



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.08.2018
Kabul Tarihi : 14.11.2019

Received Date : 28.08.2018
Accepted Date : 14.11.2019

ÇEŞİTLİ BORU TIPLERİNDE ÇEPER KAYMA GERİLMESİ DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞI İLE MODELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WALL SHEAR STRESS VARIATION IN VARIOUS PIPE TYPES AND MODELING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Ahmet Beyzade DEMİRPOLAT ¹ (ORCID: 0000-0003-2533-3381)

Mehmet DAŞ ^{1*} (ORCID: 0000-0002-4143-9226)

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, 60250 Tokat, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Mehmet DAŞ, mehmetdas@outlook.com

ÖZET

Bu çalışmada, gelişen türbülanslı boru akışında çeper kayma gerilmesinin boru boyunca değişimi deneysel olarak elde edilmiştir. Bu amaçla değişik pürüzlülükte 5 adet boru (alüminyum, bakır, siyah, galvanizli ve PPRC “polypropylene random copolymer”) seçilmiştir. Bu borulara hidrodinamik geçiş bölgesinde sık aralıklarla tam gelişmiş akış bölgesinde ise sadece giriş ve çıkışta olmak üzere çok sayıda basınç prizleri yerleştirilmiştir. Deneyler yapılırken debi hidrolik tank yardımıyla ölçülmüş ve bu debiye karşılık gelen statik basınç değerleri, sisteme kurulan sabit bir dijital kamera yardımıyla belirli zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Kaydedilen bu görüntülerden yararlanarak bir görüntü işleme programı yardımı ile anlık basınç çalkantıları elde edilmiştir. Anlık basınç çalkantılarının ortalaması alınarak her bir basınç prizindeki zaman ortalamalı basınç değerleri hesaplanmıştır. Birbirine yakın basınç prizleri arasındaki basınç farkından yararlanarak çeper kayma gerilmeleri tespit edilmiştir. Her bir boru için değişik Reynold sayılarında kayma gerilmesinin boru boyunca değişimi grafik olarak sunulmuştur. Deney çalışmalarından elde edilen kayma gerilmeleri için yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak tahminsel bir model elde edilmiştir. Elde edilen modelin geçerliliğini belirlemek için farklı hata analizleri yapılmıştır. YSA tarafından kayma gerilmesi değerleri için oluşturulan tahminsel modeller içerisinde en az hata oranı %10 değeri ile bakır boruya ait tahminsel modelidir. Sonuç olarak farklı pürüzlülüğe sahip borulardaki çeper kayma gerilmeleri belirlenmiş ve en fazla kayma gerilmesi değeri (20.13 Pa) PPRC boruda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Boru Akışları, gelişen akış, kayma gerilmesi, yapay sinir ağı

ABSTRACT

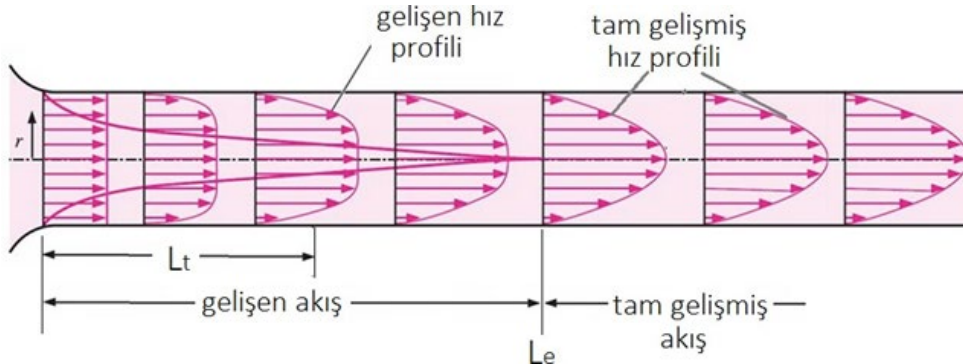
In this study, the variation of wall shear stress along the pipe for the developing turbulent pipe flows was obtained experimentally. For this purpose, five pipe having different roughness (aluminum, copper, black, galvanized and PPRC “polypropylene random copolymer”) are selected. Many piezometric holes are tapped into horizontal water pipe closely in the transition region while only one at the entry and one at the exit of fully developed region for the experimental study. During the experiment, flow rates were measured using a hydraulic tank and static pressure values corresponding this flow rates were recorded for defined time interval using a digital camera. Utilizing these recorded images, instant pressure fluctuations are obtained with help of an image processing software. Taking the average of the instant pressure fluctuations time averaged pressure values were calculated for each pressure piezometers. Using pressure difference between adjacent piezometers the wall shear stresses have been identified. For each pipe and for different Reynolds numbers the variation of wall shear stress has been presented along the pipe. A predictive model is obtained by using artificial neural network (ANN) for the shear stresses obtained from the experiment. Among the predictive models created by ANN for shear stress values, the minimum error rate is the predictive model of copper pipe with a value of 10%. Different error analyzes were performed to determine the validity of the obtained model. As a result, the wall shear stress variation in the pipes with different roughness was determined and the highest shear stress value (20.13 Pa) was observed in PPRC pipe.

