük akış hızlarını göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi kırmızı renk bazı bölgelerde yoğun olurken bazı bölgelerde ise düşük yoğunlukta olmaktadır. Bu nedenle kırmızı rengin akış düzlemi üzerindeki dağılımı gözlemlendiğinde boru girişinden itibaren akışın gelişmeye başladığı ve çıkışa yakın ise tam gelişmiş akış şartlarına ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 6.6 ise anlık akış yönlü hızın bir en kesitteki dağılımını göstermiştir.



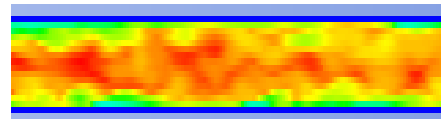
Şekil 6.6. $x=1.25$ m mesafede bulunan en kesitte anlık akım yönlü hız dağılımının renk kontörüyle gösterilmesi

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterildiği gibi LES çözümlerinde akış içerisinde oluşan çalkantılar görüntülenebilmektedir. RANS temelli çözümde ise akış çalkantıları modellenmediğinden bunların anlık dağılımları gözükmez ancak akış alanındaki genel ortalama dağılımları görülür. LES ve RANS çözümlerindeki farklılık Şekil 6.7'de anlık hız dağılımlarıyla gösterilmiştir.

RANS ile çözüm



LES ile çözüm

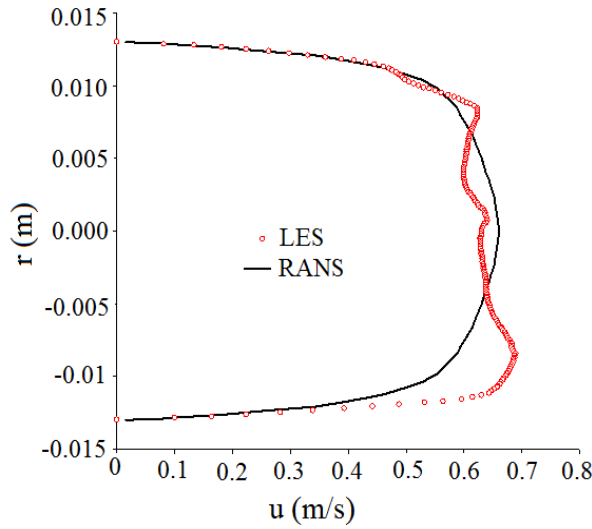


Şekil 6.7. sonraki sayfada devam ediyor



Şekil 6.7. RANS ve LES boru akışları çözümünde anlık hız dağılımları

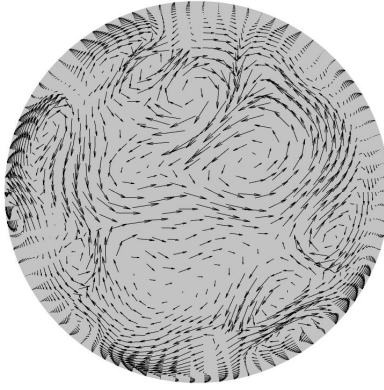
Şekil 6.7'de görüldüğü gibi RANS çözümde anlık hız dağılımı düzgün ve simetrik bir dağılıma sahipken LES çözümde ise anlık hız dağılımı karışık ve simetrik dağılıma sahip değildir. Şekil 6.8 ise her iki çözümde elde edilen anlık radyal hız profilleri gösterilmiştir.



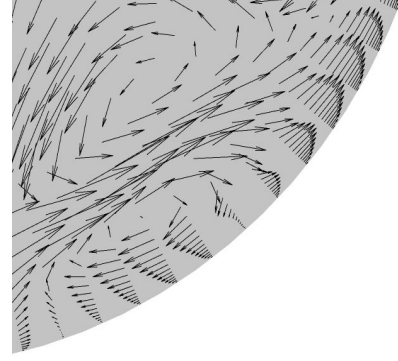
Şekil 6.8. $x=1.25\text{m}$ mesafede alınan en kesitteki anlık akım yönlü hız dağılımları

Şekil 6.8'de görüldüğü gibi RANS hız profili tam gelişmiş akış hız profilini oluştururken LES anlık hız profili ise dalgalı bir değişim göstermiştir. Ancak LES çözümünde anlık hızların istatistikleri alınırsa RANS türbülans hız profiline benzer bir profil elde edilir.

Anlık akım yönlü hızın $x = 1.25\text{ m}$ mesafede bulunan en kesit düzlemi üzerindeki teğetsel dağılımı ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



(a)

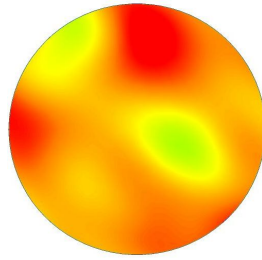


(b)

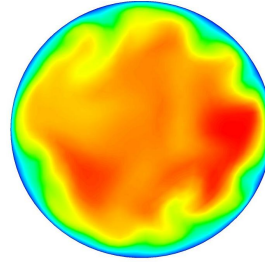
Şekil 6.9. $x = 1.25$ m mesafede bulunan en kesit üzerinde (a) anlık akım yönlü hızın vektörlerle gösterilmesi, (b) duvara yakın akım yönlü hızın vektörel dağılımı

Şekil 6.9'da gösterildiği gibi akış içerisinde girdap şeklinde dönen bölgeler görülebilmektedir. Duvara yakın hız dağılımında girdapları pek olmadığı fakat göbek kısmında ise küçük büyük girdaplar görülebilmektedir. Ayrıca duvara yakın hız dağılımı merceklenerek (b) şeklinde gösterilmiştir. Şekilde duvara yakın laminar alt tabaka hız azalması görülebilmektedir.

Boru giriş ve çıkışında anlık akım yönlü hız dağılımı Şekil 6.10'da renk kontörleriyle gösterilmiştir.



giriş



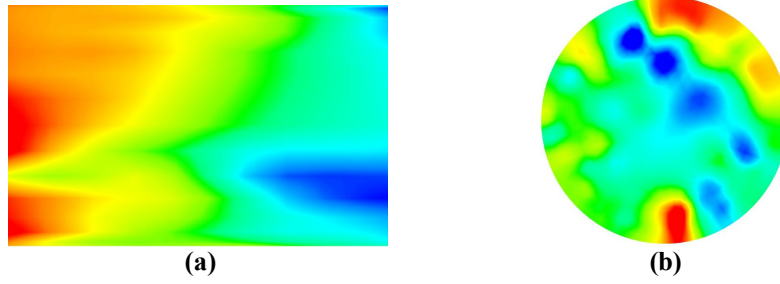
çıkış

Şekil 6.10. Boru akışının giriş ve çıkışındaki anlık akım yönlü hız kontörleri

Şekil 6.10'da girişte hız düzgün hız profilinde olmayıp hafif çalkantılı gözükmemektedir. Bunun nedeni ise girişte %7 türbülans yoğunluğunda verilen çalkantıdır.

6.4.1.2 Basınç Görselleştirme

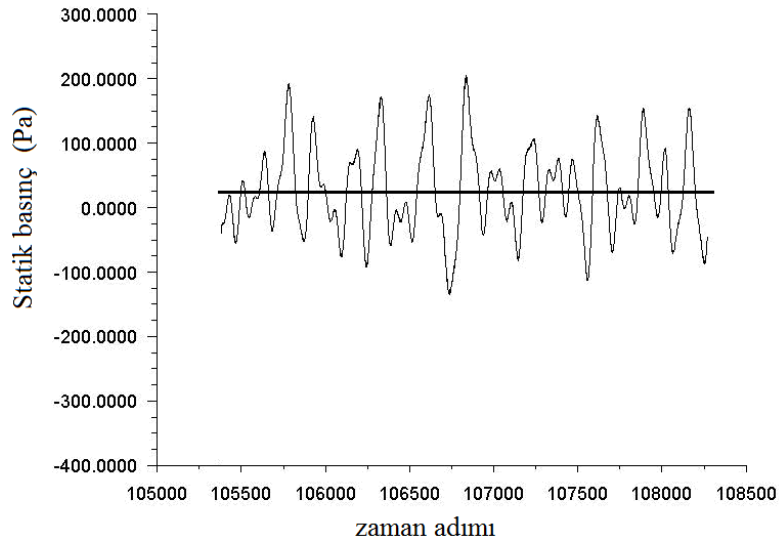
Akışkan tarafından boru iç cidarına yapılan anlık statik basınç, akışta oluşan çalkantılar nedeniyle dalgalı olacaktır. Bu durum renk kontörleri ile Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Anlık statik basınçın boru cidarındaki (a), ve akış en kesitindeki (b) dağılımının renk kontörleriyle gösterilmesi

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi boru iç cidarına yapılan anlık statik basınç dağılımı her bölgede farklı olabilmektedir. Ayrıca anlık statik basınçın en kesitteki dağılımı da her bölgede farklı olduğu görülebilmektedir.

RANS ve LES çözümlerde bir monitor noktasındaki anlık statik basınçın zamana bağlı değişimi Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

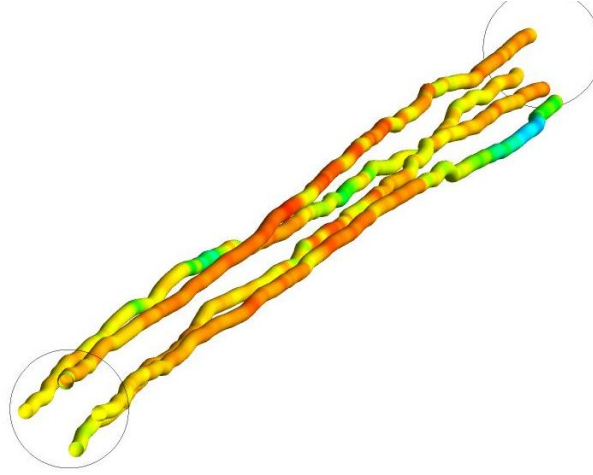


Şekil 6.12. RANS ve LES çözümünde zamana bağlı statik basınç değişimi

Şekil 6.12'de görüldüğü gibi bir noktadaki statik basınçın zamana bağlı değişimi LES çözümde dalgalı ve RANS çözümde ise belirli sabit bir değeri izlemiştir.

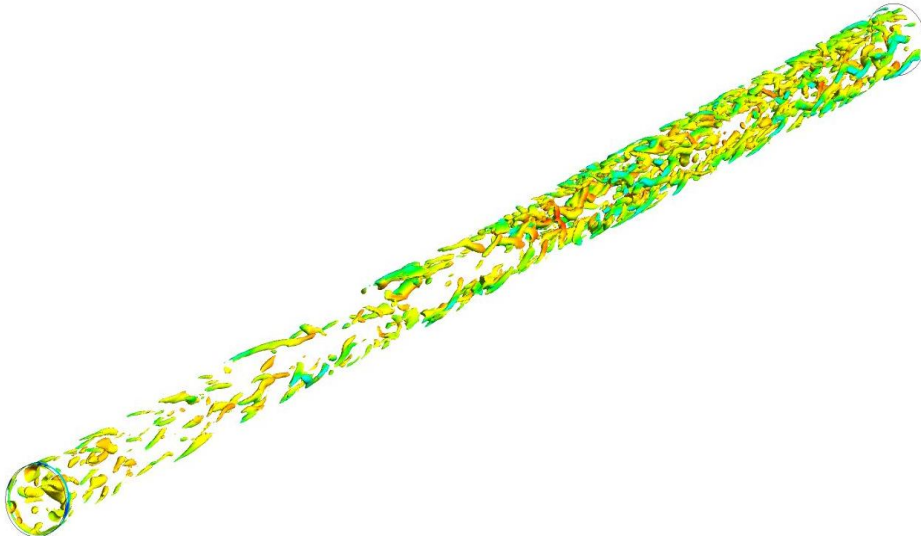
6.4.1.3 Akım çizgileri ve Akış Çalkantıları

Akım çizgileri anlık hız vektörlerine teğet çizilen eğrilerdir. Şekil 6.13'te boru girişinden çıkışına kadar dört ayrı akım çizgisi gösterilmiştir. Şekilde akım çizgileri boru giriş bölgesinde türbülans çalkantılarından dolayı izledikleri rotalar biraz dalgalı olmuş fakat akışın sonuna doğru ise tam gelişmiş akış çalkantıları, rotalarındaki dalgalanmaları daha da artırmıştır. Akım çizgileri anlık akım yönü hız dağılımı ile renklendirilmiştir.



Şekil 6.13. Akış boyunca akım çizgileri

"CFD-post" programında "vortex core region" seçeneğiyle çalkantılar görüntülenebilmektedir. Şekil 6.14 ise akış boyunca oluşan çalkantılar görüntülenmiştir.



Şekil 6.14. Akış boyunca oluşan türbülans çalkantıları

Şekil 6.14'te görüldüğü gibi gelişen akış kısmında çalkantıların az olduğu fakat gelişmiş akış kısmında ise çalkantıların çoğaldığı görülmektedir.

Buraya kadar boru akışı çeşitli sayısal akış görselleştirme yöntemleri ile görselleştirilmiştir. Bundan sonraki kısımda ise LES çözüm basınç düşüşü, hız profilleri, kayma gerilmesi ve Reynolds gerilmeleri yönünden değerlendirilmiştir. Çıkarılan sonuçlar ise RANS çözümle ve deney değerleriyle karşılaştırılmıştır.

6.4.2 Basınç Kaybı

Bu kısımda LES çözümünden elde edilen istatistiki statik basınç değerleri deney değerleriyle ve RANS çözümle karşılaştırılmıştır. LES çözümde pürüzsüz boru akışı gerçekleştirilmiştir. Beş farklı boru deneyinden bakır borunun pürüzlülüğü en düşük olmuş ve hidrolik olarak pürüzsüz kabul edilen boru tipine girmiştir. Bu nedenle tüm LES değerleri bakır boru deney değerleriyle karşılaştırılmıştır. LES ile 4000-20000 aralığında bakır deney borusu Reynolds sayılarına uygun boru akışları çözülmüştür. Karşılaştırma yapmak için bakır deney borusu Reynolds sayılarında RANS ile de pürüzsüz boru çalışması gerçekleştirilmiştir. LES, RANS ve deney boru akışlarında $x = 0.2-1.3$ m arasında hesaplanan statik basınç kayıpları Tablo 6.1'de karşılaştırılmıştır.

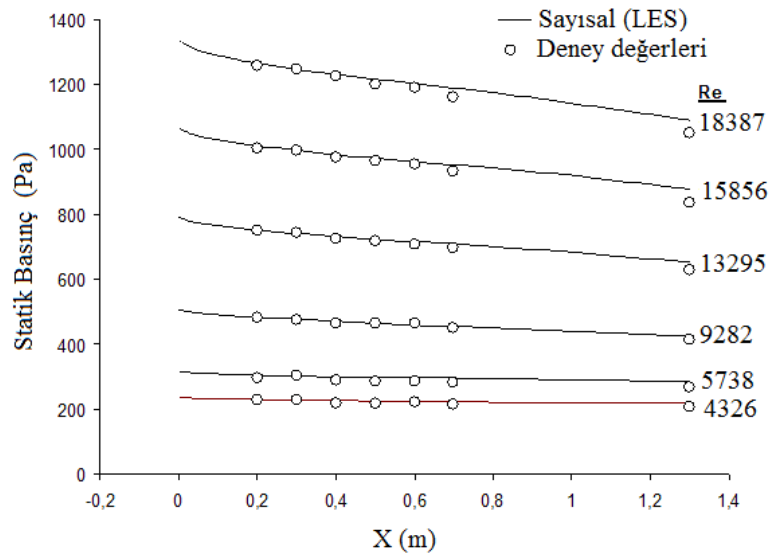
Tablo 6.1. LES, RANS ve deney boru akışlarında $x = 0.2-1.3$ m arasındaki statik basınç kayıpları

Statik Basınç Kaybı - ΔP (Pa)						
Bakır Boru (Deneysel)						
Re	4326	5738	9282	13295	15856	18387
P(0.2 m)-P(1.3 m)	20.675	27.253	66.997	122.254	168.001	208.522
LES pürüzsüz boru (sayısal)						
Re	4326	5738	9282	13295	15842	18389
P(0.2 m)-P(1.3 m)	16.997	30.301	79.836	138.018	186.328	245.226
% sapma	-17.790	11.184	19.163	12.895	10.909	17.602
RANS pürüzsüz boru (Sayısal)						
Re	4326	5738	9282	13295	15856	18387
P(0.2 m)-P(1.3 m)	13.168	25.046107	62.81012	121.08105	165.97448	216.7257
% sapma	-36.309	-8.097	-6.250	-0.959	-1.206	3.934

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi LES değerleri deneysel değerlerden daha yüksek çıkmış ve RANS değerleri ise daha düşük çıkmıştır. Yalnız sapma yüzdelerine bakıldığında LES değerlerinin deney değerlerinden sapma yüzdesi RANS çözüme göre çok daha yüksek olmuştur. 4326 Reynolds sayılı akışta RANS ve LES değerleri deney değerlerinden çok

daha düşük çıkmışlardır. Bunun sebebi ise düşük Reynolds sayılarında laminar akış mesafesi uzun olduğundan sayısal değerlendirmede 0.2-1.3 m mesafesi laminar akış bölgesi sınırları içerisindeki akış mesafesi olmuştur. Tabloda sapma yüzdelere bakıldığında ortalama olarak LES çözüm %14 ve RANS çözüm ise %3 deney değerlerinden sapma göstermiştir.

Şekil 6.15 ise değişik Reynolds sayılarında $x = 0.2-1.3$ m arasında LES sayısal çalışmasının bakır boru deney değerleriyle karşılaştırılmasını içermektedir.

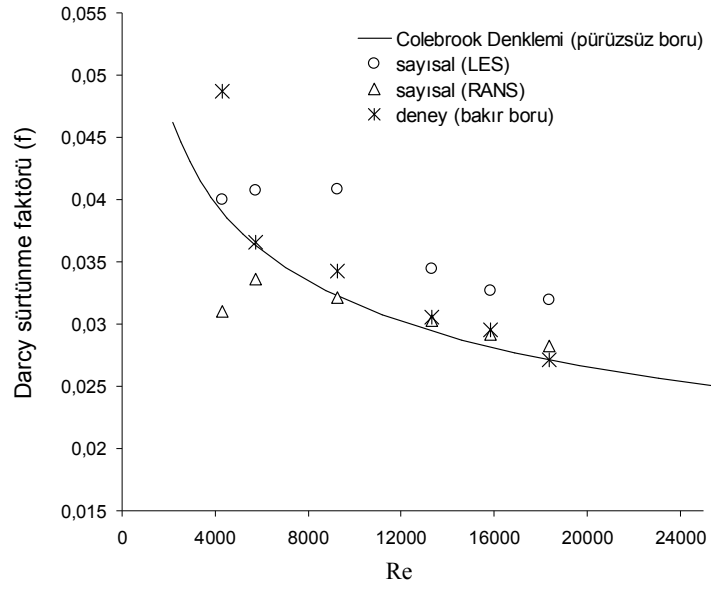


Şekil 6.15. Sayısal LES ve bakır boru deney değerlerinin statik basınç düşüşü yönünden karşılaştırılması

Şekil 6.15'te görüldüğü gibi LES sayısal değerleri deney değerleriyle uyum göstermiştir. Fakat sayısal basınç düşüşünün eğimi deney basınç düşüş eğiminden biraz daha az olmuştur. Bunun nedeni sayısal boru akışı pürüzsüz olduğundan hidrodinamik gelişme mesafesi artmakta ve bu nedenle laminar gelişme mesafesi daha uzun olmaktadır.

6.4.3 Darcy Sürtünme Faktörü

Şekil 6.16 "0.2-1.3 m" arasındaki statik basınç farkından hesaplanan sayısal LES sürtünme faktörleri Colebrook pürüzsüz boru denklemi, RANS çözüm ve bakır boru deney değerleriyle karşılaştırılmıştır.

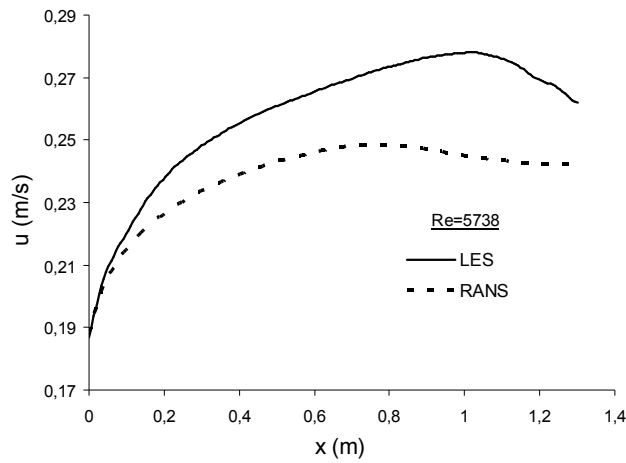


Şekil 6.16. Pürüzsüz borularda LES ve Colebrook sürtünme faktörlerinin karşılaştırılması

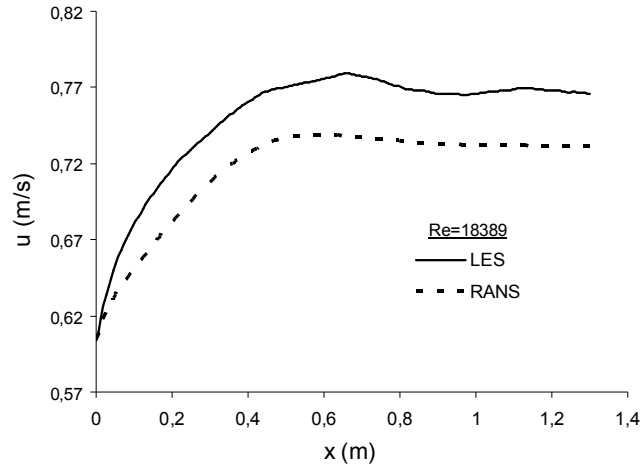
Şekil 6.16'da görüldüğü gibi LES çözüm sürtünme faktörü değerleri RANS ve deney değerlerinde göre Colebrook denklemini daha yüksek değerlerle izlemiştir. Bunun sebebi yeteri çözünürlükte bir ağ oluşturulamamış olmasıdır.

6.4.4 Hız Profilleri

Burada tam gelişmiş akış kısmından alınan hız profilleri değerlendirilmiştir. LES ve RANS çözümlerde merkezi aksenal hız gelişimi Şekil 6.17'de karşılaştırılmıştır.



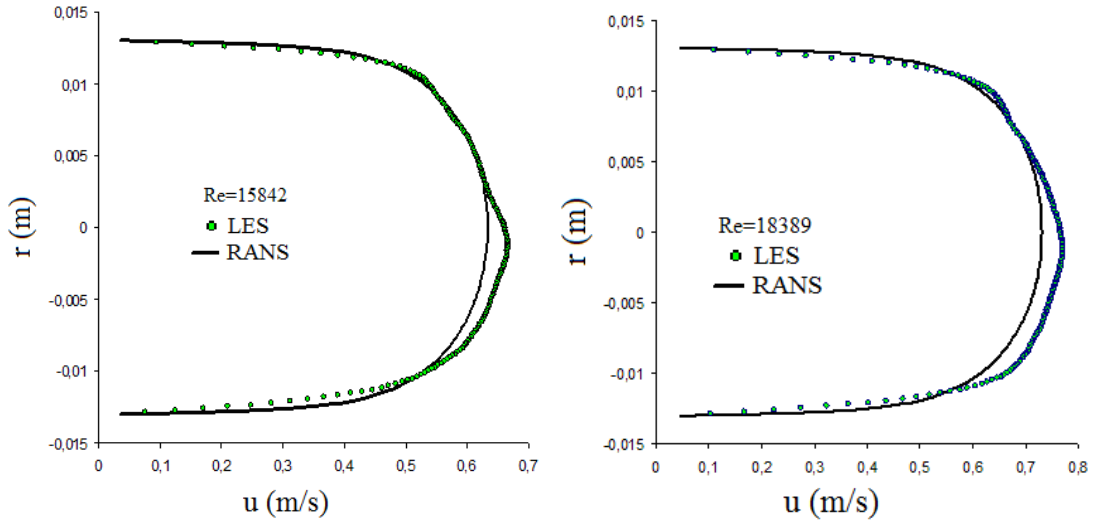
Şekil 6.17'de sonraki sayfada devam ediyor.



Şekil 6.17. LES ve RANS çözümlerde Merkezi aksel hızın değişimi

Şekil 6.17'de görüldüğü gibi LES çözümdeki merkezi aksel hız değişim değerleri her iki Reynolds sayısında RANS çözümünden daha yüksek çıkmıştır. Hız değişiminin tepe noktaları da aynı mesafeye denk düşmemektedir burada LES çözümün tepe noktası daha ileridedir. Yukarıdaki şekilde verilmiş olan LES aksel hız değişim eğrilerine göre $Re=18387$ 'de 1.28 m mesafede alınacak hız profilleri tam gelişmiş akış hız profilleri olmaktadır.

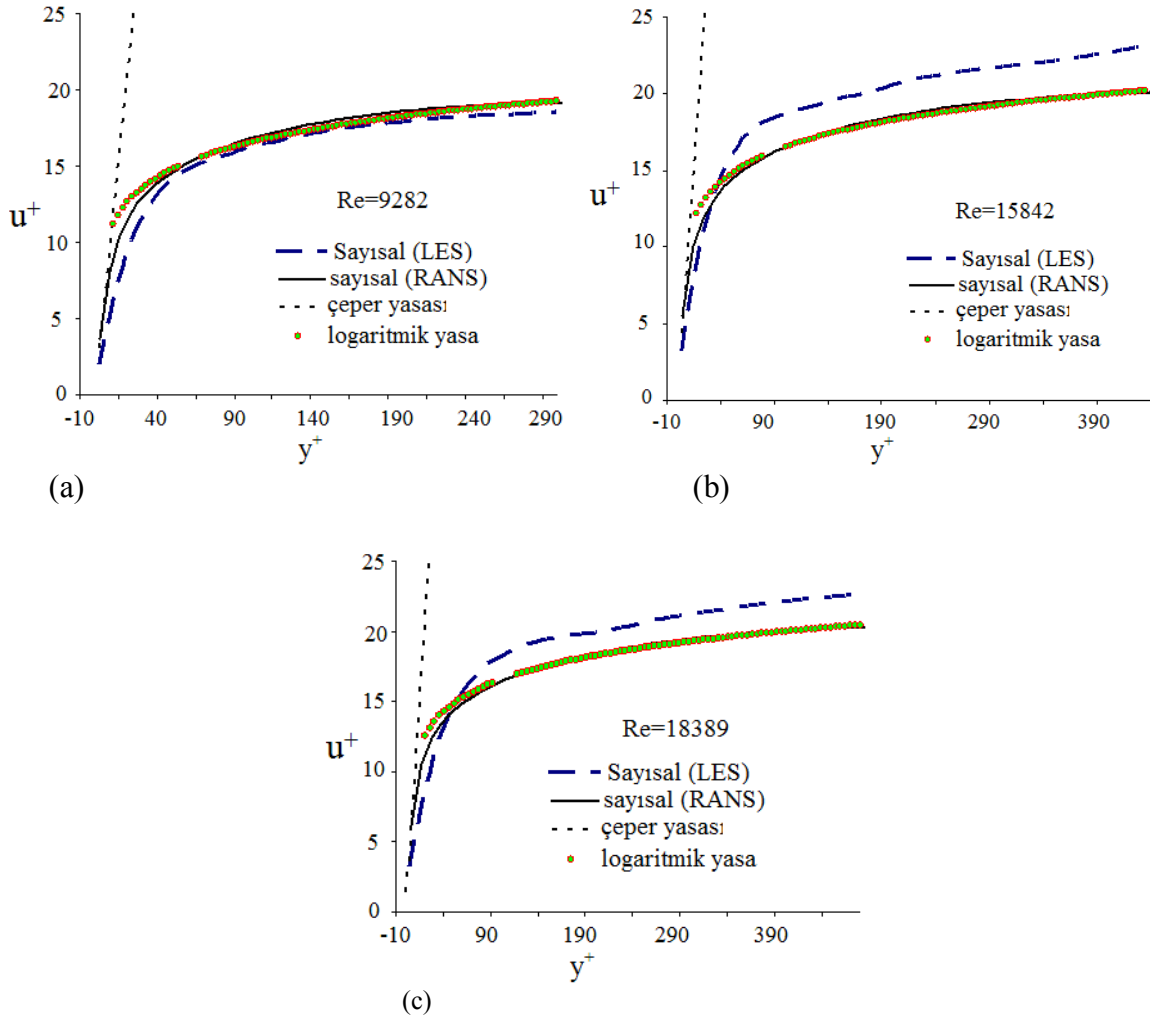
LES ve RANS çözümünde tam gelişmiş hız profilleri Şekil 6.18'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.18. İki farklı Reynolds sayılı akışta zaman ortalamalı LES hız profillerinin RANS hız profilleriyle karşılaştırılması

Şekil 6.18'de gösterildiği gibi LES ve RANS hız profilleri birbirlerine yakın değerlerde olmalarına rağmen tam uyuştukları söylenemez. Bunun nedeni LES çözümde ağ çözünürlüğünün yeterli olmamasıdır veya yeterince istatistiki değerlere ulaşamamış olmasıdır.

LES çözümde hız profillerinin boyutsuz hız dağılım yönünden deneysel bağıntılarla ve RANS değerleriyle karşılaştırılması ise Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Boyutsuz hız dağılımı yönünden LES ve RANS sayısal değerlerinin çeper yasa ve logaritmik yasa değerleriyle üç farklı Reynolds sayısında (a-c) karşılaştırılması

Şekil 6.19 üç farklı Reynolds sayısındaki boyutsuz hız dağılımını göstermiştir. Bu şekillerde LES değerleri RANS, çeper yasa ve logaritmik yasa değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi LES değerleri RANS değerlerine göre, çeper yasa ve logaritmik yasa değerlerine daha uzak kalmıştır. Burada LES değerler çeper ve logaritmik yasa değerlerinden maksimum %12 ve ortalama olarak %8 civarında sapma göstermiş-

lerdir. Şekillerde verilen RANS değerleri ise çeper ve logaritmik yasa değerleriyle çok iyi uyum sağlamıştır.

Sonuç olarak tam gelişmiş akış kısmından alınan radyal hız profilleri LES çözümde deneysel bağıntılara çok uzak kalmış fakat RANS çözümde ise deneysel bağıntılarla çok iyi uyum göstermiştir. Aynı zamanda LES çözümündeki eksenel hız değişim değerlerinin de RANS çözümündeki değerlerden daha yüksek değerlerde oldukları görülmüştür. Bu iki duruma göre LES çözüm hız gelişimi ve dağılımı yönünden yetersiz olmuştur. Bunun nedeni olarak da LES çözümde yeterince hassas ağ oluşturulamamış olmasıdır.

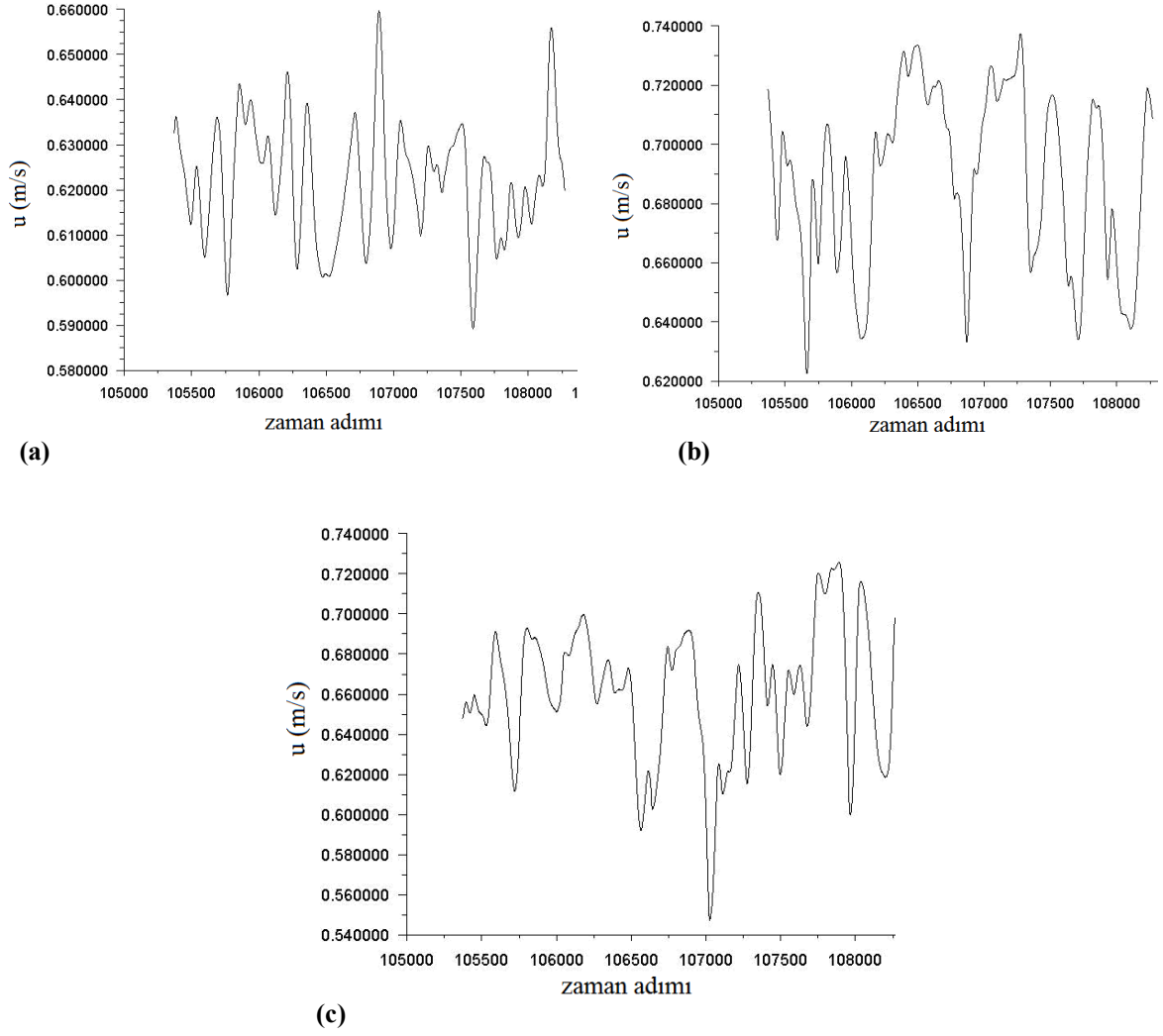
Şimdiye kadar LES çözümde elde edilen hız ve basınç değişimleri incelenmiştir. Boru boyunca LES statik basınç değişimi RANS basınç değişimine göre bakır deney değerlerini daha uzak değerlerde izlemiştir. Sonuç olarak LES çözüm basınç değişimi yönünden deney verilerini yakın tahmin etmesine rağmen hız değişimi ve dağılımı yönünden ise iyi tahmin edememiştir.

6.4.5 Hız ve Basınç Çalkantıları

Türbülanslı akışlarda hız, basınç, sıcaklık gibi akış özellikleri zamana bağlı olarak dalgalı olurlar. Bu dalgalı değerler akış içerisinde oluşan türbülans çalkantılarının bir sonucudur. Bu nedenle deneylerde ve LES çözümde akış özellikleri belirlenirken zaman ortalamalı değerleri alınır. FLUENT programında akış alanı değişkenleri incelenirken anlık değerleri monitor noktalarından izlenebilir.

6.4.5.1 Hız Çalkantıları

Örneğin 15842 Reynolds sayılı boru akışında değişik monitor noktalarında alınan anlık akım yönlü hız değerlerinin zamana bağlı değişimleri Şekilde 6.20'de gösterilmiştir.

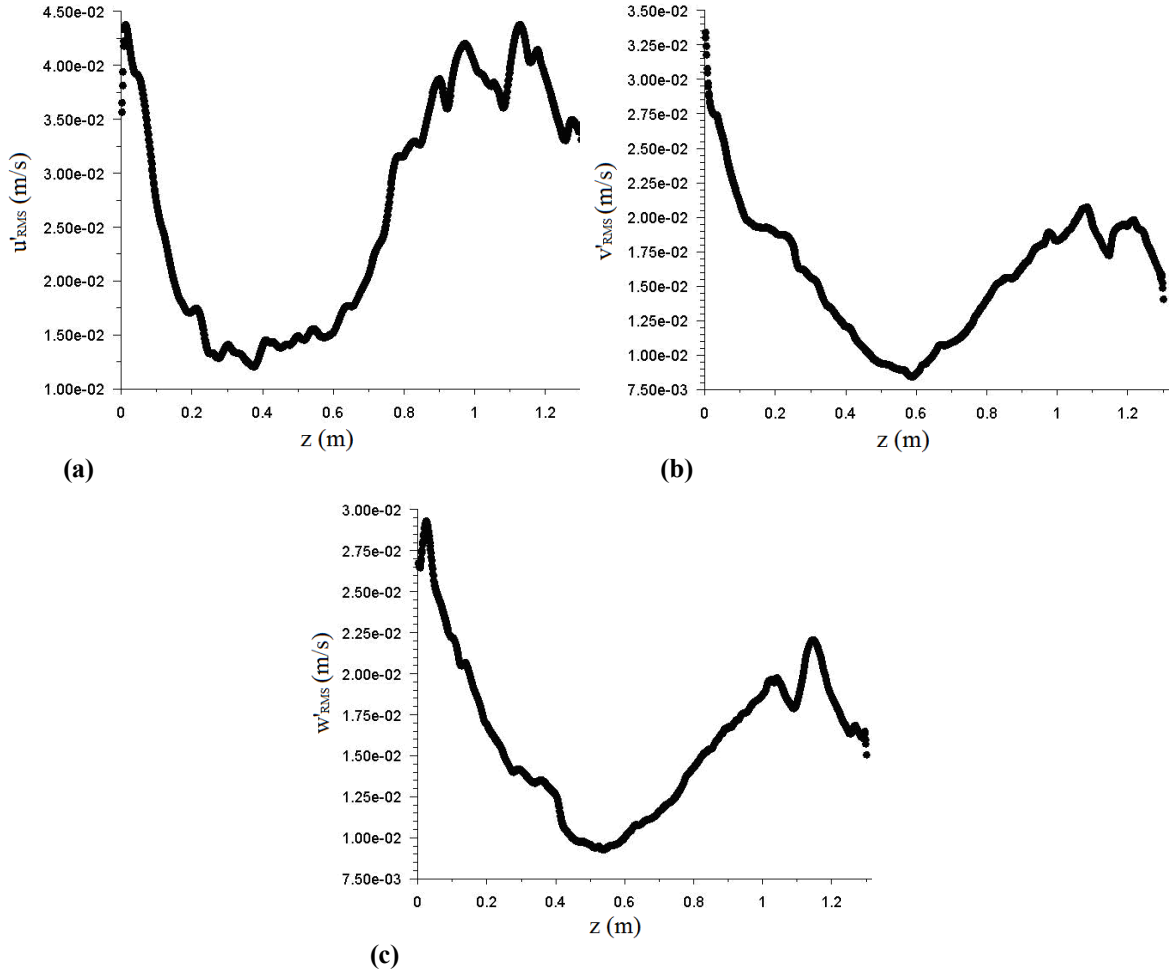


Şekil 6.20. $Re=15842$ sayılı boru akışında anlık akım yönlü hız değerlerinin zamana bağlı değişimleri
(a) $x = 0.2$ m'deki, (b) $x = 0.5$ m'deki (c), $x = 1.28$ m'deki hız değerleri

Şekil 6.20'de görüldüğü gibi değişik monitor noktalarında gösterilen anlık akım yönlü hız değerleri frekans, faz ve genlik bakımından farklı olmuşlardır. Türbülans çözümleri basitleştirmenin yolu akış özelliklerini zaman ortalamalı değerler ve çalkantı değerleri üzerinden değerlendirmektir. Bu nedenle türbülans özellikler genellikle RMS değerleri ile değerlendirilirler. Örneğin akım yönlü çalkantı hızın RMS değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u'_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}{N}} \quad (6.2)$$

FLUENT programı çalkantı özelliklerinin RMS değerlerini grafik şeklinde verebilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle merkezi eksen üzerinde her üç yönlü çalkantı hızın RMS değerleri ise Şekil 6.21'de gösterilmiştir.

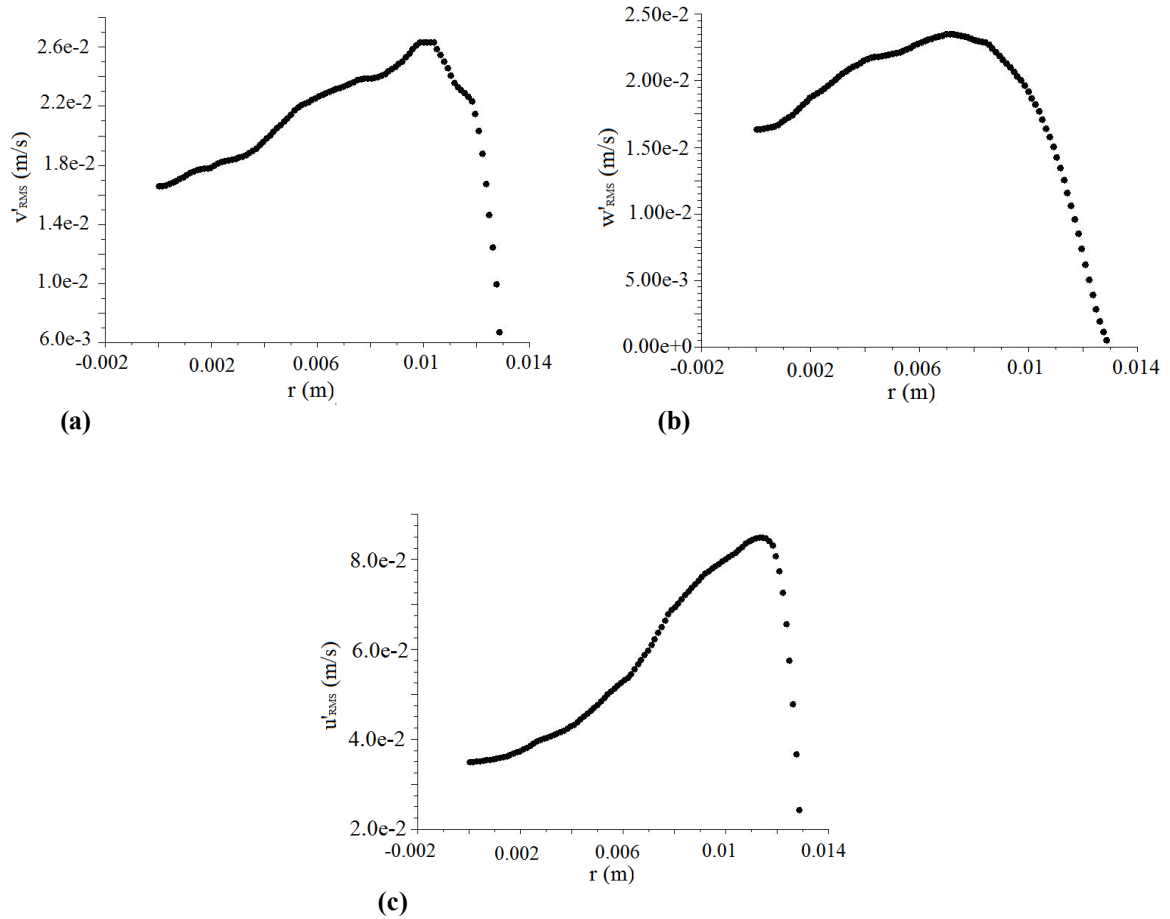


Şekil 6.21. u' , v' , w' çalkantı hız bileşenlerinin (a-c) merkezi eksen boyunca RMS değişim değerleri

Şekil 6.21'de gösterildiği gibi çalkantı hızlarının akış boyunca RMS değerlerinin değişimi verilmiştir. Her üç bileşenin RMS değerleri boru girişinden itibaren düşmeye başlamış ve bir minimum noktasından sonra tam gelişmiş türbülans akış şartlarına varıncaya kadar artmıştır. Minimum nokta laminar akışın bitim noktasını ifade etmektedir. Bu durumun nedeni ise şudur: boru girişinde verilen %7'lik türbülans çalkan-tıları laminar akış boyunca sönümlenmeye başlar. Bu türbülans çalkantıları laminar akışı bozup türbülansa uğrattıktan sonra güçlenmeye başlar ve tam gelişmiş akış şartları oluşuncaya kadar artar. Bu RMS değişimleri akış boyunca türbülans yoğunluğunun değişimini

gösterebilmektedir. Bu grafiklerdeki çalkantı hızlarının değişimi kayma gerilmesindeki parabolik değişime benzer olmuştur.

Şekil 6.22 ise 15842 Reynolds sayılı akışta tam gelişmiş akış şartlarının olduğu 1.28 m mesafesindeki radyal yöndeki çalkantı hız bileşenlerinin RMS değerlerini göstermiştir.

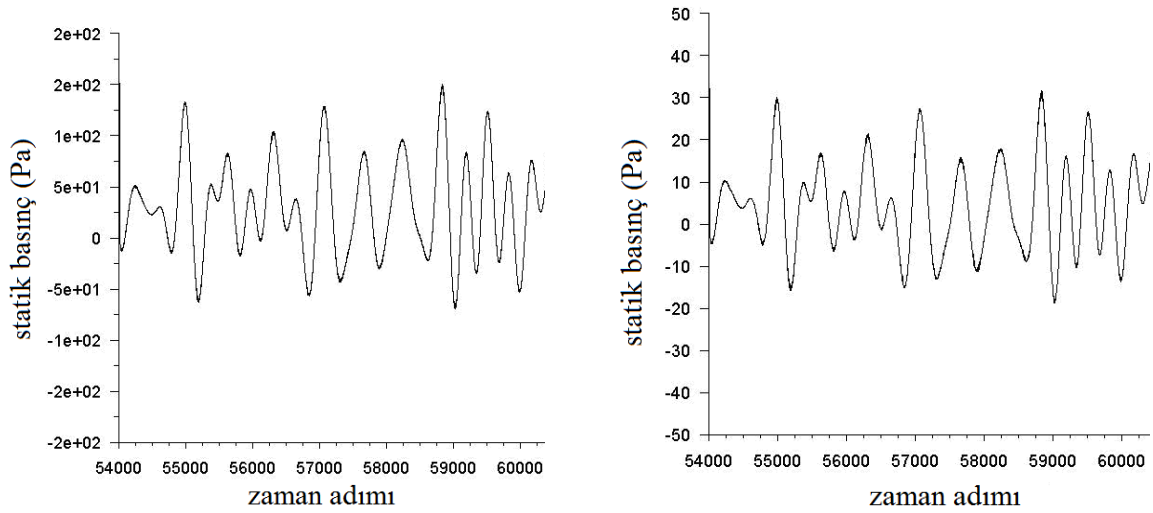


Şekil 6.22. u' , v' , w' çalkantı hızlarının RMS değerlerinin (a-c) çapsal yöndeki değişimi

Şekil 6.22'de gösterildiği gibi çalkantı hızlarının RMS değerleri merkez noktadan itibaren yükselmeye başlamış ve boru iç duvarına yakın bölgede tepe değerine ulaşmış ve burdan sonra iç cidara kadar hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu şekildeki grafikler boru iç duvarına yakın bölgede çalkantıların daha etkili ve şiddetli olduğunu göstermiştir.

6.4.5.2 Basınç Çalkantıları

Boru iç duvarına etki eden statik basınç değerleri diğer akış özelliklerinde olduğu gibi çalkantı ve ortalama değerlerine ayrılır. Boru boyunca olan statik basınç düşüşleri ise ortalama değer üzerinden değerlendirilmektedir. Ortalama basınç değerleri ise istatistiki statik basınç değerleri olmaktadır. Deneylerde ve LES çözümlerde boru boyunca olan statik basınç düşüş değerleri değerlendirirken istatistiki değerleri ile işlem yapılır. LES çözümde iki farklı monitor noktadaki anlık statik basınç değerleri Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



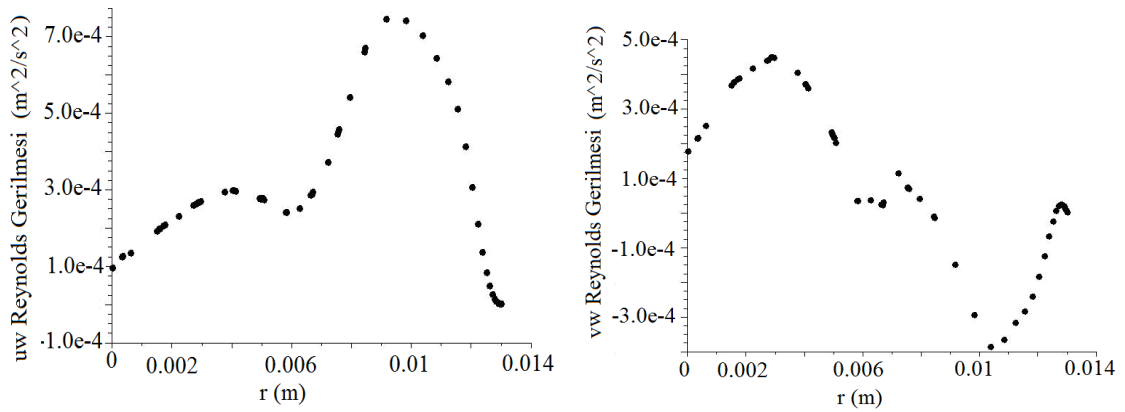
Şekil 6.23. $Re = 15842$ sayılı akışta boru iç duvarına etki eden anlık statik basınç değerlerinin zamana bağlı değişimleri (a) $x = 0.2$ m'deki monitor noktası, (b) $x = 1.28$ m'deki monitor noktası

Şekil 6.23'te görüldüğü gibi her iki noktadaki statik basınçlar aynı faz ve frekansta dalga üretmişlerdir. Burada sadece dalga genlikleri farklı olmuştur. Bu durum deney çalışmasında da aynı olmuştur. Deneydeki basınç çalkantıları da aynı faz ve frekansta dalgalanmışlardır. Yalnız deneydeki çalkantıların genlikleri, LES çözümünden farklı olarak, her priz noktasında aynı kalmıştır. Yukarıdaki şekilde ise basınç genliklerinin büyüklükleri farklıdır. LES çözümde farklı noktalarda ölçülen RMS basınç değerleri farklı olmuş fakat deneyde farklı noktalarda ölçülen RMS değerleri ise aynı kalmıştır.

6.4.6 Reynolds Gerilmeleri

Türbülanslı akışlarda anlık gerilmeler diğer türbülans özellikleri gibi ortalama gerilme bileşeni ve çalkantı gerilme bileşenine ayrılır. Ortalama gerilmeye laminar gerilme ve çalkantı gerilmesine ise türbülans gerilmesi denir. Bu ayrımın Navier Stokes denklemlerine yerleştirilmesiyle RANS denklemleri elde edildiğini daha önceki konularda gösterilmişti. Bu denklemlerde oluşan türbülans gerilmelerine Reynolds gerilmeleri denir. Reynolds gerilmeleri $-\rho \overline{u'v'}$ biçiminde olan gerilmelerdir.

Bu kısımda Reynolds gerilmeleri analiz edilmiştir. Bunun için 15842 Reynolds sayılı akışta, 1.28 m akış mesafesindeki Reynolds gerilmelerin çapsal yöndeki RMS değişimleri Şekil 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Reynolds gerilmelerinin RMS değerlerinin radyal yöndeki değişimleri

Şekil 6.24'te gösterildiği gibi Reynolds gerilmelerin değerleri duvara yakın bölgelerde yüksek çıkmıştır. Zaten daha önceki şekillerde hız çalkantılarının RMS değerleri duvara yakın bölgelerde yüksek çıkmıştı dolayısıyla Reynolds gerilmeleri bu bölgelerde yüksek çıkmıştır.

6.5 Sonuç

Gelişen boru akışı için RANS çözüm tercih edilmesine rağmen burada LES ile pürüzsüz boru akışı da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma FLUENT akış çözücü programıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı LES çözümü deney değerleriyle ve RANS

çözümle karşılaştırmak ve türbülans çalkantıların akış özelliklerine olan etkisini görselleştirmek ve analiz etmektir. LES çözümünden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Bu çalışmada hız ve basıncın akış içerisindeki dağılımları renk kontörleriyle ve vektörlerle gösterilmiştir. Gelişen boru akışının gerçek akış görüntüsünü gösterme bakımından, LES çözüm RANS çözüme oranla çok fark yaratmıştır.

LES çözümde istatistiki statik basınç değişimi bakır boru deney değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bakır boru, pürüzlülüğü çok düşük olduğundan hidrodinamik olarak pürüzsüz boru olarak kabul edilmiştir. Boru akışında 0.2-1.3 m aralığındaki basınç farkı değerlendirilmiştir. Basınç farkı yönünden LES çözüm ortalama %14, RANS çözüm ise %3 kadar deney değerlerinden sapma göstermiştir. Burada RANS çözümün deney değerleriyle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Aynı zamanda bu basınç farkından hesaplanan Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişimi Colebrook pürüzsüz boru denklemiyle, bakır boru deney değerleriyle ve RANS çözüm pürüzsüz boru değerleriyle karşılaştırılmıştır. Burada LES çözüm Colebrook pürüzsüz boru eğrisini deney değerlerine ve RANS çözüme göre daha yüksek değerlerde izlemiştir.

LES çözümde merkezi eksenel hız değişimi RANS değerleriyle karşılaştırılmıştır. Burada LES değerleri RANS değerlerini daha yüksek değerlerle izlemiştir. Tam gelişmiş akışta LES ve RANS boyutsuz hız profilleri çeper yasası, logaritmik yasa değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada RANS değerler deneysel bağıntılarla uyuşurken LES değerleri ise yüksek sapma göstermiştir. Sonuç olarak LES çözümün basınç ve hız değerleri, deneysel bağıntıları ve bakır boru deney değerlerini daha yüksek değerlerle izlemiştir. Bunun sebebi olarak LES çözümün yeterli bir ağ çözünürlüğüne sahip olamaması olarak görülmüştür.

LES ile yapılan çalışmada çalkantı hız bileşenlerinin ve Reynolds gerilmelerin RMS değerleri hesaplanmış ve radyal yöndeki değişimleri incelenmiştir. Çalkantı hız bileşenleri ve Reynolds gerilmeleri duvara yakın bölgede yüksek değerlerde, duvarda sıfır ve boru merkezine yakın bölgelerde ise düşük değerlere sahip olmuştur. Çalkantı hız bileşenlerinin RMS değerleri de merkezi eksen boyunca incelenmiş ve RANS duvar kayma gerilmesi değişimine benzer parabolik bir değişime sahip oldukları görülmüştür.

Değişik Monitor noktalarında anlık statik basınç değerleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Tüm monitor noktalarında basınç çalkantıları aynı faz ve frekansta dalgalanmışlar fakat genlikleri farklı olmuştur.

LES ile yapılan bu sayısal çalışma ağ çözünürlüğü yönünde yetersiz olduğu görölmüştür. Gelişen boru akışının tam çözümü için yüksek çözünürlüğe sahip ve yeteri uzunluğa sahip bir boru ile yeni bir LES çalışmasının yapılması önerilmekte ve bunun yapılabilmesi için de paralel veya yüksek başarımlı hesaplama kullanılmasının gerekli olduğu görölmektedir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMADA BELİRSİZLİK ANALİZİ

7.1 Giriş

Bilimsel ve mühendislik çalışmaları analitik bağıntılar ve deney değerleri üzerine kurulmuştur. Analitik bir çalışmayı doğrulamak için de deney sonuçlarıyla karşılaştırma gereği duyulur. Bilimsel ve mühendislik çalışmaların çoğunluğu deneysel çalışmaları içermektedir. Analitik çalışmalar, daha çok, hata derecesinin çok hassas istenmediği çalışmalarda kullanılır. Mühendislik çalışmalarında test, kontrol ve tasarım amaçlı deneyler yapılır. Yapılan bu deneylerin doğruluğu bilinmek istenir. Bunun için deney bir kaç kez tekrarlı yapılır veya başka deney sonuçlarıyla karşılaştırma ihtiyacı duyulur. Deney şartları ve deneyde kullanılan ölçüm cihazları deney verilerinin doğruluğu üzerinde büyük etkilere sahiptir. Örneğin bir sıcaklık ölçerden sıcaklık değerleri okunurken gerçek değerinden ne kadar saptığı bilinmek istenir. Bu, cihazın ölçme toleransı veya hatasıdır. İmalatçılar bu ölçüm cihazlarını yaparken ölçtüğü değer gerçeğe değerinden yüzde kaç hatayla saptığını belirtmek zorundadır. Bir boru imalatçısı verdiği boru iç çapı değerinin hangi toleranslarla sapabileceğini katalogunda belirtir. Bu toleranslar ve hata payları cihazların ölçüm esnasında hassaslık derecelerine bağlıdır. Bunun için ölçüm cihazlarının hata payları ve imalat parçalarının tolerans değerleri verilir. Bir deney yapılırken bir çok ölçüm cihazı ve aleti kullanılır. Deneylerde fiziksel bir değişkenin değeri ölçüm cihazlarıyla okunduğu için gerçeğe değerinden ne kadar saptığı bu cihazların hassaslık derecesine bağlı kalmaktadır. Deneylerden okunan değerlerin gerçeğe değerden sapma payları ölçüm cihazlarının sayısına ve deney şartlarına bağlı olarak artmaktadır. Eğer elde edilen deney değerleri analitik bir bağıntıda kullanılacaksa bağıntıda kullanılan tüm değişken değerlerinin toleransları ve hata payları, elde edilen sonucun hata payını artıracaktır.

Hata analizi, bir bağıntı sonucunda elde edilen değerlerin yüzde kaç hatayla saptığını, yaklaşık olarak, belirlememize sağlar. Hata analizi, istatistiksel yöntemlerin ve matematiksel hesaplamaların çokça kullanıldığı bilimsel bir yöntemdir. Hata analizleri bilimsel araştırmalarda, mühendislik analizlerinde ve sayısal hesaplamalarda şimdiki zamanlarda daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin sayısal bir çalışma yaparken, bilgisayar virgülden sonra birkaç rakam kullanır ve diğer geri kalanlarını kullanmaz. Bu

yapılan işleme yuvarlama denir. Yapılan yuvarlamadan dolayı gerçek değerde bir yuvarlama hatası mevcut olur. Eğer alınan değerler milyonları bulup toplanıyorsa bu yuvarlama hataları birikecek ve hatalı sonuçlara neden olacaktır. Sayısal çalışmalarda kesme hatalarına da rastlanır. Bir diferansiyel denklem Taylor serisine göre ayrıklaştırıldığı için Taylor serisinde yapılan kesmeler sonucunda ayrıklaştırma değerlerinde kesme hataları oluşmaktadır. Sayısal çalışmalarda bunlar en aza indirgenmeye çalışılır. Kesme hatası, yuvarlama hatası, ölçüm cihazlarındaki hatalar vb. bir çok hata ile sayısal ve deneysel çalışmalarda karşı karşıya kalmaktayız. Amaç bu hataları aza indirmek ve hatanın ne kadar olduğunu tahmin etmektir.

7.2. Deneylerde Hata Analizi

Deneysel verilerin doğruluğunun tespiti, “belirsizlik tahmini”, “belirsizlik aralığı” veya sadece “belirsizlik” şeklinde adlandırılır. Belirsizlik analizi ile ilgili en açıklayıcı bilgiler Kline ve McClintock [36] ve Holman [29] tarafından yapılmıştır.

Belirsizlik aralığı birkaç yolla gösterilir. Birinci yol bir deneye ait değerler verildiği zaman “ $\pm$ ” işareti ile belirsizliği belirlenir. Örneğin verilen bir basınç değeri $500 \pm 2 \text{ Pa}$ ise basınç belirsizliği 2 Pa dır. İkinci yol ise $w()$ simgesi ile belirsizlik değerini parantez içerisinde gösterilir. Örneğin “ $w(p) = 2 \text{ Pa}$ ” ifadesi basınç belirsizliğinin 2 Pa olduğunu gösterir. Son olarak da belirsizliği yüzde olarak ifade edilir. Örneğin “basınç ölçümünde %10 belirsizlik var” ifadesi ile belirsizliğin $w(p) / p = 0.1$ olduğunu gösterir.

Genelde belirsizlik analizi ikiye ayrılır. Birincisi temel ölçümlerdeki belirsizlik, ikincisi ise bu ölçümlerden elde edilen sonucun belirsizliğidir. Temel ölçüm belirsizliği ölçüm cihazlarının gösterdiği değerlerdedir. Örneğin basınç göstergelerinin ve debi ölçerlerin gösterdiği değerlerdeki belirsizlik. Temel Ölçümün belirsizliğini bilmek için bazı bilgilere ihtiyaç duyulur.

- a) Dijital Çözünürlük, derecelendirmedeki bölüntü sayısı: Eğer derecelendirme üzerindeki son iki çizgi arasını hassas olarak okunamıyorsa belirsizlik en küçük bölüntünün yarısı olarak alınır.
- b) İmalatçı kalibrasyon bilgileri: Alınan ölçümlerde belirsizlik var ise imalatçı firmanın öngördüğü belirsizliği görmek veya cihazın kalibrasyon değerlerini kontrol etmek gerekir.

- c) Aynı ölçümü tekrarlamak: Bazen bir cihazın değerleri zamanla değişiklik gösterebilir. Bu ortam şartlarındaki değişim, elektrik arızaları, süreksizlik gibi nedenlerden kaynaklandığını gösterir. Örneğin hava sıcaklığının değişmesi, gürültünün olması ve yeniden çalışan makinenin gösterdiği değişiklikler gibi. Bu durumda birkaç kez ölçüm alınır ve değerlerin standart sapması hesaplanır.
- d) Aynı niceliği bağımsız ölçümlerle kıyaslamak: Bazen bir ölçümü yapmak için iki farklı cihaz kullanılabilir. Örneğin su debisini su kantarı ve orifis metre ile ayrı ayrı ölçmek gibi. Her iki ölçümdeki belirsizlik arasındaki farktan küçük olduğu sürece ölçümler arasındaki fark belirsizlikleri belirlemede bir rehber olabilir.
- e) Diğer Faktörler: Ölçümü yapan kişi ölçümleri etkileyen dış faktörleri biliyorsa bunları toplam belirsizliğe eklemelidir. Bir cihazı çalışma aralığı dışında kullanmak, olumsuz çevre şartları altında çalışmak, elektrik kesintileri vb. faktörler dikkate alınmalıdır.

7.3. Belirsizliği Sonuç Olarak Tespit Etmek

Deneysel çalışmalardan elde edilen değişken değerleri bazı parametrelere bağlı fonksiyon şekline getirilebilir veya analitik bir bağıntıda kullanılabilir. Herhangi bir P değeri, aşağıdaki gibi, n sayıda değişkene bağlı bir fonksiyon olsun.

$$P = P(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (7.1)$$

Bu değişkenlerin her birinin belirsizliği olsun; örneğin x_2 'nin belirsizliği $w(x_2)$ olsun. Bu durumda P değerlerindeki belirsizlik tüm değişken belirsizliklerinin kareleri toplamının karekök ortalaması olarak hesaplanır.

$$w(p) = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} w(x_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} w(x_2) \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3} w(x_3) \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_4} w(x_4) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} w(x_n) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.2)$$

Bu hesaplama tüm değişkenlerin aynı anda maksimum hataya sahip olmaları kabulüne göre gerçekleşir. Tüm $w(x_i)$ belirsizliklerini doğru olarak belirlenmesi deney yapanları

sorumluluğu altında olduğu bilinmelidir. Yukarıdaki eşitlikte yer alan P değişkeni bağlı olduğu değişkenlerin n . kuvvetten fonksiyonu olarak, " $P = \text{sabit } (x_1^n x_2^n x_3^n)$ " şeklinde, düşünülürse eşitlikteki türev kısmı aşağıdaki gibi açılabilir.

$$\frac{\partial P}{\partial x_1} = \frac{n_1 P}{x_1} \quad \frac{\partial P}{\partial x_2} = \frac{n_2 P}{x_2} \quad \frac{\partial P}{\partial x_3} = \frac{n_3 P}{x_3} \quad (7.3)$$

Bu durumda denklem (7.2)

$$\frac{w(p)}{P} = \left[\left(n_1 \frac{w(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(n_2 \frac{w(x_2)}{x_2} \right)^2 + \left(n_3 \frac{w(x_3)}{x_3} \right)^2 + \left(n_4 \frac{w(x_4)}{x_4} \right)^2 \dots \dots \left(n_n \frac{w(x_n)}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

eşitliği ile sonuçlanır.

Belirsizlik değerinin tespit bağıntısı ile deney çalışmasındaki belirsizlik analizinin yapılabilmesi için deneydeki belirsizliğe sahip olan parametrelerin iyi belirlenmesi ve belirsizlik oranlarının gözden geçirilmesinde fayda vardır.

7.4. Yapılan Deney Çalışmalarında Toplam Belirsizliğin Tespiti

Deney çalışmasında statik basınç yükseklikleri ve hacimsel debi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerle Reynolds sayısı (Re) ve sürtünme faktörü (f) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerden belirsizlik değeri belirlenirken Kline ve McClintock tarafından belirlenen yöntem esas alınmıştır.

7.4.1. Reynolds Sayısı için Belirsizlik Tespiti

Reynolds sayısı daha önce verildiği gibi akışkan hızına ve boru çapına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (7.5)$$

Bu denklemdeki ortalama hız ise kütleli debi formülünden aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \rho U \pi \frac{D^2}{4} \Rightarrow U = \frac{4m}{\pi D^2 t \rho} \quad (7.6)$$

Burada m debi kantarında ölçüm için bırakılan kütledir (kg) ve t ise debi ölçümünde geçen zamandır (s). Ortalama akış hızı denklem (7.5)'te yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Re = \frac{4m}{\pi D \mu t} \quad (7.7)$$

Burada μ dinamik viskozitedir. Reynolds sayısının belirsizlik değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} w(Re) &= \left[\left(\frac{\partial Re}{\partial m} w(m) \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} w(D) \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} w(\mu) \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial t} w(t) \right)^2 \right]^{1/2} \\ w(Re) &= \left[\left(\frac{4}{\pi D \mu t} w(m) \right)^2 + \left(-\frac{4m}{\pi D^2 \mu t} w(D) \right)^2 + \left(-\frac{4m}{\pi D \mu^2 t} w(\mu) \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{4m}{\pi D \mu t^2} w(t) \right)^2 \right] \\ \frac{w(Re)}{Re} &= \left[\left(\frac{w(m)}{m} \right)^2 + \left(-\frac{w(D)}{D} \right)^2 + \left(-\frac{w(\mu)}{\mu} \right)^2 + \left(-\frac{w(t)}{t} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (7.8)$$

7.4.2. Sürtünme Faktörü için Belirsizlik Tespiti

Sürtünme faktörü daha önceki konuda olduğu gibi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{2D}{L\rho U^2} \Delta P \quad (7.9)$$

burada U hızı yerine Denklem (7.6)'daki değeri yazılırsa denklem aşağıdaki gibi olur.

$$f = \frac{2D}{\rho L} \frac{\Delta P}{(4m/\pi D^2 \rho t)^2} \quad (7.10)$$

bu denklem Re formülü oluşacak şekilde düzenlenirse sürtünme faktörü aşağıdaki gibi olur.

$$f = \frac{1}{2\text{Re}^2} \frac{D^3}{\rho L \mu^2} \Delta P \quad (7.11)$$

Sürtünme faktörü için belirsizlik ifadesi ise aşağıdaki eşitlikle sonuçlanır.

$$w(f) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial \text{Re}} w(\text{Re}) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} w(\rho) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D} w(D) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} w(L) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \mu} w(\mu) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta P} w(\Delta P) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.12)$$

Denklem (7.12) açılırsa aşağıdaki gibi sürtünme faktörünün belirsizliği ortaya çıkar.

$$\frac{w(f)}{f} = \left[\left(-2 \frac{w(\text{Re})}{\text{Re}} \right)^2 + \left(-\frac{w(\rho)}{\rho} \right)^2 + \left(3 \frac{w(D)}{D} \right)^2 + \left(-\frac{w(L)}{L} \right)^2 + \left(-2 \frac{w(\mu)}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{w(\Delta P)}{\Delta P} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.13)$$

7.5. Ölçülen Değerlerin Belirsizliklerinin Belirlenmesi

Denklem 7.8 ve Denklem 7.13 'le sonuçlanan belirsizlik ifadelerinde bulunan terimlerin belirsizliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Verilen belirsizlikler için çeşitli kaynaklarda benzer ölçümlerdeki belirsizliklerin esas alınması yanında ölçü aletlerinin imalatçı firma tarafından önerilen belirsizlik değerleri de dikkate alınmıştır. Bunun yanında belirlenmesi zor olan hatalar, deneysel tecrübelerden tahmini olarak belirlenmiştir [9].

7.5.1. Basınç Kaybı Ölçümlerinde Ortaya Çıkabilecek Belirsizlikler

Basınç kaybı ölçümlerinde ortaya çıkabilecek hatalar aşağıda sıralanmıştır.

- (a₁) Manometrenin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik $\pm \%2-3$
- (a₂) Sistem kaçaqlarıyla ilgili belirsizlik; $\pm \%0-0.5$
- (a₃) Yatay konulan borunun eğimli olma durumunda belirsizlik $\pm \%0.5-1$
- (a₄) Piezometre hortumlarında kılcallık etkisi $\pm \%0-0.5$

Bu belirsizlikler ile basınç kaybının ölçülmesinde ortaya çıkabilecek ortalama belirsizlik aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}\frac{w(\Delta P)}{\Delta P} &= \left[(a_1)^2 + (a_2)^2 + (a_3)^2 + (a_4)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[(0.03)^2 + (0.005)^2 + (0.01)^2 + (0.005)^2 \right]^{1/2} \\ &\Rightarrow \frac{w(\Delta P)}{\Delta P} = \pm 3.2\%\end{aligned}\tag{7.14}$$

7.5.2. Kütle ve zaman ölçümlerindeki ortaya çıkabilecek belirsizlikler

Debi ölçümlerinde kullanılan ölçüm kütlelerindeki ve tutulan zamandaki belirsizlikler aşağıda verilmiştir.

Ölçüm kütlelerindeki belirsizlik:

- (a₁) Debi kantarına konulan kütlelerin belirsizliği; $\pm \%0.5-1$
- (a₂) Su sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan su kütlesi belirsizliği; $\pm \%0.5$

$$\frac{w(m)}{m} = \left[(a_1)^2 + (a_2)^2 \right]^{1/2} = \left[(0.01)^2 + (0.005)^2 \right]^{1/2} \quad (7.15)$$

$$\Rightarrow \frac{w(m)}{m} = \pm \%1.1$$

Zaman ölçümlerindeki belirsizlik:

(a₁) debi ölçümündeki zamanlama belirsizliği $\pm \%2$

$$\frac{w(t)}{t} = \pm \%2 \quad (7.16)$$

7.5.3 Diğer Belirsizlikler

(a₁) Boru eksenini boyunca boru çapında meydana gelebilecek farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik

$$w(D) / D = \pm \%1 \quad (7.17)$$

(a₂) Boru boyundaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik

$$w(L) / L = \pm \%1 \quad (7.18)$$

7.5.4 Fiziksel Özelliklerin Belirsizliği

Dinamik viskozite ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerdeki belirsizlikler aşağıda verilmiştir.

(a₁) su sıcaklığındaki değişim nedeniyle belirsizlik: $\pm \%1$

(a₂) tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik: $\pm \%0.2$

$$\frac{w(\rho)}{\rho} = \frac{w(\mu)}{\mu} = \left[(a_1)^2 + (a_2)^2 \right]^{1/2} = \left[(0.01)^2 + (0.002)^2 \right]^{1/2} = 0.01 = \pm \%1 \quad (7.19)$$

Yukarıda elde edilen belirsizlikler sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı bağıntılarında yerlerine yazılırsa sürtünme faktöründeki ve Reynolds sayısındaki belirsizlikler aşağıdaki gibi hesaplanmış olur.

$$\begin{aligned}\frac{w(Re)}{Re} &= \left[\left(\frac{w(m)}{m} \right)^2 + \left(-\frac{w(D)}{D} \right)^2 + \left(-\frac{w(\mu)}{\mu} \right)^2 + \left(-\frac{w(t)}{t} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \frac{w(Re)}{Re} &= \left[(0.011)^2 + (-0.01)^2 + (-0.01)^2 + (-0.02)^2 \right]^{1/2} \\ \frac{w(Re)}{Re} &= 0.027 = \pm 2.7\%\end{aligned}\quad (7.20)$$

$$\begin{aligned}\frac{w(f)}{f} &= \left[\left(-2\frac{w(Re)}{Re} \right)^2 + \left(-\frac{w(\rho)}{\rho} \right)^2 + \left(3\frac{w(D)}{D} \right)^2 + \left(-\frac{w(L)}{L} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(-2\frac{w(\mu)}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{w(\Delta P)}{\Delta P} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \frac{w(f)}{f} &= \left[(-2 \times 0.027)^2 + (-0.01)^2 + (3 \times 0.01)^2 + (-0.01)^2 \right. \\ &\quad \left. + (-2 \times 0.01)^2 + (0.032)^2 \right]^{1/2} \\ \frac{w(f)}{f} &= 0.074 = 7.4\%\end{aligned}\quad (7.21)$$

Yukarıda verilenlere göre Reynolds sayısındaki belirsizlik $\pm 2.7\%$ ve sürtünme faktöründeki belirsizlik ise $\pm 7.4\%$ olarak hesaplanmıştır.

7.6 Sonuç

Beş farklı boru türüyle yapılan deneysel çalışmalarda debi ölçümlerinde ve statik basınç okumalarında oluşan hatalar, deney şartlarındaki belirsizlikler ve seçilen boru geometrilerdeki belirsizlikler Reynolds sayısında ve sürtünme faktörü hesaplanmalarında belirsizlikler yaratır. Bu iki bağıntıda kullanılan parametrelerdeki belirsizlikler bulunarak sürtünme faktöründeki ve Reynolds sayısında toplam belirsizlik bulunmuş olur. Yapılan belirsizlik hesaplamalarında Reynolds sayısındaki belirsizlik $\pm 2.7\%$ ve sürtünme faktöründeki belirsizlik ise $\pm 7.4\%$ olarak bulunmuştur.

8. SONUÇLAR

8.1. Giriş

Bu çalışma giriş ve tam gelişmiş boru akışında laminar-türbülans geçiş özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç gelişen boru akışında akış özelliklerini analiz etmek için piyasadan temin edilmiş farklı malzemedeki borularla deneysel çalışma yapmak ve bu deneysel çalışmaya uygun sayısal bir çalışma gerçekleştirmek olduğu belirtilmiştir. Sayısal çalışmadaki amaç gelişme bölgesindeki akış özelliklerini analiz etmek ve sonucunda sayısal bağıntılar türetmektir. Uzun borulu akışlarda giriş etkileri önemsiz kalırken kısa borulu akışlarda giriş etkileri önemli olmakta ve tam gelişmiş akış şartlarına göre basınç kaybı hesabı yapılamamaktadır. Literatürde gelişen boru akışlarında basınç düşümünü bulmaya yönelik herhangi bir analitik veya deneysel bağıntı bulunmamaktadır. Gelişen boru akışında hidrodinamik gelişme uzunluğunu bulmaya yönelik literatürde bazı deneysel bağıntılar önerilmesine rağmen hala mekanizması tam olarak çözülememiştir ve bu konuda çalışmalar halen devam etmektedir. Bu nedenle 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında gelişen boru akışları sayısal yöntemlerle çözülmüş, kayma gerilmesi ve hidrodinamik gelişme mesafesi analiz edilerek sonucunda sayısal bağıntılar türetilmiştir. Yapılan bu deneysel ve sayısal çalışma sonuçları ise aşağıda verilmiştir.

8.2. Deneysel Çalışma Sonuçları

Piyasadan temin edilen, farklı malzemelerden imal edilmiş beş farklı boru türü ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır. Boru pürüzlülüklerini bulmak için gelişen boru akışında Darcy sürtünme faktörünün Reynolds ile değişimi incelenmiştir.

Boru pürüzlülükleri tam gelişmiş akış şartlarının olduğu düşünülen 0.7-1.7 m aralığında hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinden bulunmuştur. Bu aralıkta hesaplanan Darcy sürtünme faktörlerinin Reynolds ile değişimlerine uyan pürüzlü Colebrook eğrileri çıkarılmış ve boru pürüzlülükleri bulunmuştur. Bulunan boru pürüzlülük değerleri azalan yönde galvanizli, demir, alüminyum, PPRC ve bakır boru sırasında gelmektedir.

Galvanizli, demir, alüminyum boru pürüzlülükleri birbirine yakın ve bakır ile plastik boru pürüzlülüklerinin on katı kadar çıkmıştır.

Yedi ayrı basınç prizinden okunan basınç çalkantıları incelendiğinde her Reynolds sayılı akışta basınç çalkantılarının aynı faz ve frekansta dalga ürettikleri fakat genliklerinin ise farklı olduğu görülmüştür. Basınç dalgalarının aynı faz ve frekansta olmalarının nedeni ise pompa titreşimlerinden kaynaklı debi dalgalanmaları olabileceği öngörülmüştür.

2000-25000 aralığında bulunan Reynolds sayılı akışlarda basınç çalkantılarının RMS değerleri hesaplanmıştır. Aynı Reynolds sayılı akışlarda basınç prizindeki RMS değerlerinin aynı olduğu bulunmuştur. Tüm Reynolds sayıları için ayrı ayrı bulunan ortalama RMS değerlerinin genel ortalamaları alınmış ve sonuçta PPRC borunun en yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni PPRC boru çapının en küçük olmasıdır. Sonuç olarak genel ortalama RMS değerlerinin boru çapı ile alakalı olabileceği öngörülmüştür. Durumu kesinleştirmek için daha fazla deneysel çalışmasına gerek duyulmaktadır.

Beş farklı boru türüyle yapılan deneysel çalışmada debi ölçümlerinde ve statik basınç okumalarında oluşan hatalar; deney şartlarındaki ve seçilen boru geometrilerdeki belirsizlikler Reynolds sayısında ve sürtünme faktörü hesaplanmalarında belirsizlikler yaratmıştır. Yapılan belirsizlik hesaplamalarına göre Reynolds sayısındaki belirsizlik $\pm\%2.7$ ve sürtünme faktöründeki belirsizlik ise $\pm\%7.4$ olarak hesaplanmıştır.

8.3. Sayısal Çalışma Sonuçları

Türbülanslı akışlar sayısal olarak üç farklı yöntemle çözülebilmektedir. Bunlar DNS, LES ve RANS yöntemleridir. DNS ile akış içerisindeki tüm türbülans ölçekleri çözülürken LES çözümde ise büyük ölçekli yapılar çözülür küçük ölçekliler ise modellenir. DNS çözümlerinde hesaplama maliyeti çok yüksek olduğundan kullanımı 10000' den düşük Reynolds sayılı bilimsel amaçlı akışlarla sınırlı kalmıştır. LES ise DNS ile çözümü imkansız olan yüksek Reynolds sayılı akışları çözebilme imkanı sağlamıştır. LES metodu zaman yönünden hesaplama maliyeti yüksek olduğundan ticari alandaki kullanımı çok sınırlı kalmakta daha çok bilimsel araştırmalarda kullanılmaktadır. RANS çözümlerde ise akış içerisindeki tüm türbülans çalkantıları modellendiğinden hesaplama maliyeti çok düşük olmaktadır. Bu nedenle bilimsel ve ticari alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu üç yöntemde DNS deneysel gerçeklikte çözüm sunarken LES modelleme miktarına göre ve RANS ise uygun türbülans modelin seçimine göre deneysel gerçekliğe yakın

çözüm sunarlar. RANS yöntemli ile çözümler hem ticari ve hem de bilimsel alanda yaygın bir kullanıma sahip olmuştur. Bu sayısal çalışmada türbülanslı boru akışları RANS türbülans modeliyle gerçekleştirilmiştir. Boru akışları için RANS türbülans modellerinden SST türbülans modelinin uygun olduğu görülmüştür. Gelişen boru akışı için SST ile birlikte "transitional turbulence-Gamma Theta Modeli" seçeneği kullanılmıştır. Gamma Theta Modeli laminardan türbülansa geçiş akışlarını oluşturmak için deneysel çalışmaları kullanan bir modeldir.

RANS ile yapılan sayısal çalışmada elde edilen basınç düşüş değerleri her beş boru türü için deneysel basınç düşüş değerleriyle karşılaştırılmış ve çok iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Bu sayısal çalışma ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Sayısal çalışmadan çıkarılan duvar kayma gerilmesi boru girişinde gelişen akış kısmındaki parabolik değişimden sonra tam gelişmiş akış şartlarında sabit değerlerde olmuştur. Tüm boru çalışmalarında duvar kayma gerilmeleri analiz edilmiş ve sonuç olarak gelişen akış kısmındaki parabolik değişimin aşağıda verilen sayısal bağıntı ile ifade edilebildiği görülmüştür.

$$\tau_{(x)} = a x^2 + b x^{-7/20} \quad (8.1)$$

Burada a ve b denklem katsayılarıdır. Değerleri ise Reynolds sayısına ve bağlı pürüzlülüğe bağlı olarak değişmektedir. Yapılan eğri uydurma çalışmaları ile b katsayısı, aşağıdaki bağıntı ile tahmin edilebilmektedir.

$$b = \frac{8665 \cdot 10^{-13}}{D^{1.813}} [0.00134 Re^2 + 10.42 Re + 1005.4] \quad (8.2)$$

Bu bağıntıda bulunan D boru çapıdır ve bağıntıda "m" birimindeki değerleri yazılmalıdır. Bu bağıntı ile bulunan b katsayı değerleri sayısal b değerlerinden ortalama $\pm\%10$ sapma göstermiştir. a katsayısı içinde denklem (8.1)'in minimum noktası için türevinin alınmasıyla aşağıdaki bağıntı ortaya çıkmıştır.

$$a = 0.175 \frac{b}{X_{kr}^{2.35}} \quad (8.3)$$

Bu bağıntıda a katsayı değeri laminar türbülans kritik değeri olan X_{kr} değerine bağlı olduğu görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda bağıl pürüzlülük değeri aynı olan boruların X_{kr} / D değerlerinin üst üste çakıştıkları görülmüştür. Kapsamlı bir sayısal çalışma ile değişik bağıl pürüzlülüğe sahip borular için X_{kr} değerleri bulunup tablo haline getirilebilir. Bu şekilde a katsayıları bulunabileceği öngörülmektedir.

Yapılan hata analizinde denklem (8.1) değerleri sayısal değerlerden maksimum $\pm\%10$ ve genel ortalama olarak $\pm\%2$ sapma göstermişlerdir.

Sayısal duvar kayma gerilmesindeki değişimden yararlanarak türbülansa başlama kritik mesafe değeri (X_{kr}) ve tam gelişmiş türbülansa geçiş mesafe değeri ($X_{gç}$) elde edilmiştir. Bu iki değer Reynolds ile olan değişimleri incelenmiş ve aşağıdaki verilen sayısal bağıntılarla ifade edilebildikleri görülmüştür.

$$\frac{X_{kr}}{D} = 297.3 \left[(\text{Re} - 2000)^{-1.18} - 9230.5 \text{Re}^{-2.2} \right] \quad 4000 < \text{Re} < 25000 \quad (8.4)$$

$$\frac{X_{gç}}{D} = 34.93 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} \quad 10000 < \text{Re} < 25000 \quad (8.5)$$

$$\frac{X_{gç}}{D} = 0.546 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (118.5 - 0.0053 \text{Re}) \quad \text{Re} < 10000 \quad (8.6)$$

Son iki bağıntıda kullanılan ve eşitliğin sağ tarafında bulunan D ve ε sırasıyla çap ve pürüzlülüktür ve bağıntılarda sadece bir çarpandırılar. Bu nedenle bağıntılarda birimleri geçerli değildir. Yalnız bağıntılarda "m" birimindeki değerleri yazılmalıdır. Yukarıda verilen sayısal bağıntılardan ilki sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3$, ikinci bağıntı ise sayısal değerlerden maksimum $\pm\%8$ ve genel ortalama olarak $\pm\%3$ ve son bağıntı ise sayısal değerlerden maksimum $\pm\%20$ ve genel olarak $\pm\%8$ sapma gösterdikleri ölçülmüştür.

Gelişen boru akışında merkezi eksenel hız değişimleri incelenmiş ve maksimum olduğu akış mesafeleri ölçülmüştür. Bu mesafelerin Reynolds sayısı ile değişimleri her boru türü için incelenmiş ve sonuçta 10000'den büyük Reynolds sayılarında aşağıdaki sayısal bağıntı ile tahmin edilebildikleri görülmüştür.

$$\frac{X_{mak}}{D} = \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (28 - 0.00028 Re) \quad Re > 10000 \quad (8.7)$$

Bu sayısal bağıntı ile bulunan boyutsuz çap değerleri sayısal değerlerden ortalama olarak $\pm\%3.55$ ve maksimum olarak $\pm\%8$ sapma göstermişlerdir.

Bu sayısal çalışmanın deneysel bağıntılar ve literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada tam gelişmiş akış kısmındaki boyutsuz hız dağılımları çeper yasası, logaritmik yasa, Taishi vd. [34] ve Van Doorne ve Westerweel'in [5] deneysel hız profilleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yapılan sayısal boru çalışmalarının deneysel çalışmayla iyi uyum gösterdiği bulunmuştur.

Gelişen boru akışı için RANS çözüm tercih edilmesine rağmen LES ile pürüzsüz boru akışı ayrıca gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma FLUENT akış çözücü programıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı LES çözümü deney değerleriyle ve RANS çözümle karşılaştırmak ve türbülans akış özelliklerini görselleştirmek ve analiz etmektir. LES çalışması ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Bu çalışmada hız ve basıncın akış içerisindeki dağılımları renk kontörleriyle ve vektörlerle gösterilmiştir. Gelişen boru akışının gerçek akış görüntüsünü yakalama bakımından LES çözümün RANS çözümünden çok fark yarattığı görülmüştür.

LES çözümde istatistiksel statik basınç düşüş değerleri bakır boru deney değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bakır boru pürüzlülüğü çok düşük olduğundan hidrodinamik olarak pürüzsüz boru kabul edilen bir borudur. Boru akışı 0.2-1.3 m aralığındaki basınç düşüşü yönünden değerlendirildiğinde LES çözüm ortalama $\%14$ sapma, RANS çözüm ise $\%3$ kadar deney değerlerinden sapma göstermiştir. Burada RANS çözüm deney değerleriyle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Aynı zamanda bu basınç farkından hesaplanan Darcy sürtünme faktörü Reynolds sayısına bağlı değişimi Colebrook pürüzsüz boru denklemiyle, bakır boru deney değerleriyle ve RANS çözüm pürüzsüz boru değerleriyle karşılaştırılmıştır. Burada LES çözüm Colebrook pürüzsüz boru eğrisini deney değerlerine ve RANS çözüm değerlerine göre daha yüksek değerlerle izlemiştir.

LES çözümde merkezi eksenel hız değişimi RANS değerleriyle karşılaştırılmıştır. Burada, LES değerleri RANS değerlerini daha yüksek değerlerle izledikleri görülmüştür. Tam gelişmiş akışta LES ve RANS boyutsuz hız profilleri çeper yasası ve logaritmik yasa değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada RANS değerleri deneysel bağıntılarla uyurken LES değerleri ise yüksek sapma göstermiştir. Sonuç olarak LES basınç ve hız

değerleri deneysel bağıntı değerlerini ve bakır boru deney değerlerini daha yüksek değerlerle izlemiştir. Bunun sebebi olarak LES çözümün yeterli bir ağ çözünürlüğüne sahip olamamasıdır.

LES ile yapılan çalışmada çalkantı hız bileşenlerinin ve Reynolds gerilmelerin RMS değerleri hesaplanmış ve radyal yöndeki değişimleri incelenmiştir. Çalkantı hız bileşenleri ve Reynolds gerilmeleri duvara yakın bölgede yüksek değerlerde, duvarda sıfır ve boru merkezine yakın bölgelerde ise düşük değerlere sahip olmuşlardır. Çalkantı hız bileşenlerinin RMS değerleri de merkezi eksen boyunca incelenmiş ve RANS duvar kayma gerilmesi değişimine benzer parabolik bir değişime sahip oldukları görülmüştür.

Değişik Monitor noktalarında anlık statik basınç değerleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Tüm monitor noktalarında basınç çalkantıları aynı faz ve frekansta dalgalanmışlar fakat genlikleri farklı olmuştur

LES ile yapılan bu sayısal çalışma ağ çözünürlüğü yönünde yetersiz olduğu görülmüştür. Gelişen boru akışının tam çözümü için yüksek çözünürlüğe sahip ve yeteri uzunluğa sahip bir boru ile yeni bir LES çalışmasının yapılması ve bunun içinde paralel veya yüksek başarılı hesaplama yönteminden yararlanılması gerektiği öngörülmektedir.

9 ÖNERİLER

Yukarıda ayrıntılarıyla verilen deneysel ve sayısal çalışma sonucunda aşağıda önerilerin yapılmasına gerek duyulmuştur.

Yapılan deneysel boru akışlarında gelişme bölgesindeki statik basınç düşüş eğiminden hidrodinamik geçiş mesafesi tam net olarak analiz edilememiştir. Bu nedenle yapılacak deneysel boru akışlarında girişten tam gelişmiş akış şartlarını geçinceye kadar çok sayıda basınç prizinin kullanılması ve basınç okumalarının hassas olarak ölçülmesi gerektiği düşünülmektedir.

Deneysel çalışmalarda çapları birbirine yakın borular kullanılmıştır. Gelişme bölgesinin değişik boru çaplarındaki tam analizi için yeni deneysel çalışmaların yapılması önerilir.

Yapılan sayısal çalışma 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında yapılmıştır. Daha yüksek Reynolds sayılarında gelişen boru akışları sayısal olarak analiz edilebilir.

Yapılan sayısal çalışma beş farklı boru türü ile yapılmıştır. Gelişen boru akışında kritik ve geçiş mesafelerinin bulunması için bağıl pürüzlülük değerleri aynı olacak şekilde farklı çaptaki borularla yeni bir sayısal çalışma yapılabilir.

Sayısal çalışmada akış %7 türbülans yoğunluğuyla boruya girmektedir. Farklı giriş türbülans yoğunluklarıyla gelişen boru akışı için yeni bir sayısal çalışma bu konuda bir boşluğu dolduracaktır.

Çalışmalarda akışkan olarak su kullanılmıştır. Hava, yağ gibi diğer akışkanlarla yapılacak deneysel ve sayısal çalışma ile gelişen boru akış özelliklerinin, akışkana bağlı olup olmadığı daha detaylı çözümlenebilir.

LES ile sayısal çözümde yeterli uzunlukta bir boru kullanılamamış ve yeteri ağ çözünürlüğüne ise ulaşılamamıştı. Bu nedenle gelişen boru akışında akış özelliklerinin analiz edilebilmesi için giriş etkilerini kapsayacak şekilde yeteri uzunlukta bir boru mesafesinin ve yeteri çözünürlüğe sahip bir boru akışının LES ile çözülmesi konunun aydınlatılmasına katkıda bulunabilir. Böyle bir çalışmanın yapılabilmesi için paralel hesaplama yönteminin veya yüksek kapasiteli bir bilgisayarın kullanılmasının gerektiği açıktır.

10 KAYNAKLAR

- [1] Ansys 12.1 FLUENT Help ve CFX Help, Ansys Inc. Licance
- [2] Alp Marangoz, "Evaluation of A New Turbulence Model for Boundary Layer Flows With Pressure Gradient", a master thesis in METU, 2005
- [3] Bart A. Singer, "Modeling the Transition Region" High Technology Corporation Research Scientist Mail Stop 156, NASA Langley Research Center Hampton, VA 23681
- [4] C. F. Colebrook, "Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition between the Smooth and Rough Pipe Laws", Journal of the Institute of Civil Engineers London, 11 (1939), pp. 133–156.
- [5] C. W. H. van Doorne, J. Westerweel, "Measurement of Laminar, Transitional and Turbulent Pipe Flow Using Stereoscopic-PIV", Exp Fluids (2007) 42:259–279
- [6] F. M. White, "Fluid Mechanics", 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [7] Fabien Anselmet, Fabien Ternat, Muriel Amielh, Olivier Boiron, Patrick Boyer, Laurence Pietri, "Axial development of the mean flow in the entrance region of turbulent pipe and duct flows", ELSEVIER, C. R. Mecanique 337 (2009) 573–584
- [8] G.P. Celata, M. Cumo, G. Zummo, "Thermal–Hydraulic Characteristics of Single-Phase Flow in Capillary Pipes", Experimental Thermal and Fluid Science 28 (2004) 87– 95.
- [9] H. Asan ve L. Namlı, "Deneyisel Isı Transferi ve Basınç Kaybı Çalışmalarında Belirsizlik Analizi", ULIBTK 97, 11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Edirne ,369-378, 17-19 Eylül 1997
- [10] H. Schlichting, "Boundary Layer Theory", 6th edition, McGraw–Hill, New York, 1968.
- [11] H. Kanda, K. Oshima, "Numerical Study of the Entrance Flow and its Transition in a Circular Pipe", Japon Aerospace Exploration Agency, (1987) pp. 47-76.
- [12] H. Shan, Z. Zhang, F.T.M. Nieuwstadt, "Direct numerical simulation of transition in pipe flow under the influence of wall disturbances", International Journal of Heat and Fluid Flow 19 (1998) pp. 320-325.
- [13] Hidesada Kanda, Kenshuu Shimomukai, "Numerical study of pressure distribution in entrance pipe flow", ELSEVIER, Journal of Complexity, 2009

- [14] Hua Shan, Zhaoshun Zhang and F.T.M. Nieuwstadt, "Direct Numerical Simulation of Transition in the Pipe Flow with Roughness", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (1996) pp. 43-49.
- [15] K. Shimomukai, H. Kanda, "Numerical Study of Normal Pressure Distribution in Entrance Pipe Flow", *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, Volume 30 (2008), pp. 10-25.
- [16] L. F. Moody, "Friction Factors for Pipe Flows", *Transactions of the ASME*, 66 (1944), pp. 671-684.
- [17] Lars Davidson, "Turbulent Flow and Turbulence Modeling", Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology SE-412 96 Goteborg, Sweden <http://www.tfd.chalmers.se/lada>, lada@chalmers.se, August 17, 2011
- [18] Matthew T. Pittard, "Large Eddy Simulation Based Turbulent Flow-Induced Vibration of Fully Developed Pipe Flow", A thesis submitted to the faculty of Brigham Young University-2003
- [19] M.S. Bhatti and R. K. Shah, "Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts", *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, ed. S. Kakaç, R. K. Shah, and W. Aung. New York:Wiley Interscience, 1987.
- [20] M. Necati Özışık, "Heat Transfer A Basic Approach", New York: McGraw-Hill, 1985.
- [21] Mrutyunjaya Sahu, Prashant Singh, S.S. Mahapatra, K.K. Khatua, "Prediction of entrance length for low Reynolds number flow in pipe using neuro-fuzzy inference system"
- [22] Murat Uygun, Seyhan Onbaşıoğlu, Suat Avcı, "Turbulence Modeling for Computational Fluid Dynamics", *Journal of Aeronautics and Space Technologies* July 2004 volume 1 number 4 (19-26)
- [23] Murray Rudman, Hugh M. Blackburn, "Large Eddy Simulation of Turbulent Pipe Flow", second international conference on CFD in the Minerals and process industries, CSIRO, Melbourne, Australia 6-8 December 1999
- [24] J. Chen, G.X. Cui, C.X. Xu, Z.S. Zhang ve F.T.M. Nieuwstadt, "Numerical study of transition in a cylindrical pipe flow", *ELSEVIER, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 9 (2004) pp. 661-668.
- [25] J. Doherty, P.Ngan, J. Monty, M. Chong "The development of turbulent pipe flow", 16th Australian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, Gold Coast, Australia 2-7 December 2007.

- [26] J. Nikuradse, Gestzmassigkeiten der turbuleten stromung in glatten rohren, Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Translated in NASA TT F-10, 359, 1966, 3, 1932, 1-36
- [27] J.F. Douglas, J.M. Gasiorek, J.A. Swaffield, "Fluid Mechanics", third edition, Addison Wesley, Longman Limited, Edinburg Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England.
- [28] J.G.M. Eggels, "Direct and Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Cylindrical Pipe Geometry", Thesis Delf University of Technology, 1994, ISBN 90-6275-940-8
- [29] J.P. Holman "Experimental Methods for Engineers", 5th edition Mc-Graw Hill Company, New York, 1989
- [30] J. Peixinho ve T. Mullin, "Finite-Amplitude Thresholds for Transition in Pipe Flow", J. Fluid Mech., Vol. 582 (2007), pp. 169–178.
- [31] Per-Olov Asen, Gunilla Kreiss, Dietmar Rempfer, "Direct numerical simulations of localized disturbances in pipe Poiseuille flow", Computers and Fluids 39 (2010) pp. 926–935.
- [32] Perry, A.E. and Abell, C.J., "Scaling laws for pipe-flow turbulence", Journal of Fluid Mechanics, 67, 1978, 257-271.
- [33] Philip Christian Shalatter, "Large Eddy Simulation of Transition and Turbulence in Wall bounded Shear flows", Doctorate Thesis
- [34] T.Taishi, H.Kikura, M.Aritomi, "Effect of the measurement volume in the turbulent pipe flow measurement by the ultrasonic profile method", Experiments in fluids 32 (2002) 188-196
- [35] Satish G. Kandlikar, Levi A. Campbell, "Effect of Entrance Condition on Frictional Losses and Transition to Turbulence", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 17.22, 2002.
- [36] S.J. Kline and F.A. McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical engineering", 75, 3-8, 1953
- [37] Ugo Piomelli, Elias Balaras, Hugo Pasinato, Kyle D.Squires, Philippe R.Spalart, "The inner–outer layer interface in large-eddy simulations with wall-layer models", International Journal of Heat and Fluid Flow 24 (2003) 538–550
- [38] Ugo Piomelli, "Large-eddy and direct simulation of turbulent flows", Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland, USA.

- [39] *U. Sezer Nilay*, " Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Üç-Boyutlu Karmaşık Akış Problemlerinin Yüksek Başarımli Hesaplamaları", Makine Mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, nsezeruzol@etu.edu.tr
- [40] Wolfgang Rodi, "Prediction of laminar-turbulent transition with DNS, LES and RANS methods" University of Karlsruhe, Germany
- [41] W. M. Kays and M. E. Crawford, "Convective Heat and Mass Transfer", 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [42] Yong-hui Liu, Guang-sheng Du, Zheng-gang Liu, li Li, Li-li Tao, "The profile-linear average velocity for the transition in pipes based on the method of LES", 9th International Conferance on Hydrodinamiks, School of energy and power engineering, Shandong University, Jinan, China
- [43] Y. A. Çengel, J. M. Cimbala. "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları", Birinci baskıdan çeviri, İzmir-Güven Kitabevi, 2008.

11 EKLER

Tablo 11.1. Alüminyum boru deney değerleri

Alüminyum Boru		Deney 1:		u=0.15m/s		Re=4572			
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
10	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
15	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
20	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
25	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	136.791	24.427	0.057
30	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
35	175.874	173.920	171.965	156.332	166.103	162.195	143.630	18.564	0.043
40	175.874	173.920	171.965	156.332	166.103	162.195	143.630	18.564	0.043
45	175.874	173.920	171.965	156.332	166.103	162.195	143.630	18.564	0.043
50	175.874	175.874	172.942	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
55	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
60	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
65	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
70	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
75	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
80	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
85	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
90	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
95	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
100	175.874	173.920	170.011	159.263	166.103	161.218	146.561	14.656	0.034
Ortalama	175.874	174.603	171.330	158.824	166.103	161.364	145.633	15.731	0.037

Alüminyum Boru		Deney 2:					u=0.182m/s		Re=5539	
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f	
5	221.796	218.865	214.957	203.232	214.957	205.186	183.690	21.496	0.034	
10	214.957	214.957	212.025	198.346	205.186	205.186	170.988	34.198	0.054	
15	227.659	227.659	224.727	213.003	219.842	214.957	188.576	26.381	0.042	
20	227.659	227.659	224.727	213.003	219.842	214.957	185.644	29.312	0.046	
25	224.727	224.727	220.819	208.117	214.957	214.957	182.713	32.244	0.051	
30	228.636	227.659	224.727	214.957	220.819	214.957	185.644	29.312	0.046	
35	229.613	229.613	224.727	213.003	220.819	214.957	185.644	29.312	0.046	
40	227.659	227.659	222.773	208.117	219.842	214.957	185.644	29.312	0.046	
45	229.613	229.613	224.727	213.003	219.842	214.957	182.713	32.244	0.051	
50	227.659	227.659	222.773	208.117	214.957	210.071	181.736	28.335	0.045	
55	229.613	229.613	225.705	214.957	219.842	218.865	185.644	33.221	0.052	
60	224.727	224.727	219.842	208.117	219.842	214.957	175.874	39.083	0.062	
65	210.071	210.071	214.957	198.346	205.186	205.186	185.644	19.542	0.031	
70	214.957	214.957	214.957	203.232	214.957	210.071	180.759	29.312	0.046	
75	239.384	239.384	229.613	217.888	229.613	224.727	195.415	29.312	0.046	
80	224.727	224.727	221.796	208.117	219.842	214.957	185.644	29.312	0.046	
85	229.613	229.613	224.727	214.957	219.842	214.957	185.644	29.312	0.046	
90	244.269	239.384	232.544	222.773	229.613	224.727	185.644	39.083	0.062	
95	210.071	210.071	205.186	198.346	205.186	200.301	175.874	24.427	0.039	
100	219.842	219.842	214.957	203.232	210.071	205.186	185.644	19.542	0.031	
Ortalama	225.363	224.923	221.063	209.143	217.253	212.954	183.739	29.215	0.046	

Alüminyum Boru		Deney 3: u=0.267m/s					Re=8152		
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	351.747	337.091	332.206	325.366	332.206	317.550	273.581	43.968	0.032
10	332.206	322.435	317.550	305.825	302.894	298.008	244.269	53.739	0.039
15	361.518	341.977	332.206	325.366	332.206	317.550	244.269	73.281	0.054
20	361.518	327.320	322.435	310.710	312.664	302.894	273.581	29.312	0.021
25	322.435	351.747	341.977	325.366	337.091	322.435	244.269	78.166	0.057
30	341.977	332.206	322.435	315.596	322.435	307.779	273.581	34.198	0.025
35	341.977	371.289	366.404	344.908	341.977	337.091	263.811	73.281	0.054
40	341.977	312.664	307.779	296.054	293.123	293.123	283.352	9.771	0.007
45	332.206	341.977	337.091	320.481	327.320	312.664	234.498	78.166	0.057
50	332.206	322.435	322.435	305.825	317.550	302.894	283.352	19.542	0.014
55	341.977	317.550	312.664	300.939	298.008	298.008	273.581	24.427	0.018
60	351.747	351.747	351.747	329.275	337.091	327.320	263.811	63.510	0.047
65	341.977	356.633	351.747	325.366	340.022	330.252	244.269	85.983	0.063
70	341.977	355.656	346.862	344.908	351.747	346.862	263.811	83.051	0.061
75	341.977	337.091	322.435	315.596	317.550	312.664	244.269	68.395	0.050
80	332.206	322.435	298.008	276.513	337.091	283.352	283.352	0.000	0.000
85	361.518	322.435	322.435	310.710	307.779	312.664	254.040	58.625	0.043
90	341.977	341.977	322.435	315.596	317.550	312.664	273.581	39.083	0.029
95	351.747	322.435	319.504	305.825	312.664	307.779	244.269	63.510	0.047
100	361.518	332.206	327.320	318.527	317.550	312.664	263.811	48.854	0.036
Ortalama	344.419	336.065	328.884	315.938	322.826	312.811	261.368	51.443	0.038

Alüminyum Boru		Deney 4: u=0.346m/s					Re=10539		
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	445.547	429.913	420.143	413.303	410.372	405.487	322.435	83.051	0.036
10	444.570	424.051	420.143	399.624	396.693	390.830	322.435	68.395	0.030
15	478.767	468.996	464.111	447.501	444.570	435.776	341.977	93.799	0.041
20	467.042	459.226	451.409	426.982	429.913	420.143	332.206	87.937	0.038
25	429.913	420.143	415.257	398.647	390.830	384.968	302.894	82.074	0.036
30	466.065	459.226	449.455	427.959	434.799	429.913	351.747	78.166	0.034
35	429.913	417.211	410.372	398.647	390.830	381.060	322.435	58.625	0.026
40	459.226	449.455	442.615	423.074	426.982	417.211	332.206	85.006	0.037
45	459.226	449.455	439.684	420.143	424.051	415.257	322.435	92.822	0.040
50	464.111	449.455	443.593	423.074	429.913	420.143	332.206	87.937	0.038
55	439.684	420.143	417.211	398.647	400.601	390.830	332.206	58.625	0.026
60	439.684	429.913	420.143	403.532	410.372	400.601	332.206	68.395	0.030
65	445.547	429.913	420.143	408.418	410.372	400.601	327.320	73.281	0.032
70	459.226	449.455	429.913	418.189	427.959	416.234	332.206	84.029	0.037
75	459.226	449.455	439.684	423.074	424.051	414.280	341.977	72.304	0.032
80	468.996	463.134	452.386	432.845	439.684	429.913	341.977	87.937	0.038
85	478.767	472.905	465.088	447.501	449.455	434.799	341.977	92.822	0.040
90	491.469	478.767	468.996	449.455	455.317	434.799	341.977	92.822	0.040
95	456.294	449.455	433.822	419.166	415.257	404.509	341.977	62.533	0.027
100	468.996	462.157	453.363	427.959	434.799	425.028	332.206	92.822	0.040
Ortalama	457.614	446.621	437.877	420.387	422.341	412.619	332.450	80.169	0.035

Alüminyum Boru		Deney 5: u=0.399m/s					Re=12172		
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	586.246	566.704	562.796	540.323	540.323	532.506	433.822	98.685	0.032
10	566.704	566.704	556.933	550.094	542.277	532.506	410.372	122.135	0.040
15	586.246	556.933	560.842	545.208	531.529	527.621	420.143	107.478	0.035
20	592.108	571.589	566.704	547.163	547.163	537.392	429.913	107.478	0.035
25	599.925	566.704	566.704	555.956	547.163	537.392	429.913	107.478	0.035
30	566.704	556.933	547.163	524.690	524.690	512.965	410.372	102.593	0.034
35	566.704	556.933	547.163	525.667	527.621	517.850	420.143	97.708	0.032
40	571.589	547.163	547.163	525.667	527.621	517.850	410.372	107.478	0.035
45	576.475	556.933	547.163	530.552	532.506	522.736	410.372	112.364	0.037
50	566.704	547.163	547.163	520.782	527.621	517.850	420.143	97.708	0.032
55	571.589	552.048	547.163	530.552	527.621	517.850	415.257	102.593	0.034
60	566.704	552.048	542.277	520.782	522.736	517.850	420.143	97.708	0.032
65	576.475	552.048	542.277	525.667	527.621	517.850	415.257	102.593	0.034
70	556.933	540.323	527.621	514.919	512.965	503.194	415.257	87.937	0.029
75	535.438	517.850	512.965	491.469	488.538	478.767	390.830	87.937	0.029
80	566.704	542.277	533.972	520.782	522.736	512.965	400.601	112.364	0.037
85	586.246	564.750	556.933	540.323	542.277	527.621	410.372	117.249	0.038
90	547.163	532.506	520.782	511.011	511.011	498.309	400.601	97.708	0.032
95	542.277	527.621	517.850	507.102	498.309	494.400	400.601	93.799	0.031
100	571.589	553.025	547.163	530.552	527.621	517.850	415.257	102.593	0.034
Ortalama	570.026	551.413	544.940	527.963	526.497	517.166	413.987	103.179	0.034

Alüminyum Boru		Deney 6: u=0.516m/s					Re=15712		
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	898.910	864.712	859.827	833.446	825.629	810.973	635.099	175.874	0.034
10	898.910	859.827	853.964	828.560	820.744	806.088	635.099	170.988	0.034
15	884.254	859.827	853.964	828.560	820.744	796.317	635.099	161.218	0.032
20	884.254	859.827	854.942	823.675	820.744	796.317	630.214	166.103	0.033
25	879.368	854.942	850.056	818.790	810.973	791.432	630.214	161.218	0.032
30	879.368	859.827	850.056	818.790	810.973	791.432	625.329	166.103	0.033
35	884.254	859.827	854.942	823.675	820.744	796.317	630.214	166.103	0.033
40	889.139	859.827	854.942	833.446	823.675	801.202	630.214	170.988	0.034
45	908.681	879.368	869.598	846.148	834.423	815.858	635.099	180.759	0.035
50	879.368	859.827	850.056	818.790	810.973	791.432	630.214	161.218	0.032
55	894.025	869.598	859.827	833.446	825.629	806.088	635.099	170.988	0.034
60	874.483	850.056	840.285	804.134	801.202	781.661	620.443	161.218	0.032
65	928.222	889.139	884.254	862.758	854.942	830.515	639.985	190.530	0.037
70	879.368	859.827	850.056	818.790	810.973	791.432	635.099	156.332	0.031
75	874.483	850.056	840.285	809.019	806.088	781.661	615.558	166.103	0.033
80	859.827	840.285	923.337	794.363	791.432	771.890	625.329	146.561	0.029
85	889.139	859.827	854.942	828.560	820.744	798.271	622.397	175.874	0.034
90	884.254	863.735	854.942	823.675	815.858	796.317	625.329	170.988	0.034
95	879.368	854.942	845.171	813.904	806.088	791.432	610.673	180.759	0.035
100	859.827	840.285	825.629	794.363	791.432	767.005	625.329	141.676	0.028
Ortalama	885.475	859.778	856.554	822.845	816.200	795.682	628.602	167.080	0.033

Alüminyum Boru		Deney 7:			u=0.59m/s		Re=18004		
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1074.784	1035.701	1025.930	999.549	986.847	962.420	752.349	210.071	0.032
10	1084.554	1045.471	1035.701	1009.320	1001.503	967.305	757.234	210.071	0.032
15	1074.784	1040.586	1030.815	999.549	986.847	962.420	752.349	210.071	0.032
20	1055.242	1025.930	1006.388	984.893	972.191	942.878	732.807	210.071	0.032
25	1074.784	1045.471	1035.701	1009.320	996.618	967.305	752.349	214.957	0.032
30	1045.471	1025.930	1006.388	980.007	967.305	942.878	752.349	190.530	0.029
35	1065.013	1030.815	1016.159	989.778	977.076	947.764	752.349	195.415	0.029
40	1069.898	1040.586	1030.815	999.549	986.847	957.534	732.807	224.727	0.034
45	1050.357	1016.159	1001.503	980.007	962.420	937.993	732.807	205.186	0.031
50	1055.242	1021.044	1006.388	980.007	967.305	947.764	737.692	210.071	0.032
55	1055.242	1025.930	1006.388	984.893	967.305	947.764	742.578	205.186	0.031
60	1045.471	1021.044	996.618	975.122	962.420	937.993	732.807	205.186	0.031
65	1055.242	1025.930	1011.274	984.893	977.076	947.764	742.578	205.186	0.031
70	1055.242	1025.930	1006.388	980.007	972.191	942.878	732.807	210.071	0.032
75	1055.242	1025.930	1006.388	980.007	972.191	942.878	737.692	205.186	0.031
80	1040.586	1006.388	996.618	970.236	957.534	937.993	732.807	205.186	0.031
85	1055.242	1030.815	1006.388	980.007	967.305	942.878	732.807	210.071	0.032
90	1035.701	1006.388	991.732	970.236	957.534	933.108	732.807	200.301	0.030
95	1065.013	1030.815	1016.159	989.778	977.076	947.764	752.349	195.415	0.029
100	1069.898	1035.701	1025.930	989.778	983.916	957.534	737.692	219.842	0.033
Ortalama	1059.150	1028.128	1012.984	986.847	974.975	948.741	741.601	207.140	0.031

Alüminyum Boru		Deney 8:			u=0.69m/s		Re=21043		
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1363.021	1319.053	1299.511	1273.130	1245.772	1215.483	952.649	262.833	0.029
10	1338.594	1299.511	1275.084	1248.703	1231.116	1192.033	937.993	254.040	0.028
15	1338.594	1299.511	1279.970	1248.703	1221.345	1196.918	933.108	263.811	0.029
20	1348.365	1309.282	1289.740	1263.359	1240.887	1201.803	947.764	254.040	0.028
25	1367.906	1323.938	1309.282	1273.130	1250.657	1221.345	942.878	278.467	0.031
30	1358.136	1323.938	1299.511	1268.245	1245.772	1211.574	952.649	258.925	0.028
35	1358.136	1319.053	1299.511	1273.130	1250.657	1211.574	937.993	273.581	0.030
40	1341.525	1299.511	1284.855	1253.589	1236.001	1196.918	947.764	249.154	0.027
45	1358.136	1319.053	1299.511	1273.130	1245.772	1211.574	937.993	273.581	0.030
50	1358.136	1319.053	1299.511	1263.359	1245.772	1211.574	957.534	254.040	0.028
55	1363.021	1323.938	1299.511	1273.130	1245.772	1211.574	947.764	263.811	0.029
60	1343.480	1309.282	1284.855	1253.589	1231.116	1206.689	947.764	258.925	0.028
65	1338.594	1299.511	1279.970	1248.703	1226.230	1201.803	947.764	254.040	0.028
70	1358.136	1319.053	1299.511	1263.359	1245.772	1211.574	947.764	263.811	0.029
75	1353.250	1319.053	1294.626	1263.359	1240.887	1211.574	947.764	263.811	0.029
80	1372.792	1328.823	1314.167	1278.015	1255.543	1221.345	952.649	268.696	0.029
85	1338.594	1299.511	1284.855	1247.726	1231.116	1201.803	952.649	249.154	0.027
90	1367.906	1314.167	1299.511	1268.245	1245.772	1211.574	957.534	254.040	0.028
95	1358.136	1319.053	1299.511	1268.245	1245.772	1211.574	942.878	268.696	0.029
100	1363.021	1319.053	1299.511	1268.245	1245.772	1211.574	952.649	258.925	0.028
Ortalama	1354.374	1314.167	1294.626	1263.555	1241.375	1208.594	947.275	261.319	0.029

Tablo 11.2. Bakır boru deney değerleri

Bakır Boru		Deney 1:				u=0.142 m/s		Re=4326	
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	227.659	218.865	214.957	214.957	219.842	210.071	222.773	-12.702	-0.033
10	239.384	239.384	232.544	227.659	234.498	224.727	217.888	6.840	0.018
15	239.384	239.384	232.544	227.659	234.498	224.727	217.888	6.840	0.018
20	266.742	273.581	254.040	254.040	258.925	249.154	232.544	16.610	0.043
25	254.040	254.040	239.384	244.269	242.315	232.544	213.003	19.542	0.051
30	234.498	234.498	224.727	224.727	229.613	219.842	213.003	6.840	0.018
35	234.498	234.498	224.727	228.636	230.590	220.819	213.003	7.817	0.020
40	234.498	234.498	224.727	228.636	230.590	220.819	213.003	7.817	0.020
45	234.498	234.498	224.727	228.636	230.590	220.819	213.003	7.817	0.020
50	234.498	239.384	224.727	224.727	224.727	214.957	213.003	1.954	0.005
55	234.498	239.384	224.727	221.796	224.727	214.957	213.003	1.954	0.005
60	234.498	239.384	234.498	229.613	234.498	224.727	222.773	1.954	0.005
65	234.498	239.384	234.498	229.613	229.613	224.727	213.003	11.725	0.030
70	234.498	234.498	224.727	229.613	234.498	224.727	213.003	11.725	0.030
75	234.498	234.498	224.727	229.613	234.498	224.727	203.232	21.496	0.056
80	234.498	234.498	224.727	227.659	229.613	224.727	213.003	11.725	0.030
85	234.498	234.498	224.727	224.727	229.613	219.842	217.888	1.954	0.005
90	234.498	234.498	224.727	224.727	229.613	219.842	213.003	6.840	0.018
95	234.498	234.498	224.727	224.727	229.613	219.842	213.003	6.840	0.018
100	234.498	234.498	224.727	224.727	229.613	219.842	213.003	6.840	0.018
Ortalama	237.234	238.113	228.196	228.538	232.104	222.822	215.201	7.621	0.020

Bakır Boru	Deney 2: u=0.188 m/s						Re=5738		
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	293.123	302.894	283.352	283.352	291.169	281.398	261.856	19.542	0.029
10	288.237	295.077	278.467	283.352	283.352	283.352	261.856	21.496	0.032
15	289.214	296.054	279.444	276.513	273.581	283.352	261.856	21.496	0.032
20	306.802	312.664	293.123	293.123	293.123	288.237	281.398	6.840	0.010
25	302.894	312.664	293.123	288.237	293.123	288.237	261.856	26.381	0.039
30	293.123	302.894	286.283	283.352	293.123	288.237	261.856	26.381	0.039
35	239.384	239.384	224.727	229.613	234.498	234.498	242.315	-7.817	-0.012
40	302.894	307.779	298.008	293.123	293.123	283.352	261.856	21.496	0.032
45	283.352	288.237	278.467	273.581	273.581	283.352	242.315	41.037	0.061
50	341.977	356.633	341.977	332.206	332.206	322.435	281.398	41.037	0.061
55	332.206	341.977	332.206	332.206	332.206	322.435	281.398	41.037	0.061
60	302.894	307.779	293.123	288.237	293.123	283.352	271.627	11.725	0.017
65	322.435	322.435	316.573	312.664	307.779	298.008	291.169	6.840	0.010
70	175.874	180.759	175.874	166.103	170.011	161.218	213.003	-51.785	-0.076
75	332.206	332.206	322.435	317.550	327.320	312.664	291.169	21.496	0.032
80	283.352	283.352	273.581	268.696	263.811	263.811	252.086	11.725	0.017
85	302.894	307.779	298.008	298.008	293.123	283.352	271.627	11.725	0.017
90	317.550	329.275	312.664	258.925	263.811	258.925	266.742	-7.817	-0.012
95	322.435	329.275	322.435	322.435	326.343	312.664	281.398	31.266	0.046
100	302.894	307.779	283.352	283.352	288.237	283.352	261.856	21.496	0.032
Ortalama	296.787	302.845	289.361	284.231	286.332	280.812	265.032	15.780	0.023

Bakır Boru		Deney 3:		u=0.255 m/s		Re=7785			
	Statik Basınç, P (Pa)					ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	408.418	400.601	390.830	388.876	390.830	381.060	340.022	41.037	0.033
10	410.372	410.372	398.647	400.601	395.716	381.060	340.022	41.037	0.033
15	410.372	410.372	395.716	390.830	390.830	381.060	340.022	41.037	0.033
20	408.418	407.441	390.830	390.830	390.830	381.060	340.022	41.037	0.033
25	410.372	410.372	395.716	398.647	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
30	410.372	410.372	395.716	400.601	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
35	410.372	410.372	395.716	400.601	397.670	381.060	340.022	41.037	0.033
40	410.372	410.372	397.670	400.601	394.739	381.060	340.022	41.037	0.033
45	410.372	410.372	398.647	400.601	394.739	381.060	340.022	41.037	0.033
50	410.372	410.372	395.716	400.601	394.739	381.060	340.022	41.037	0.033
55	410.372	410.372	395.716	390.830	394.739	381.060	340.022	41.037	0.033
60	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
65	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
70	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
75	410.372	410.372	400.601	400.601	400.601	381.060	340.022	41.037	0.033
80	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
85	410.372	410.372	400.601	400.601	396.693	381.060	340.022	41.037	0.033
90	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
95	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
100	410.372	410.372	395.716	390.830	392.785	381.060	340.022	41.037	0.033
Ortalama	410.177	409.737	396.107	395.032	393.859	381.060	340.022	41.037	0.033

Bakır Boru		Deney 4:		u=0.295 m/s		Re=9002			
	Statik Basınç, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	420.143	415.257	400.601	405.487	408.418	387.899	340.022	47.877	0.029
10	444.570	434.799	425.028	429.913	434.799	425.028	369.335	55.693	0.033
15	454.340	454.340	439.684	434.799	439.684	429.913	379.105	50.808	0.030
20	454.340	449.455	439.684	434.799	439.684	429.913	369.335	60.579	0.036
25	454.340	449.455	439.684	434.799	439.684	429.913	369.335	60.579	0.036
30	473.882	459.226	444.570	444.570	444.570	434.799	369.335	65.464	0.039
35	478.767	468.996	459.226	454.340	459.226	449.455	388.876	60.579	0.036
40	454.340	449.455	439.684	434.799	439.684	425.028	369.335	55.693	0.033
45	468.996	454.340	444.570	444.570	443.593	429.913	388.876	41.037	0.025
50	459.226	449.455	439.684	434.799	439.684	429.913	379.105	50.808	0.030
55	456.294	453.363	439.684	429.913	439.684	429.913	369.335	60.579	0.036
60	454.340	454.340	439.684	434.799	439.684	429.913	379.105	50.808	0.030
65	471.928	454.340	439.684	444.570	439.684	429.913	379.105	50.808	0.030
70	425.028	420.143	410.372	410.372	410.372	400.601	359.564	41.037	0.025
75	454.340	449.455	439.684	433.822	439.684	425.028	379.105	45.923	0.028
80	465.088	454.340	444.570	439.684	444.570	434.799	388.876	45.923	0.028
85	471.928	459.226	449.455	449.455	449.455	439.684	379.105	60.579	0.036
90	454.340	454.340	439.684	439.684	443.593	429.913	369.335	60.579	0.036
95	439.684	434.799	425.028	424.051	425.028	415.257	369.335	45.923	0.028
100	449.455	445.547	435.776	429.913	434.799	425.028	369.335	55.693	0.033
Ortalama	455.269	448.234	436.802	434.457	437.779	426.591	373.243	53.348	0.032

Bakır Boru		Deney 5:					u=0.364 m/s		Re=11079	
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f	
5	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
10	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
15	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
20	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
25	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
30	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
35	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
40	556.933	552.048	532.506	527.621	527.621	517.850	437.730	80.120	0.032	
45	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
50	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
55	566.704	550.094	537.392	537.392	537.392	527.621	437.730	89.891	0.035	
60	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
65	547.163	542.277	522.736	525.667	517.850	508.080	437.730	70.349	0.028	
70	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	437.730	78.166	0.031	
75	552.048	547.163	527.621	525.667	525.667	515.896	447.501	68.395	0.027	
80	547.163	542.277	522.736	525.667	517.850	508.080	437.730	70.349	0.028	
85	547.163	542.277	522.736	525.667	517.850	508.080	437.730	70.349	0.028	
90	547.163	542.277	522.736	525.667	517.850	508.080	437.730	70.349	0.028	
95	542.277	537.392	517.850	517.850	517.850	508.080	437.730	70.349	0.028	
100	552.048	547.163	527.621	527.621	527.621	517.850	437.730	80.120	0.032	
Ortalama	551.559	546.088	526.888	526.058	524.494	514.724	438.219	76.505	0.030	

Bakır Boru		Deney 6:			u=0.436 m/s		Re=13295		
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	752.349	742.578	723.036	723.036	713.265	703.495	594.062	109.433	0.030
10	747.463	740.624	725.967	720.105	713.265	703.495	584.291	119.203	0.033
15	762.119	747.463	732.807	723.036	713.265	703.495	584.291	119.203	0.033
20	736.715	730.853	713.265	703.495	693.724	683.953	584.291	99.662	0.027
25	737.692	732.807	713.265	703.495	693.724	683.953	584.291	99.662	0.027
30	742.578	737.692	723.036	713.265	703.495	693.724	584.291	109.433	0.030
35	742.578	737.692	723.036	718.151	703.495	693.724	584.291	109.433	0.030
40	747.463	742.578	723.036	713.265	708.380	693.724	584.291	109.433	0.030
45	737.692	732.807	713.265	703.495	693.724	683.953	584.291	99.662	0.027
50	713.265	698.609	674.182	674.182	664.412	654.641	574.521	80.120	0.022
55	820.744	814.881	810.973	796.317	781.661	762.119	594.062	168.057	0.046
60	710.334	703.495	683.953	674.182	674.182	659.526	564.750	94.776	0.026
65	791.432	781.661	757.234	744.532	742.578	732.807	574.521	158.286	0.043
70	723.036	723.036	708.380	693.724	693.724	674.182	535.438	138.745	0.038
75	757.234	747.463	737.692	723.036	713.265	703.495	564.750	138.745	0.038
80	747.463	742.578	723.036	719.128	708.380	693.724	584.291	109.433	0.030
85	758.211	746.486	723.036	723.036	713.265	703.495	584.291	119.203	0.033
90	747.463	737.692	717.174	713.265	708.380	698.609	594.062	104.547	0.029
95	762.119	747.463	732.807	732.807	720.105	710.334	623.374	86.960	0.024
100	757.234	742.578	723.036	713.265	708.380	698.609	584.291	114.318	0.031
Ortalama	749.759	741.552	724.111	716.441	708.234	696.753	582.337	114.416	0.031

Bakır Boru		Deney 7:		u=0.52 m/s		Re=15856			
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1016.159	1006.388	986.847	977.076	962.420	942.878	779.707	163.172	0.032
10	1021.044	1011.274	986.847	977.076	962.420	942.878	804.134	138.745	0.027
15	1074.784	1074.784	1050.357	1035.701	1025.930	996.618	769.936	226.682	0.044
20	991.732	986.847	957.534	952.649	937.993	918.451	750.394	168.057	0.032
25	1040.586	1035.701	1006.388	991.732	986.847	962.420	774.821	187.599	0.036
30	1006.388	996.618	977.076	957.534	952.649	923.337	750.394	172.942	0.033
35	991.732	991.732	977.076	967.305	957.534	928.222	730.853	197.369	0.038
40	1055.242	1050.357	1035.701	1021.044	1011.274	991.732	799.248	192.484	0.037
45	981.961	972.191	952.649	947.764	933.108	913.566	769.936	143.630	0.028
50	986.847	986.847	967.305	957.534	947.764	928.222	745.509	182.713	0.035
55	1001.503	996.618	972.191	957.534	947.764	923.337	809.019	114.318	0.022
60	928.222	918.451	898.910	889.139	879.368	859.827	721.082	138.745	0.027
65	1025.930	1016.159	996.618	981.961	972.191	947.764	799.248	148.516	0.029
70	1074.784	1065.013	1045.471	1035.701	1025.930	1001.503	779.707	221.796	0.043
75	996.618	991.732	972.191	957.534	947.764	928.222	779.707	148.516	0.029
80	937.993	928.222	898.910	894.025	879.368	859.827	750.394	109.433	0.021
85	1021.044	1011.274	991.732	977.076	967.305	942.878	809.019	133.859	0.026
90	1050.357	1040.586	1021.044	1006.388	996.618	967.305	809.019	158.286	0.031
95	889.139	869.598	850.056	845.171	840.285	820.744	730.853	89.891	0.017
100	1016.159	1006.388	986.847	967.305	962.420	937.993	794.363	143.630	0.028
Ortalama	1005.411	997.839	976.587	964.863	954.848	931.886	772.867	159.019	0.031

Bakır Boru		Deney 8:		u=0.604 m/s		Re=18387			
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1299.511	1289.740	1260.428	1236.001	1221.345	1196.918	999.549	197.369	0.028
10	1260.428	1245.772	1221.345	1201.803	1192.033	1162.720	975.122	187.599	0.027
15	1255.543	1240.887	1216.460	1201.803	1182.262	1152.950	965.351	187.599	0.027
20	1250.657	1240.887	1221.345	1196.918	1182.262	1162.720	965.351	197.369	0.028
25	1260.428	1250.657	1226.230	1206.689	1192.033	1162.720	975.122	187.599	0.027
30	1260.428	1250.657	1221.345	1206.689	1192.033	1162.720	975.122	187.599	0.027
35	1265.313	1253.589	1226.230	1211.574	1196.918	1167.606	975.122	192.484	0.028
40	1265.313	1253.589	1231.116	1206.689	1201.803	1172.491	975.122	197.369	0.028
45	1260.428	1250.657	1226.230	1206.689	1196.918	1162.720	975.122	187.599	0.027
50	1260.428	1250.657	1226.230	1201.803	1196.918	1162.720	975.122	187.599	0.027
55	1260.428	1250.657	1226.230	1201.803	1196.918	1162.720	975.122	187.599	0.027
60	1231.116	1221.345	1196.918	1177.377	1162.720	1138.294	965.351	172.942	0.025
65	1260.428	1250.657	1226.230	1206.689	1192.033	1162.720	975.122	187.599	0.027
70	1250.657	1240.887	1221.345	1192.033	1182.262	1162.720	965.351	197.369	0.028
75	1255.543	1245.772	1226.230	1201.803	1187.147	1162.720	975.122	187.599	0.027
80	1236.001	1226.230	1201.803	1187.147	1172.491	1150.018	945.810	204.209	0.029
85	1265.313	1255.543	1231.116	1201.803	1196.918	1162.720	965.351	197.369	0.028
90	1240.887	1236.001	1216.460	1192.033	1182.262	1157.835	965.351	192.484	0.028
95	1260.428	1250.657	1226.230	1194.964	1192.033	1162.720	965.351	197.369	0.028
100	1250.657	1240.887	1221.345	1192.033	1177.377	1152.950	965.351	187.599	0.027
Ortalama	1257.497	1247.286	1223.543	1201.217	1189.834	1162.085	970.969	191.116	0.027

Bakır Boru	Deney 9:					u=0.692 m/s	Re=21077		
	Statik Basıncı, P (Pa)					ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1582.863	1563.322	1534.009	1504.697	1490.041	1455.843	1219.391	236.452	0.026
10	1587.749	1573.092	1543.780	1517.399	1497.858	1465.614	1219.391	246.223	0.027
15	1592.634	1582.863	1553.551	1534.009	1509.582	1480.270	1219.391	260.879	0.028
20	1582.863	1573.092	1543.780	1524.239	1499.812	1465.614	1219.391	246.223	0.027
25	1563.322	1553.551	1524.239	1504.697	1475.385	1446.072	1204.735	241.338	0.026
30	1592.634	1582.863	1548.665	1524.239	1504.697	1470.499	1224.276	246.223	0.027
35	1602.405	1587.749	1553.551	1529.124	1514.468	1480.270	1219.391	260.879	0.028
40	1563.322	1553.551	1514.468	1494.926	1475.385	1441.187	1199.849	241.338	0.026
45	1577.978	1563.322	1524.239	1504.697	1485.156	1455.843	1214.505	241.338	0.026
50	1592.634	1579.932	1548.665	1529.124	1509.582	1475.385	1219.391	255.994	0.028
55	1577.978	1563.322	1529.124	1514.468	1494.926	1455.843	1204.735	251.109	0.027
60	1582.863	1573.092	1534.009	1504.697	1485.156	1455.843	1219.391	236.452	0.026
65	1582.863	1573.092	1534.009	1524.239	1494.926	1465.614	1219.391	246.223	0.027
70	1587.749	1582.863	1548.665	1529.124	1504.697	1475.385	1219.391	255.994	0.028
75	1587.749	1573.092	1543.780	1524.239	1504.697	1470.499	1209.620	260.879	0.028
80	1577.978	1573.092	1534.009	1514.468	1499.812	1465.614	1209.620	255.994	0.028
85	1573.092	1563.322	1531.078	1504.697	1485.156	1455.843	1219.391	236.452	0.026
90	1582.863	1573.092	1538.895	1524.239	1499.812	1465.614	1219.391	246.223	0.027
95	1582.863	1573.092	1538.895	1514.468	1490.041	1455.843	1209.620	246.223	0.027
100	1597.519	1587.749	1563.322	1529.124	1514.468	1475.385	1219.391	255.994	0.028
Ortalama	1583.596	1572.457	1539.237	1517.546	1496.783	1463.904	1215.483	248.422	0.027

Tablo 11.3. Demir boru deney değerleri

Demir Boru	Deney 1:				u=0.11 m/s		Re=3609		
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	125.066	120.180	115.295	125.066	126.043	125.066	111.387	13.679	0.064
10	127.020	123.112	119.203	129.951	130.928	125.066	111.387	13.679	0.064
15	125.066	120.180	115.295	127.020	126.043	120.180	111.387	8.794	0.041
20	125.066	120.180	115.295	127.020	126.043	120.180	116.272	3.908	0.018
25	128.974	120.180	115.295	127.020	126.043	120.180	111.387	8.794	0.041
30	121.157	117.249	115.295	122.135	121.157	120.180	111.387	8.794	0.041
35	159.263	164.149	154.378	156.332	155.355	154.378	130.928	23.450	0.109
40	159.263	164.149	159.263	156.332	160.240	154.378	121.157	33.221	0.154
45	139.722	134.836	134.836	136.791	140.699	134.836	130.928	3.908	0.018
50	134.836	129.951	125.066	131.905	130.928	125.066	116.272	8.794	0.041
55	134.836	129.951	125.066	131.905	130.928	125.066	116.272	8.794	0.041
60	134.836	129.951	125.066	128.974	128.974	123.112	116.272	6.840	0.032
65	134.836	129.951	125.066	128.974	128.974	123.112	116.272	6.840	0.032
70	134.836	129.951	125.066	131.905	133.859	129.951	111.387	18.564	0.086
75	129.951	125.066	120.180	128.974	130.928	125.066	111.387	13.679	0.064
80	134.836	129.951	125.066	128.974	130.928	125.066	111.387	13.679	0.064
85	164.149	164.149	159.263	161.218	165.126	159.263	150.470	8.794	0.041
90	115.295	110.410	105.524	107.478	116.272	105.524	116.272	-10.748	-0.050
95	134.836	129.951	125.066	131.905	130.928	125.066	116.272	8.794	0.041
100	139.722	134.836	129.951	131.905	135.814	129.951	116.272	13.679	0.064
Ortalama	135.178	131.417	126.727	132.589	133.811	128.534	117.738	10.797	0.050

Demir Boru		Deney 2:		u=0.165 m/s		Re=5422			
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	208.117	203.232	198.346	200.301	189.553	195.415	165.126	30.289	0.063
10	203.232	198.346	193.461	195.415	189.553	191.507	170.011	21.496	0.044
15	193.461	188.576	183.690	180.759	184.667	183.690	184.667	-0.977	-0.002
20	207.140	203.232	198.346	200.301	194.438	198.346	176.851	21.496	0.044
25	211.048	208.117	203.232	205.186	199.324	198.346	179.782	18.564	0.038
30	208.117	203.232	199.324	200.301	199.324	198.346	174.897	23.450	0.048
35	208.117	203.232	198.346	200.301	199.324	198.346	174.897	23.450	0.048
40	203.232	203.232	198.346	195.415	189.553	193.461	174.897	18.564	0.038
45	208.117	203.232	198.346	205.186	199.324	198.346	179.782	18.564	0.038
50	213.003	208.117	203.232	205.186	199.324	198.346	176.851	21.496	0.044
55	203.232	198.346	193.461	196.392	193.461	193.461	176.851	16.610	0.034
60	213.003	213.003	209.094	205.186	204.209	203.232	179.782	23.450	0.048
65	208.117	203.232	198.346	205.186	204.209	203.232	179.782	23.450	0.048
70	198.346	193.461	188.576	190.530	189.553	188.576	174.897	13.679	0.028
75	220.819	217.888	213.003	210.071	209.094	208.117	194.438	13.679	0.028
80	203.232	198.346	193.461	200.301	199.324	198.346	170.011	28.335	0.059
85	203.232	198.346	193.461	200.301	199.324	198.346	170.011	28.335	0.059
90	217.888	213.003	208.117	205.186	204.209	203.232	189.553	13.679	0.028
95	208.117	203.232	198.346	200.301	199.324	198.346	170.011	28.335	0.059
100	208.117	203.232	198.346	200.301	199.324	198.346	179.782	18.564	0.038
Ortalama	207.384	203.232	198.444	200.105	197.320	197.369	177.144	20.225	0.042

Demir Boru		Deney 3:		u=0.216 m/s		Re=7101			
	Statik Basıncı, P (Pa)					ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	271.627	266.742	261.856	258.925	262.833	252.086	218.865	33.221	0.040
10	271.627	266.742	261.856	258.925	262.833	252.086	228.636	23.450	0.028
15	261.856	256.971	252.086	258.925	257.948	237.429	238.407	-0.977	-0.001
20	276.513	271.627	261.856	268.696	262.833	252.086	228.636	23.450	0.028
25	271.627	266.742	261.856	268.696	170.011	159.263	218.865	-59.602	-0.072
30	266.742	261.856	256.971	258.925	257.948	247.200	218.865	28.335	0.034
35	271.627	266.742	261.856	258.925	257.948	247.200	218.865	28.335	0.034
40	271.627	266.742	261.856	268.696	262.833	252.086	228.636	23.450	0.028
45	271.627	266.742	261.856	268.696	267.719	256.971	218.865	38.106	0.046
50	281.398	271.627	266.742	268.696	267.719	256.971	218.865	38.106	0.046
55	266.742	261.856	256.971	258.925	257.948	247.200	228.636	18.564	0.022
60	281.398	276.513	271.627	268.696	267.719	256.971	218.865	38.106	0.046
65	271.627	266.742	261.856	258.925	257.948	247.200	228.636	18.564	0.022
70	261.856	256.971	252.086	249.154	248.177	237.429	228.636	8.794	0.011
75	271.627	266.742	261.856	258.925	257.948	247.200	228.636	18.564	0.022
80	276.513	271.627	261.856	263.811	262.833	252.086	228.636	23.450	0.028
85	261.856	256.971	252.086	254.040	248.177	237.429	223.750	13.679	0.016
90	271.627	266.742	261.856	258.925	257.948	247.200	218.865	28.335	0.034
95	271.627	266.742	261.856	261.856	262.833	252.086	218.865	33.221	0.040
100	276.513	271.627	266.742	265.765	262.833	252.086	228.636	23.450	0.028
Ortalama	271.383	266.253	260.879	261.856	255.750	244.513	224.483	20.030	0.024

Demir Boru		Deney 4:		u=0.324 m/s		Re=10643			
	Statik Basınc, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	452.386	447.501	442.615	444.570	433.822	417.211	365.426	51.785	0.028
10	460.203	454.340	447.501	444.570	433.822	421.120	355.656	65.464	0.035
15	457.272	452.386	444.570	434.799	433.822	419.166	360.541	58.625	0.031
20	457.272	447.501	442.615	437.730	433.822	420.143	355.656	64.487	0.035
25	452.386	442.615	437.730	438.707	428.936	418.189	360.541	57.647	0.031
30	457.272	447.501	442.615	439.684	433.822	418.189	355.656	62.533	0.033
35	457.272	447.501	440.661	439.684	433.822	418.189	355.656	62.533	0.033
40	437.730	431.868	423.074	420.143	409.395	398.647	345.885	52.762	0.028
45	455.317	445.547	437.730	434.799	433.822	418.189	355.656	62.533	0.033
50	463.134	455.317	445.547	434.799	433.822	418.189	350.770	67.418	0.036
55	442.615	432.845	423.074	425.028	414.280	398.647	345.885	52.762	0.028
60	442.615	437.730	427.959	422.097	419.166	403.532	365.426	38.106	0.020
65	447.501	442.615	432.845	429.913	424.051	408.418	345.885	62.533	0.033
70	442.615	437.730	430.891	422.097	414.280	400.601	345.885	54.716	0.029
75	447.501	442.615	437.730	434.799	429.913	413.303	350.770	62.533	0.033
80	454.340	447.501	437.730	434.799	433.822	418.189	350.770	67.418	0.036
85	450.432	442.615	437.730	429.913	427.959	413.303	341.977	71.327	0.038
90	449.455	442.615	437.730	427.959	428.936	417.211	345.885	71.327	0.038
95	447.501	443.593	437.730	425.028	426.982	413.303	345.885	67.418	0.036
100	447.501	442.615	437.730	429.913	428.936	413.303	355.656	57.647	0.031
Ortalama	451.116	444.228	437.290	432.552	427.862	413.352	352.773	60.579	0.032

Demir Boru		Deney 5:		u=0.424 m/s		Re=13907			
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	734.761	718.151	711.311	718.151	697.632	686.884	565.727	121.157	0.038
10	804.134	794.363	789.477	776.775	766.028	742.578	565.727	176.851	0.055
15	733.784	723.036	711.311	708.380	697.632	677.114	580.383	96.731	0.030
20	769.936	745.509	740.624	732.807	722.059	700.563	580.383	120.180	0.038
25	750.394	737.692	725.967	723.036	713.265	691.770	585.269	106.501	0.033
30	755.280	745.509	734.761	723.036	713.265	696.655	585.269	111.387	0.035
35	757.234	746.486	736.715	727.922	714.243	696.655	580.383	116.272	0.036
40	760.165	746.486	738.669	727.922	717.174	696.655	580.383	116.272	0.036
45	750.394	740.624	730.853	718.151	711.311	696.655	584.291	112.364	0.035
50	750.394	740.624	730.853	722.059	710.334	694.701	584.291	110.410	0.035
55	771.890	760.165	745.509	742.578	726.945	711.311	599.925	111.387	0.035
60	760.165	745.509	735.738	723.036	712.288	696.655	580.383	116.272	0.036
65	755.280	742.578	735.738	723.036	712.288	696.655	580.383	116.272	0.036
70	750.394	745.509	726.945	721.082	712.288	696.655	580.383	116.272	0.036
75	760.165	745.509	740.624	731.830	717.174	696.655	580.383	116.272	0.036
80	760.165	745.509	740.624	727.922	713.265	694.701	580.383	114.318	0.036
85	765.051	750.394	740.624	727.922	717.174	696.655	580.383	116.272	0.036
90	750.394	736.715	727.922	718.151	709.357	692.747	580.383	112.364	0.035
95	757.234	742.578	735.738	723.036	712.288	696.655	580.383	116.272	0.036
100	750.394	745.509	735.738	721.082	712.288	696.655	580.383	116.272	0.036
Ortalama	757.380	744.923	735.787	726.896	715.415	697.779	580.774	117.005	0.037

Demir Boru	Deney 6:			u=0.526 m/s			Re=17257		
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1180.308	1146.110	1135.362	1128.523	1093.348	1067.944	863.735	204.209	0.041
10	1150.996	1121.683	1111.912	1099.211	1078.692	1058.173	883.277	174.897	0.036
15	1028.861	1014.205	984.893	991.732	971.214	950.695	814.881	135.814	0.028
20	1121.683	1102.142	1082.600	1079.669	1049.380	1033.746	873.506	160.240	0.033
25	1067.944	1053.288	1033.746	1025.930	1005.411	980.007	844.194	135.814	0.028
30	1131.454	1111.912	1092.371	1084.554	1059.150	1038.632	853.964	184.667	0.038
35	1126.569	1102.142	1087.486	1079.669	1062.082	1035.701	863.735	171.965	0.035
40	1131.454	1102.142	1087.486	1079.669	1059.150	1038.632	863.735	174.897	0.036
45	1087.486	1067.944	1043.517	1040.586	1020.067	999.549	849.079	150.470	0.031
50	1121.683	1097.256	1079.669	1069.898	1054.265	1028.861	849.079	179.782	0.037
55	1116.798	1092.371	1082.600	1069.898	1059.150	1033.746	863.735	170.011	0.035
60	1141.225	1121.683	1111.912	1094.325	1068.921	1048.403	868.621	179.782	0.037
65	1116.798	1092.371	1082.600	1069.898	1049.380	1028.861	863.735	165.126	0.034
70	1102.142	1072.829	1063.059	1050.357	1039.609	1009.320	858.850	150.470	0.031
75	1087.486	1063.059	1043.517	1040.586	1020.067	994.663	844.194	150.470	0.031
80	1121.683	1092.371	1082.600	1069.898	1049.380	1028.861	858.850	170.011	0.035
85	1131.454	1107.027	1092.371	1079.669	1059.150	1043.517	863.735	179.782	0.037
90	1141.225	1116.798	1092.371	1089.440	1068.921	1048.403	873.506	174.897	0.036
95	1107.027	1092.371	1067.944	1060.127	1039.609	1019.090	853.964	165.126	0.034
100	1092.371	1067.944	1063.059	1050.357	1029.838	1009.320	853.964	155.355	0.032
Ortalama	1115.332	1091.882	1076.054	1067.700	1046.839	1024.806	858.117	166.689	0.034

Demir Boru	Deney 7: u=0.601 m/s						Re=19733		
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1375.723	1336.640	1317.098	1304.396	1283.878	1253.589	1044.494	209.094	0.033
10	1375.723	1336.640	1321.984	1304.396	1278.992	1253.589	1039.609	213.980	0.033
15	1356.181	1317.098	1302.442	1284.855	1264.336	1234.047	1015.182	218.865	0.034
20	1336.640	1302.442	1282.901	1279.970	1254.566	1224.276	1049.380	174.897	0.027
25	1341.525	1312.213	1287.786	1284.855	1264.336	1234.047	1049.380	184.667	0.029
30	1346.411	1307.328	1287.786	1275.084	1259.451	1234.047	1049.380	184.667	0.029
35	1351.296	1317.098	1297.557	1284.855	1264.336	1238.932	1054.265	184.667	0.029
40	1385.494	1346.411	1326.869	1319.053	1283.878	1263.359	1029.838	233.521	0.036
45	1351.296	1317.098	1307.328	1284.855	1259.451	1234.047	1010.297	223.750	0.035
50	1326.869	1287.786	1278.015	1265.313	1235.024	1214.505	1010.297	204.209	0.032
55	1312.213	1282.901	1268.245	1255.543	1235.024	1204.735	1020.067	184.667	0.029
60	1317.098	1287.786	1273.130	1260.428	1239.909	1204.735	1005.411	199.324	0.031
65	1321.984	1292.672	1278.015	1265.313	1239.909	1214.505	1010.297	204.209	0.032
70	1351.296	1312.213	1299.511	1284.855	1259.451	1234.047	1024.953	209.094	0.033
75	1326.869	1287.786	1278.015	1255.543	1239.909	1214.505	1020.067	194.438	0.030
80	1326.869	1294.626	1278.015	1265.313	1239.909	1214.505	1020.067	194.438	0.030
85	1336.640	1307.328	1287.786	1270.199	1251.634	1224.276	1020.067	204.209	0.032
90	1346.411	1307.328	1297.557	1284.855	1259.451	1229.162	1029.838	199.324	0.031
95	1326.869	1297.557	1282.901	1270.199	1244.795	1214.505	1024.953	189.553	0.030
100	1333.709	1297.557	1287.786	1270.199	1249.680	1219.391	1020.067	199.324	0.031
Ortalama	1342.356	1307.425	1292.036	1278.504	1255.396	1227.940	1027.395	200.545	0.031

Demir Boru		Deney 8:		u=0.66 m/s		Re=21688			
	Statik Basıncı, P (Pa)						ΔP		
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1580.909	1551.597	1517.399	1509.582	1479.293	1449.004	1205.712	243.292	0.031
10	1571.138	1538.895	1512.514	1499.812	1469.522	1449.004	1205.712	243.292	0.031
15	1566.253	1532.055	1512.514	1494.926	1464.637	1439.233	1205.712	233.521	0.030
20	1566.253	1532.055	1512.514	1499.812	1464.637	1439.233	1200.826	238.407	0.031
25	1580.909	1541.826	1522.284	1509.582	1479.293	1449.004	1215.483	233.521	0.030
30	1571.138	1532.055	1517.399	1499.812	1474.408	1449.004	1205.712	243.292	0.031
35	1619.992	1580.909	1551.597	1538.895	1498.835	1473.431	1205.712	267.719	0.035
40	1566.253	1522.284	1517.399	1499.812	1469.522	1439.233	1215.483	223.750	0.029
45	1551.597	1512.514	1492.972	1480.270	1449.981	1429.462	1186.170	243.292	0.031
50	1532.055	1502.743	1478.316	1470.499	1440.210	1419.691	1195.941	223.750	0.029
55	1551.597	1512.514	1488.087	1475.385	1449.981	1424.577	1186.170	238.407	0.031
60	1536.941	1502.743	1483.201	1470.499	1440.210	1414.806	1191.056	223.750	0.029
65	1600.450	1556.482	1532.055	1524.239	1493.949	1468.545	1215.483	253.063	0.033
70	1600.450	1561.367	1541.826	1524.239	1493.949	1468.545	1191.056	277.490	0.036
75	1610.221	1564.299	1546.711	1529.124	1503.720	1473.431	1205.712	267.719	0.035
80	1517.399	1483.201	1468.545	1450.958	1430.439	1390.379	1176.400	213.980	0.028
85	1595.565	1551.597	1541.826	1519.353	1498.835	1458.774	1205.712	253.063	0.033
90	1522.284	1483.201	1473.431	1456.820	1435.325	1400.150	1186.170	213.980	0.028
95	1561.367	1522.284	1512.514	1494.926	1469.522	1439.233	1191.056	248.177	0.032
100	1571.138	1532.055	1512.514	1499.812	1464.637	1439.233	1191.056	248.177	0.032
Ortalama	1568.696	1530.834	1511.781	1497.418	1468.545	1440.699	1199.117	241.582	0.031

Tablo 11.4. Galvanizli boru deney değerleri

Galvanizli Boru		Deney 1:		u=0.089 m/s		Re=2907			
	Statik Basınc, P (Pa)					ΔP			
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	160.240	161.218	153.401	159.263	151.447	145.584	144.607	0.977	0.007
10	155.355	156.332	148.516	144.607	136.791	130.928	134.836	-3.908	-0.001
15	150.470	151.447	143.630	139.722	136.791	130.928	134.836	-3.908	-0.001
20	155.355	156.332	148.516	144.607	136.791	130.928	134.836	-3.908	-0.001
25	145.584	146.561	138.745	134.836	131.905	126.043	125.066	0.977	0.000
30	170.011	170.988	163.172	163.172	151.447	145.584	164.149	-18.564	-0.006
35	170.011	161.218	153.401	149.493	146.561	140.699	144.607	-3.908	-0.001
40	150.470	151.447	143.630	139.722	136.791	130.928	128.974	1.954	0.001
45	111.387	112.364	104.547	110.410	102.593	96.731	125.066	-28.335	-0.009
50	121.157	122.135	114.318	115.295	112.364	106.501	115.295	-8.794	-0.003
55	155.355	156.332	148.516	144.607	136.791	130.928	139.722	-8.794	-0.003
60	160.240	161.218	153.401	159.263	151.447	145.584	134.836	10.748	0.003
65	111.387	110.410	102.593	110.410	102.593	96.731	110.410	-13.679	-0.004
70	160.240	161.218	153.401	149.493	146.561	140.699	134.836	5.862	0.002
75	150.470	151.447	143.630	139.722	136.791	130.928	128.974	1.954	0.001
80	140.699	141.676	133.859	129.951	127.020	121.157	125.066	-3.908	-0.001
85	130.928	131.905	124.089	120.180	117.249	111.387	115.295	-3.908	-0.001
90	155.355	156.332	148.516	144.607	136.791	130.928	134.836	-3.908	-0.001
95	174.897	170.988	163.172	159.263	151.447	145.584	144.607	0.977	0.000
100	124.089	119.203	110.410	117.249	110.410	104.547	90.868	13.679	0.004
Ortalama	147.685	147.538	139.673	138.794	133.029	127.166	130.586	-3.420	-0.001

Galvanizli Boru		Deney 2:				u=0.139 m/s		Re=4559	
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	218.865	217.888	209.094	213.003	205.186	199.324	188.576	10.748	0.031
10	218.865	217.888	209.094	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
15	218.865	217.888	209.094	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
20	218.865	217.888	209.094	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
25	218.865	217.888	209.094	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
30	218.865	218.865	210.071	212.025	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
35	213.980	214.957	207.140	211.048	202.255	196.392	183.690	12.702	0.037
40	213.980	214.957	205.186	211.048	203.232	197.369	183.690	13.679	0.040
45	213.980	214.957	205.186	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
50	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
55	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
60	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
65	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
70	221.796	218.865	210.071	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
75	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
80	221.796	218.865	210.071	213.003	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
85	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
90	213.980	214.957	205.186	211.048	203.232	197.369	183.690	13.679	0.040
95	218.865	214.957	207.140	208.117	205.186	199.324	183.690	15.633	0.045
100	213.980	214.957	205.186	211.048	203.232	197.369	183.690	13.679	0.040
Ortalama	217.937	216.276	207.678	210.609	204.746	198.884	183.935	14.949	0.044

Galvanizli Boru		Deney 3:		u=0.222 m/s		Re=7295			
	Statik Basınc, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	345.885	346.862	339.045	330.252	327.320	316.573	300.939	15.633	0.018
10	350.770	351.747	343.931	340.022	337.091	326.343	286.283	40.060	0.046
15	316.573	312.664	304.848	309.733	298.008	292.146	323.412	-31.266	-0.036
20	340.022	337.091	324.389	320.481	312.664	306.802	256.971	49.831	0.057
25	453.363	452.386	438.707	437.730	429.913	419.166	379.105	40.060	0.046
30	350.770	351.747	343.931	335.137	332.206	321.458	310.710	10.748	0.012
35	370.312	371.289	356.633	354.679	346.862	336.114	300.939	35.175	0.040
40	380.083	378.128	363.472	364.449	356.633	345.885	300.939	44.945	0.051
45	352.724	354.679	346.862	340.022	335.137	324.389	310.710	13.679	0.016
50	358.587	356.633	348.816	344.908	341.977	331.229	300.939	30.289	0.035
55	360.541	361.518	348.816	344.908	339.045	326.343	310.710	15.633	0.018
60	350.770	351.747	343.931	340.022	337.091	323.412	300.939	22.473	0.026
65	355.656	355.656	345.885	340.022	332.206	321.458	305.825	15.633	0.018
70	365.426	361.518	348.816	349.793	341.977	331.229	310.710	20.519	0.023
75	365.426	361.518	348.816	344.908	341.977	331.229	291.169	40.060	0.046
80	358.587	354.679	342.954	340.022	337.091	321.458	291.169	30.289	0.035
85	355.656	356.633	348.816	344.908	341.977	331.229	310.710	20.519	0.023
90	350.770	346.862	339.045	335.137	332.206	321.458	300.939	20.519	0.023
95	365.426	361.518	348.816	354.679	341.977	331.229	281.398	49.831	0.057
100	383.014	376.174	363.472	359.564	356.633	345.885	300.939	44.945	0.051
Ortalama	361.518	360.053	349.500	346.569	341.000	330.252	303.773	26.479	0.030

Galvanizli Boru		Deney 4:		u=0.324 m/s		Re=10643			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	541.300	532.506	519.804	511.011	508.080	497.332	427.959	69.372	0.037
10	565.727	561.819	544.231	540.323	532.506	516.873	447.501	69.372	0.037
15	536.415	527.621	514.919	511.011	504.171	487.561	432.845	54.716	0.029
20	531.529	527.621	514.919	511.011	504.171	492.446	432.845	59.602	0.032
25	551.071	547.163	539.346	525.667	517.850	507.102	447.501	59.602	0.032
30	507.102	498.309	490.492	491.469	473.882	463.134	427.959	35.175	0.019
35	507.102	498.309	490.492	486.584	473.882	463.134	427.959	35.175	0.019
40	546.185	547.163	539.346	530.552	522.736	511.988	432.845	79.143	0.042
45	521.759	517.850	495.378	491.469	488.538	472.905	437.730	35.175	0.019
50	544.231	543.254	529.575	520.782	517.850	507.102	427.959	79.143	0.042
55	541.300	537.392	519.804	511.011	508.080	497.332	427.959	69.372	0.037
60	531.529	527.621	514.919	511.011	503.194	492.446	437.730	54.716	0.029
65	536.415	537.392	519.804	511.011	503.194	492.446	437.730	54.716	0.029
70	538.369	532.506	514.919	511.011	503.194	492.446	427.959	64.487	0.035
75	551.071	547.163	534.461	535.438	522.736	511.988	447.501	64.487	0.035
80	516.873	512.965	495.378	496.355	488.538	472.905	442.615	30.289	0.016
85	544.231	544.231	529.575	520.782	514.919	504.171	432.845	71.327	0.038
90	526.644	522.736	510.034	505.148	498.309	487.561	437.730	49.831	0.027
95	534.461	527.621	514.919	508.080	502.217	492.446	427.959	64.487	0.035
100	521.759	517.850	498.309	498.309	488.538	477.790	432.845	44.945	0.024
Ortalama	534.754	530.455	516.531	511.402	503.829	492.055	434.799	57.257	0.031

Galvanizli Boru		Deney 5:		u=0.388 m/s		Re=12738			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	731.830	727.922	710.334	701.541	688.839	673.205	579.406	93.799	0.035
10	736.715	732.807	720.105	706.426	703.495	687.862	594.062	93.799	0.035
15	736.715	727.922	715.220	706.426	696.655	682.976	594.062	88.914	0.033
20	712.288	708.380	690.793	696.655	679.068	658.549	574.521	84.029	0.031
25	731.830	718.151	705.449	706.426	693.724	673.205	579.406	93.799	0.035
30	726.945	713.265	695.678	696.655	683.953	668.320	574.521	93.799	0.035
35	722.059	718.151	700.563	701.541	688.839	668.320	574.521	93.799	0.035
40	736.715	723.036	710.334	706.426	703.495	687.862	589.177	98.685	0.037
45	726.945	718.151	710.334	701.541	688.839	678.091	584.291	93.799	0.035
50	736.715	723.036	715.220	706.426	693.724	682.976	584.291	98.685	0.037
55	736.715	718.151	710.334	706.426	693.724	682.976	584.291	98.685	0.037
60	726.945	718.151	710.334	701.541	690.793	678.091	584.291	93.799	0.035
65	736.715	723.036	710.334	706.426	693.724	682.976	574.521	108.455	0.041
70	726.945	718.151	705.449	701.541	688.839	668.320	574.521	93.799	0.035
75	722.059	708.380	695.678	696.655	688.839	668.320	574.521	93.799	0.035
80	726.945	718.151	700.563	696.655	688.839	668.320	574.521	93.799	0.035
85	726.945	718.151	700.563	696.655	688.839	668.320	574.521	93.799	0.035
90	731.830	718.151	705.449	696.655	688.839	673.205	574.521	98.685	0.037
95	731.830	718.151	705.449	699.586	693.724	678.091	574.521	103.570	0.039
100	717.174	718.151	696.655	696.655	674.182	663.435	574.521	88.914	0.033
Ortalama	729.143	719.372	705.742	701.443	690.548	674.671	579.650	95.021	0.035

Galvanizli Boru		Deney 6:		u=0.453 m/s		Re=14861			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	946.787	923.337	910.635	901.841	889.139	873.506	745.509	127.997	0.035
10	941.901	928.222	910.635	901.841	889.139	863.735	740.624	123.112	0.034
15	932.131	913.566	894.025	887.185	874.483	853.964	740.624	113.341	0.031
20	925.291	913.566	891.093	887.185	869.598	853.964	740.624	113.341	0.031
25	932.131	913.566	895.979	892.070	879.368	853.964	740.624	113.341	0.031
30	932.131	918.451	901.841	901.841	884.254	858.850	740.624	118.226	0.032
35	932.131	913.566	895.979	892.070	877.414	853.964	735.738	118.226	0.032
40	937.016	918.451	905.749	901.841	889.139	863.735	740.624	123.112	0.034
45	907.704	894.025	881.323	877.414	859.827	839.308	740.624	98.685	0.027
50	929.199	913.566	891.093	896.956	859.827	849.079	733.784	115.295	0.032
55	932.131	913.566	898.910	901.841	884.254	858.850	740.624	118.226	0.032
60	932.131	918.451	902.818	896.956	884.254	853.964	740.624	113.341	0.031
65	932.131	913.566	900.864	896.956	884.254	853.964	740.624	113.341	0.031
70	917.474	898.910	886.208	882.300	859.827	847.125	730.853	116.272	0.032
75	909.658	895.002	881.323	877.414	859.827	844.194	726.945	117.249	0.032
80	927.245	913.566	895.979	886.208	869.598	853.964	730.853	123.112	0.034
85	932.131	913.566	895.979	892.070	879.368	853.964	735.738	118.226	0.032
90	932.131	918.451	900.864	896.956	884.254	858.850	735.738	123.112	0.034
95	927.245	913.566	891.093	887.185	869.598	853.964	735.738	118.226	0.032
100	932.131	918.451	901.841	892.070	879.368	853.964	745.509	108.455	0.030
Ortalama	929.541	913.371	896.711	892.510	876.339	854.844	738.132	116.712	0.032

Galvanizli Boru		Deney 7:		u=0.562 m/s		Re=18439			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1401.127	1377.677	1350.319	1341.525	1319.053	1298.534	1102.142	196.392	0.035
10	1386.471	1358.136	1345.434	1321.984	1299.511	1283.878	1102.142	181.736	0.032
15	1391.356	1358.136	1345.434	1331.755	1309.282	1293.649	1102.142	191.507	0.034
20	1381.585	1363.021	1345.434	1331.755	1304.396	1283.878	1116.798	167.080	0.030
25	1362.044	1348.365	1325.892	1312.213	1289.740	1264.336	1097.256	167.080	0.030
30	1386.471	1363.021	1345.434	1331.755	1304.396	1283.878	1097.256	186.622	0.033
35	1381.585	1358.136	1335.663	1326.869	1309.282	1293.649	1102.142	191.507	0.034
40	1381.585	1363.021	1340.548	1326.869	1304.396	1288.763	1097.256	191.507	0.034
45	1430.439	1392.333	1374.746	1370.838	1348.365	1322.961	1116.798	206.163	0.037
50	1371.815	1343.480	1330.778	1321.984	1299.511	1274.107	1097.256	176.851	0.031
55	1376.700	1358.136	1335.663	1321.984	1299.511	1274.107	1107.027	167.080	0.030
60	1420.669	1387.448	1369.861	1361.067	1343.480	1318.076	1111.912	206.163	0.037
65	1391.356	1367.906	1345.434	1341.525	1314.167	1293.649	1102.142	191.507	0.034
70	1371.815	1353.250	1330.778	1317.098	1299.511	1274.107	1102.142	171.965	0.031
75	1371.815	1353.250	1330.778	1317.098	1299.511	1274.107	1102.142	171.965	0.031
80	1381.585	1358.136	1335.663	1326.869	1299.511	1283.878	1102.142	181.736	0.032
85	1371.815	1353.250	1330.778	1317.098	1299.511	1278.992	1102.142	176.851	0.031
90	1396.242	1367.906	1350.319	1341.525	1309.282	1283.878	1102.142	181.736	0.032
95	1362.044	1348.365	1325.892	1312.213	1289.740	1264.336	1102.142	162.195	0.029
100	1381.585	1358.136	1335.663	1321.984	1299.511	1278.992	1097.256	181.736	0.032
Ortalama	1385.005	1361.555	1341.525	1329.800	1307.083	1285.588	1103.119	182.469	0.032

Galvanizli Boru		Deney 8:		u=0.698 m/s		Re=22927			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1918.977	1890.642	1853.513	1834.949	1812.476	1782.187	1522.284	259.902	0.030
10	1914.092	1890.642	1853.513	1834.949	1812.476	1782.187	1522.284	259.902	0.030
15	1909.207	1885.757	1848.628	1830.063	1807.591	1777.301	1517.399	259.902	0.030
20	1909.207	1885.757	1848.628	1830.063	1807.591	1777.301	1517.399	259.902	0.030
25	1928.748	1895.527	1863.284	1844.719	1817.361	1782.187	1522.284	259.902	0.030
30	1923.863	1895.527	1863.284	1839.834	1812.476	1782.187	1517.399	264.788	0.031
35	1918.977	1885.757	1859.376	1844.719	1812.476	1782.187	1522.284	259.902	0.030
40	1928.748	1890.642	1859.376	1849.605	1812.476	1782.187	1527.170	255.017	0.029
45	1914.092	1885.757	1855.467	1830.063	1807.591	1777.301	1522.284	255.017	0.029
50	1918.977	1890.642	1863.284	1844.719	1817.361	1782.187	1527.170	255.017	0.029
55	1909.207	1885.757	1853.513	1830.063	1807.591	1772.416	1522.284	250.131	0.029
60	1918.977	1890.642	1863.284	1834.949	1817.361	1801.728	1522.284	279.444	0.032
65	1933.633	1890.642	1863.284	1854.490	1817.361	1796.843	1522.284	274.558	0.032
70	1918.977	1890.642	1858.399	1834.949	1807.591	1782.187	1522.284	259.902	0.030
75	1928.748	1895.527	1863.284	1854.490	1822.247	1791.957	1522.284	269.673	0.031
80	1909.207	1885.757	1856.444	1830.063	1812.476	1782.187	1522.284	259.902	0.030
85	1928.748	1890.642	1863.284	1844.719	1817.361	1782.187	1522.284	259.902	0.030
90	1909.207	1880.871	1848.628	1830.063	1807.591	1782.187	1522.284	259.902	0.030
95	1909.207	1890.642	1853.513	1834.949	1807.591	1782.187	1522.284	259.902	0.030
100	1909.207	1885.757	1853.513	1834.949	1807.591	1782.187	1522.284	259.902	0.030
Ortalama	1918.000	1889.176	1857.275	1838.368	1812.232	1783.164	1522.040	261.124	0.030

Tablo 11.5. PPRC boru deney değerleri

PPRC Boru		Deney 1:		u=0.28 m/s		Re=6890			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	276.513	281.398	271.627	268.696	269.673	252.086	175.874	76.212	0.041
10	205.186	222.773	213.003	200.301	205.186	195.415	112.364	83.051	0.045
15	256.971	271.627	261.856	256.971	248.177	239.384	175.874	63.510	0.034
20	266.742	271.627	271.627	263.811	257.948	241.338	175.874	65.464	0.035
25	276.513	286.283	271.627	268.696	272.604	258.925	170.988	87.937	0.047
30	266.742	278.467	271.627	268.696	267.719	249.154	177.828	71.327	0.038
35	266.742	276.513	271.627	268.696	262.833	244.269	170.988	73.281	0.039
40	266.742	274.558	271.627	268.696	257.948	239.384	170.988	68.395	0.037
45	283.352	294.100	284.329	281.398	287.260	273.581	170.988	102.593	0.055
50	237.429	247.200	232.544	234.498	238.407	219.842	146.561	73.281	0.039
55	290.192	300.939	291.169	283.352	287.260	273.581	180.759	92.822	0.050
60	250.131	259.902	252.086	244.269	245.246	229.613	175.874	53.739	0.029
65	252.086	263.811	256.971	244.269	248.177	234.498	146.561	87.937	0.047
70	266.742	281.398	271.627	271.627	267.719	246.223	185.644	60.579	0.033
75	266.742	276.513	271.627	268.696	267.719	244.269	175.874	68.395	0.037
80	270.650	281.398	271.627	273.581	272.604	254.040	166.103	87.937	0.047
85	264.788	275.535	269.673	263.811	262.833	244.269	175.874	68.395	0.037
90	261.856	271.627	266.742	258.925	257.948	237.429	170.988	66.441	0.036
95	271.627	281.398	271.627	270.650	267.719	249.154	175.874	73.281	0.039
100	217.888	227.659	222.773	214.957	218.865	200.301	132.882	67.418	0.036
Ortalama	260.782	271.236	263.371	258.730	258.192	241.338	166.738	74.600	0.040

PPRC Boru		Deney 2:		u=0.524 m/s		Re=12890			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	564.750	584.291	564.750	542.277	540.323	503.194	312.664	190.530	0.029
10	564.750	584.291	564.750	542.277	535.438	503.194	312.664	190.530	0.029
15	579.406	594.062	564.750	547.163	540.323	503.194	293.123	210.071	0.032
20	564.750	584.291	554.979	537.392	530.552	503.194	302.894	200.301	0.031
25	559.865	569.635	554.979	527.621	525.667	493.423	302.894	190.530	0.029
30	540.323	564.750	540.323	527.621	520.782	478.767	302.894	175.874	0.027
35	559.865	584.291	564.750	547.163	540.323	508.080	293.123	214.957	0.033
40	569.635	598.948	564.750	556.933	540.323	517.850	312.664	205.186	0.032
45	559.865	574.521	564.750	537.392	535.438	498.309	322.435	175.874	0.027
50	511.011	535.438	515.896	488.538	491.469	454.340	278.467	175.874	0.027
55	535.438	559.865	540.323	527.621	501.240	470.951	293.123	177.828	0.027
60	530.552	554.979	535.438	527.621	496.355	478.767	302.894	175.874	0.027
65	535.438	564.750	540.323	522.736	496.355	478.767	288.237	190.530	0.029
70	540.323	564.750	545.208	527.621	501.240	483.653	293.123	190.530	0.029
75	530.552	554.979	535.438	508.080	491.469	473.882	293.123	180.759	0.028
80	569.635	594.062	564.750	556.933	540.323	512.965	302.894	210.071	0.032
85	598.948	613.604	584.291	576.475	569.635	532.506	312.664	219.842	0.034
90	554.979	584.291	564.750	547.163	540.323	503.194	302.894	200.301	0.031
95	559.865	584.291	564.750	537.392	530.552	503.194	312.664	190.530	0.029
100	535.438	559.865	535.438	527.621	511.011	483.653	293.123	190.530	0.029
Ortalama	553.269	575.498	553.269	535.682	523.957	494.254	301.428	192.826	0.030

PPRC Boru		Deney 3:		u=0.587 m/s		Re=14458			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	703.495	730.853	701.541	674.182	662.458	620.443	366.404	254.040	0.031
10	716.197	730.853	711.311	674.182	677.114	630.214	366.404	263.811	0.032
15	706.426	730.853	706.426	674.182	672.228	620.443	341.977	278.467	0.034
20	696.655	721.082	698.609	664.412	647.801	605.787	371.289	234.498	0.029
25	706.426	730.853	706.426	674.182	667.343	620.443	381.060	239.384	0.029
30	711.311	735.738	711.311	674.182	677.114	620.443	371.289	249.154	0.030
35	696.655	721.082	701.541	674.182	662.458	615.558	376.174	239.384	0.029
40	696.655	721.082	696.655	664.412	647.801	610.673	356.633	254.040	0.031
45	706.426	730.853	701.541	674.182	657.572	620.443	376.174	244.269	0.030
50	745.509	755.280	747.463	718.151	706.426	654.641	371.289	283.352	0.035
55	735.738	760.165	735.738	713.265	686.884	654.641	410.372	244.269	0.030
60	701.541	730.853	701.541	674.182	657.572	615.558	376.174	239.384	0.029
65	735.738	750.394	730.853	703.495	696.655	654.641	385.945	268.696	0.033
70	706.426	725.967	711.311	674.182	677.114	620.443	381.060	239.384	0.029
75	716.197	730.853	711.311	683.953	677.114	630.214	376.174	254.040	0.031
80	701.541	730.853	701.541	674.182	667.343	620.443	376.174	244.269	0.030
85	638.031	662.458	642.916	620.443	598.948	564.750	341.977	222.773	0.027
90	706.426	730.853	706.426	674.182	672.228	615.558	371.289	244.269	0.030
95	696.655	711.311	691.770	664.412	657.572	610.673	341.977	268.696	0.033
100	696.655	721.082	701.541	674.182	662.458	615.558	371.289	244.269	0.030
Ortalama	706.035	728.166	705.889	676.137	666.610	621.078	370.556	250.522	0.031

PPRC Boru	Deney 4:			u=0.69 m/s			Re=16983		
	Statik Basınc, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	887.185	906.727	896.956	869.598	852.987	796.317	429.913	366.404	0.032
10	852.987	877.414	857.873	820.744	804.134	747.463	439.684	307.779	0.027
15	857.873	882.300	862.758	820.744	809.019	752.349	415.257	337.091	0.030
20	887.185	921.383	892.070	856.896	833.446	776.775	488.538	288.237	0.026
25	901.841	926.268	906.727	869.598	852.987	791.432	498.309	293.123	0.026
30	784.592	818.790	789.477	757.234	735.738	688.839	405.487	283.352	0.025
35	862.758	887.185	867.643	830.515	813.904	757.234	468.996	288.237	0.026
40	735.738	769.936	740.624	703.495	686.884	845.171	381.060	464.111	0.041
45	755.280	789.477	760.165	732.807	721.082	669.297	381.060	288.237	0.026
50	794.363	823.675	799.248	762.119	755.280	698.609	400.601	298.008	0.026
55	833.446	857.873	838.331	801.202	784.592	727.922	449.455	278.467	0.025
60	740.624	779.707	745.509	718.151	706.426	649.756	390.830	258.925	0.023
65	828.560	857.873	828.560	693.724	774.821	718.151	405.487	312.664	0.028
70	823.675	848.102	818.790	781.661	771.890	723.036	434.799	288.237	0.026
75	813.904	833.446	809.019	781.661	765.051	723.036	425.028	298.008	0.026
80	813.904	838.331	811.950	785.569	768.959	723.036	429.913	293.123	0.026
85	813.904	838.331	811.950	781.661	765.051	718.151	425.028	293.123	0.026
90	828.560	857.873	828.560	787.523	771.890	723.036	429.913	293.123	0.026
95	828.560	850.056	818.790	791.432	774.821	718.151	434.799	283.352	0.025
100	799.248	828.560	804.134	771.890	755.280	703.495	434.799	268.696	0.024
Ortalama	822.209	849.665	824.457	785.911	775.212	732.563	428.448	304.115	0.027

PPRC Boru	Deney 5:				u=0.713 m/s		Re=17540		
	Statik Basınc, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	940.924	965.351	936.039	898.910	882.300	825.629	488.538	337.091	0.028
10	931.153	955.580	926.268	894.025	872.529	815.858	488.538	327.320	0.027
15	950.695	970.236	945.810	908.681	887.185	830.515	488.538	341.977	0.028
20	921.383	950.695	921.383	884.254	857.873	801.202	468.996	332.206	0.028
25	931.153	955.580	931.153	894.025	877.414	820.744	483.653	337.091	0.028
30	926.268	955.580	931.153	894.025	872.529	806.088	478.767	327.320	0.027
35	989.778	1004.434	989.778	957.534	931.153	874.483	517.850	356.633	0.030
40	901.841	931.153	896.956	859.827	843.217	786.546	439.684	346.862	0.029
45	984.893	994.663	980.007	947.764	931.153	874.483	517.850	356.633	0.030
50	940.924	970.236	940.924	903.795	882.300	825.629	473.882	351.747	0.029
55	950.695	965.351	945.810	913.566	896.956	830.515	488.538	341.977	0.028
60	926.268	950.695	926.268	889.139	882.300	806.088	439.684	366.404	0.030
65	921.383	945.810	916.497	879.368	862.758	806.088	468.996	337.091	0.028
70	945.810	955.580	945.810	908.681	896.956	835.400	483.653	351.747	0.029
75	901.841	926.268	901.841	874.483	852.987	796.317	468.996	327.320	0.027
80	906.727	936.039	906.727	869.598	852.987	796.317	468.996	327.320	0.027
85	911.612	936.039	906.727	869.598	857.873	801.202	459.226	341.977	0.028
90	862.758	896.956	862.758	830.515	813.904	747.463	449.455	298.008	0.025
95	882.300	916.497	877.414	850.056	823.675	771.890	439.684	332.206	0.028
100	911.612	936.039	906.727	879.368	862.758	801.202	468.996	332.206	0.028
Ortalama	927.001	950.939	924.802	890.361	872.040	812.683	474.126	338.557	0.028

PPRC Boru		Deney 6:		u=0.853 m/s		Re=20979			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1180.308	1219.391	1180.308	1123.637	1102.142	1040.586	600.902	439.684	0.025
10	1141.225	1190.079	1150.996	1094.325	1077.715	1001.503	586.246	415.257	0.024
15	1136.339	1175.422	1141.225	1094.325	1063.059	996.618	576.475	420.143	0.024
20	1136.339	1175.422	1131.454	1084.554	1058.173	991.732	576.475	415.257	0.024
25	1165.652	1199.849	1170.537	1113.867	1087.486	1021.044	576.475	444.570	0.026
30	1150.996	1190.079	1150.996	1104.096	1077.715	1011.274	586.246	425.028	0.025
35	1175.422	1199.849	1170.537	1113.867	1092.371	1021.044	596.016	425.028	0.025
40	1146.110	1190.079	1150.996	1104.096	1077.715	1011.274	576.475	434.799	0.025
45	1165.652	1199.849	1165.652	1113.867	1087.486	1021.044	586.246	434.799	0.025
50	1155.881	1199.849	1165.652	1113.867	1087.486	1021.044	586.246	434.799	0.025
55	1165.652	1199.849	1165.652	1113.867	1092.371	1021.044	586.246	434.799	0.025
60	1185.193	1219.391	1190.079	1133.408	1116.798	1040.586	605.787	434.799	0.025
65	1146.110	1190.079	1150.996	1104.096	1077.715	1006.388	581.360	425.028	0.025
70	1165.652	1199.849	1165.652	1113.867	1087.486	1021.044	586.246	434.799	0.025
75	1146.110	1175.422	1150.996	1089.440	1067.944	1001.503	576.475	425.028	0.025
80	1185.193	1199.849	1180.308	1113.867	1097.256	1030.815	596.016	434.799	0.025
85	1175.422	1199.849	1175.422	1123.637	1092.371	1021.044	600.902	420.143	0.024
90	1175.422	1199.849	1175.422	1113.867	1097.256	1021.044	586.246	434.799	0.025
95	1116.798	1170.537	1121.683	1065.013	1048.403	981.961	576.475	405.487	0.024
100	1146.110	1190.079	1150.996	1104.096	1077.715	1011.274	596.016	415.257	0.024
Ortalama	1158.079	1194.231	1160.278	1106.783	1083.333	1014.693	586.978	427.715	0.025

PPRC Boru		Deney 7:		u=0.988 m/s		Re=24317			
	Statik Basıncı, P (Pa)								
Zaman (s) / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	f
5	1649.304	1720.631	1649.304	1573.092	1527.170	1436.302	825.629	610.673	0.026
10	1644.419	1722.585	1639.534	1563.322	1517.399	1441.187	820.744	620.443	0.027
15	1634.648	1712.814	1639.534	1553.551	1517.399	1436.302	817.813	618.489	0.027
20	1634.648	1698.158	1639.534	1553.551	1517.399	1431.416	812.927	618.489	0.027
25	1629.763	1698.158	1659.075	1582.863	1536.941	1431.416	816.836	614.581	0.027
30	1627.809	1698.158	1639.534	1563.322	1527.170	1426.531	812.927	613.604	0.027
35	1634.648	1693.273	1639.534	1563.322	1527.170	1426.531	815.858	610.673	0.026
40	1634.648	1698.158	1639.534	1563.322	1527.170	1426.531	815.858	610.673	0.026
45	1629.763	1688.387	1639.534	1563.322	1517.399	1421.646	813.904	607.741	0.026
50	1634.648	1693.273	1639.534	1553.551	1517.399	1426.531	814.881	611.650	0.026
55	1629.763	1698.158	1639.534	1553.551	1517.399	1424.577	810.973	613.604	0.027
60	1634.648	1698.158	1639.534	1553.551	1517.399	1421.646	817.813	603.833	0.026
65	1628.786	1693.273	1639.534	1563.322	1527.170	1421.646	815.858	605.787	0.026
70	1627.809	1688.387	1639.534	1563.322	1527.170	1415.783	815.858	599.925	0.026
75	1629.763	1698.158	1639.534	1573.092	1517.399	1416.760	810.973	605.787	0.026
80	1634.648	1698.158	1639.534	1563.322	1517.399	1421.646	815.858	605.787	0.026
85	1634.648	1693.273	1639.534	1563.322	1517.399	1421.646	810.973	610.673	0.026
90	1627.809	1693.273	1639.534	1573.092	1517.399	1421.646	813.904	607.741	0.026
95	1629.763	1688.387	1639.534	1573.092	1517.399	1421.646	814.881	606.764	0.026
100	1626.832	1688.387	1629.763	1563.322	1517.399	1411.875	810.973	600.902	0.026
Ortalama	1632.938	1698.060	1640.511	1563.810	1521.307	1425.163	815.272	609.891	0.026

Deneysel boru akışlarından çıkarılan zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve tam gelişmiş akıştaki Darcy sürtünme faktörü değerleri aşağıda tablolar halinde verilmiştir

Tablo 11.6. Deneysel alüminyum boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

Alüminyum Boru										
m (kg/s)	Re / L (m)	statik basınç, P (pa)							ΔP (0.7-1.7)	f
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7		
0.872	50236.670	6363.887	6193.380	6126.111	6001.384	5835.549	5693.070	4418.704	1274.366	0.024
0.845	48685.209	5885.066	5717.829	5645.421	5536.577	5387.091	5254.890	4081.894	1172.996	0.024
0.789	45482.276	5343.180	5189.023	5123.623	5017.581	4880.709	4763.923	3698.370	1065.553	0.025
0.748	43100.412	4786.813	4654.144	4599.956	4500.921	4386.004	4274.357	3317.181	957.176	0.025
0.693	39915.166	4309.393	4181.396	4125.806	4037.983	3937.547	3841.316	2971.496	869.820	0.026
0.667	38407.259	4063.209	3940.350	3899.241	3811.419	3704.910	3621.291	2793.514	827.777	0.027
0.645	37168.280	3712.851	3604.941	3557.293	3478.346	3395.194	3308.773	2559.943	748.830	0.026
0.605	34845.295	3406.873	3307.371	3264.394	3189.184	3108.836	3037.830	2357.670	680.160	0.027
0.583	33559.708	3152.280	3060.720	3023.816	2948.606	2875.264	2814.069	2188.564	625.505	0.027
0.541	31141.032	2793.047	2704.290	2662.714	2606.657	2536.119	2476.324	1924.161	552.163	0.028
0.498	28677.995	2386.166	2319.831	2280.124	2228.739	2171.747	2126.434	1644.810	481.624	0.028
0.461	26562.409	2032.539	1972.744	1942.847	1901.271	1849.886	1817.653	1402.363	415.290	0.029
0.425	24457.423	1738.706	1685.919	1663.963	1627.059	1573.337	1544.841	1196.353	348.488	0.028
0.392	22582.650	1552.316	1506.536	1480.376	1446.274	1402.363	1379.473	1067.421	312.052	0.030

Tablo 11.7. Deneysel bakır boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

Bakır Boru										
m (kg/s)	Re / L (m)	statik basınç, P (pa)							ΔP (0.7-1.7)	f
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7		
0.929	53508.563	8034.857	7868.087	7740.090	7617.231	7459.804	7288.363	6005.589	1282.774	0.022
0.915	52692.851	7548.094	7400.944	7293.501	7176.716	7022.091	6878.211	5660.837	1217.374	0.021
0.860	49522.237	6777.309	6639.969	6544.671	6431.623	6298.020	6168.621	5068.500	1100.121	0.022
0.809	46585.581	6157.877	6040.157	5939.254	5836.950	5720.164	5596.839	4599.956	996.883	0.022
0.769	44316.059	5476.783	5378.683	5295.531	5200.234	5097.463	4990.020	4101.514	888.506	0.022
0.723	41646.430	5044.209	4867.629	4791.017	4706.464	4609.299	4511.199	3705.377	805.822	0.023
0.674	38838.764	4606.496	4429.916	4352.370	4276.693	4192.140	4100.580	3366.699	733.881	0.024
0.656	37818.937	4148.229	4069.749	4004.349	3933.810	3851.593	3771.244	3093.420	677.824	0.023
0.625	36006.787	3729.201	3670.341	3609.613	3546.081	3479.280	3398.931	2794.449	604.482	0.023
0.591	34022.151	3477.411	3379.311	3324.189	3256.453	3192.921	3130.791	2568.819	561.972	0.024
0.551	31770.718	3144.806	3076.136	3027.086	2963.554	2905.629	2848.637	2343.656	504.981	0.024
0.532	30644.080	2890.680	2841.630	2792.580	2737.924	2681.867	2632.817	2162.871	469.946	0.024
0.440	25366.810	2109.617	2070.377	2031.604	1991.897	1962.000	1921.359	1579.877	341.482	0.026
0.368	21180.460	1609.774	1570.534	1540.637	1517.747	1482.244	1460.756	1198.221	262.535	0.028

Tablo 11.8. Deneysel demir boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

Demir Boru										
		statik basınç, P (pa)							ΔP	f
m (kg/s)	Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	
0.847	45335.442	6056.50	5930.84	5860.77	5773.88	5668.31	5580.02	4640.13	939.891	0.028
0.822	43969.160	5719.69	5605.71	5538.91	5448.75	5345.04	5267.97	4391.14	876.827	0.027
0.792	42344.974	5323.56	5210.04	5145.57	5067.09	4964.32	4858.75	4090.30	768.450	0.026
0.739	39528.901	4791.01	4690.11	4629.85	4550.43	4461.21	4393.47	3652.12	741.356	0.029
0.683	36557.477	4071.61	3985.19	3933.34	3869.81	3787.12	3729.20	3103.23	625.971	0.028
0.619	33090.201	3528.79	3312.04	3270.00	3215.39	3139.66	3095.28	2575.35	519.930	0.029
0.596	31906.018	3177.03	3108.83	3066.32	3016.80	2946.73	2904.22	2423.53	480.690	0.029
0.577	30862.956	2974.29	2914.03	2872.92	2821.07	2754.27	2716.43	2258.63	457.800	0.029
0.534	28556.485	2573.95	2517.90	2479.59	2438.01	2380.56	2344.12	1950.32	393.802	0.029
0.488	26095.518	2242.75	2187.16	2159.60	2121.76	2061.96	2036.27	1685.45	350.825	0.031
0.444	23740.740	1835.40	1788.69	1766.73	1728.42	1691.05	1667.23	1379.94	287.293	0.031
0.405	21687.464	1585.95	1550.44	1522.41	1493.92	1460.28	1442.53	1188.41	254.126	0.033
0.370	19796.976	1355.18	1324.81	1304.73	1275.30	1244.00	1224.84	1016.50	208.346	0.032

Tablo 11.9. Deneysel galvanizli boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

Galvanizli Boru										
		statik basınç, P (pa)							ΔP	f
m (kg/s)	Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	
0.935	49996.050	6100.41	5971.48	5901.88	5813.59	5718.29	5620.66	4679.83	940.826	0.023
0.890	47622.388	5759.40	5646.82	5578.62	5489.86	5387.09	5307.21	4430.85	876.360	0.023
0.822	43969.160	6257.37	6166.75	6089.67	5992.04	5897.67	5804.25	4978.80	825.441	0.026
0.775	41469.622	5697.27	5608.98	5540.78	5452.95	5361.86	5274.51	4508.86	765.647	0.027
0.732	39143.250	5211.91	5132.96	5061.96	4981.14	4892.38	4818.11	4115.06	703.050	0.028
0.698	37322.628	4642.46	4571.92	4509.79	4434.12	4356.10	4285.56	3660.99	624.570	0.027
0.637	34073.774	4109.92	4043.12	3988.93	3925.86	3851.12	3789.46	3223.28	566.177	0.030
0.616	32954.268	3778.25	3720.79	3671.74	3605.40	3546.08	3480.68	2964.48	516.192	0.029
0.602	32226.404	3604.47	3551.22	3501.23	3435.36	3376.97	3316.24	2831.82	484.427	0.028
0.564	30166.816	3213.47	3161.15	3119.11	3062.58	2998.12	2955.14	2509.02	446.122	0.030
0.525	28106.371	2883.20	2840.22	2791.64	2743.99	2691.67	2649.16	2248.82	400.341	0.031
0.500	26747.899	2539.85	2489.87	2457.17	2407.18	2363.27	2322.63	1971.34	351.291	0.030
0.460	24614.647	2212.85	2169.41	2147.45	2095.13	2057.76	2017.59	1712.07	305.511	0.031
0.427	22861.429	1938.64	1898.00	1872.30	1836.80	1801.77	1781.68	1500.46	281.220	0.033

Tablo 11.10. Deneysel PPRC boru çalışmasında zaman ortalamalı statik basınç değişimleri ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

PPRC Boru										
		statik basınç, P (pa)							ΔP	f
m (kg/s)	Re / L (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.7	(0.7-1.7)	
0.785	56016.520	7250.057	7014.617	6785.717	6492.819	6213.000	5820.133	3319.984	2500.149	0.020
0.704	50230.771	6372.763	5999.983	5797.710	5533.307	5315.151	4990.954	2836.491	2154.463	0.022
0.645	46017.870	5350.187	5114.747	4948.911	4702.727	4538.760	4288.839	2413.727	1875.112	0.023
0.602	42968.538	4724.683	4508.863	4357.976	4134.214	3996.407	3766.573	2118.960	1647.613	0.023
0.562	40071.777	4294.911	4069.281	3931.007	3724.997	3593.263	3385.851	1909.680	1476.171	0.023
0.534	38120.535	3933.810	3737.610	3607.744	3411.077	3304.569	3097.624	1746.647	1350.977	0.024
0.528	37673.096	3767.040	3492.360	3362.494	3194.790	3084.544	2888.344	1633.131	1255.213	0.023
0.502	35823.069	3417.150	3240.570	3131.726	2962.153	2866.389	2675.794	1522.419	1153.375	0.023
0.474	33786.805	3147.141	2999.991	2901.891	2736.523	2642.160	2472.120	1413.574	1058.546	0.024
0.441	31468.083	2749.603	2602.453	2513.696	2375.421	2292.270	2158.200	1223.447	934.753	0.024
0.399	28455.200	2249.760	2151.660	2083.457	1971.810	1907.344	1785.420	1010.430	774.990	0.024
0.343	24483.172	1811.580	1713.480	1655.554	1571.469	1513.076	1414.976	796.479	618.497	0.026
0.309	22014.734	1492.521	1433.661	1384.144	1311.737	1265.023	1189.346	669.883	519.463	0.027

ÖZGEÇMİŞ

01.01.1980 tarihinde Mardin merkeze bağı Sultanköy'de doğdu. İlk eğitimini Sultanköy İlkokulun tamamladı. Orta öğretiminin ve Lise'nin ilk yılını Mardin İmam Hatip Lisesinde okuduktan sonra ailesiyle birlikte Diyarbakıra taşındı. Burada Lisenin kalan iki yılını düz lisede okuyarak 1995 yılında mezun oldu. Girdiğı ilk üniversite sınavında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisiliğı Bölümünü kazandı. Makine mühendisliğı Bölümünden 2002 yılınının Şubat ayında mezun oldu. Mezun olduktan sonra değışik şirketlerde makine mühendisliğı yaptı. 2004 yılında Gaziantep Üniveristesesi Makina mühendisliğı bölümünde Yüksek Lisans eğitime başladı. 2007 yılında Yüksek Lisans eğitimini bitirdi. 2008 yılında Dicle Üniversitesi Bismil Meslek Yüksek Okulunda Öğretim görevlisi olarak görev yapmaya başladı. 2008 yılında Fırat Üniversitesinde Doktora eğitime başladı.