Keywords: Pipe flows, developing flow, shear stress, artificial neural network

GİRİŞ

Akış teorisi oldukça iyi anlaşılmasına rağmen teorik çözümler dairesel borulardaki, tam gelişmiş laminar akış gibi sadece birkaç basit durum için elde edilebilmiştir. Bundan dolayı çoğu akış problemlerinde kapalı hal analitik çözümlerinden ziyade deneysel sonuçlara ve ampirik bağıntılara güvenilmelidir. Deneysel sonuçların dikkatlice denetlenen laboratuvar şartlarında elde edildiği ve iki sistemin tam olarak birbirine benzemeyeceği düşünüldüğünde elde edilen sonuçları eksiksiz olarak görmemek gerekir. Sürtünme faktörlerinde yüzde onluk bir hata (ve fazlası) oluşması istisnadan çok bir standarttır (Abraham 2010, Çengel 2008)

Katı düz yüzey üzerinden akışlarda, akış yüzey girişinde laminar fakat belirli bir akış mesafesinden sonra akışı tetikleyen bozuntular akışı türbülanslı yapar. Şekil 1 'de boru içerisinden akan bir akışkanın laminar, geçiş ve türbülans olma aşamaları gösterilmiştir. Girişten itibaren akışın ilk türbülansa uğradığı akış mesafesine geçiş uzunluğu " L_t " denir. Geçiş uzunluğundan sonra laminar-türbülans arası bir geçiş akışı oluşur ve sonra akış tam türbülanslı olur. Boru akışlarında Laminerden türbülansa geçişler için bazı detaylı deneysel ve teorik ilerlemeler Kerswell tarafından ve son zamanlarda ise Willis vd., tarafından incelenmiştir (Kerswell 2005, Willis 2008). Girişten itibaren akış tam türbülanslı oluncaya kadar ölçülen mesafeye ise giriş uzunluğu (L_e) denir. Boru girişinden itibaren viskoz etkiler sonucu gelişen hız sınır tabakası akış boyunca kalınlığı artar. Sınır tabaka kalınlığı boru yarıçapı ile sınırlandırıldığından belirli bir akış mesafesinden sonra tüm boru kesiti viskozlu akış tabakası ile dolu olur. Boru girişinde düzgün olan hız profili değişmez bir hız profiline dönüşüncüye kadar akış boyunca değişir. Hız profilinin değiştiği akış bölgesine giriş akışı veya gelişen akış denir. Hız profilinin değişmez olduğu boru akışına ise tam gelişmiş boru akışı denir. Literatürde genellikle tam gelişmiş boru akışı duvar kayma gerilmesi veya hız profilinin akış boyunca artık değişmez olduğu bir akış bölgesi olarak tanımlanmıştır. Fakat bazı literatür çalışmalarında, örneğin Doherty vd., zaman ortalamalı türbülans akış istatistikleri tümüyle değişmez olduğunda tam gelişmiş akışın başladığı kabulünün yapılması gerektiğini bildirmiştir (Doherty, 2007).



Şekil 1. Gelişen ve tam gelişmiş akışta hız profili değişimi

Tam gelişmiş laminar veya türbülans boru akışları teorik veya ampirik bağıntularla büyük ölçüde çözülmüşken gelişen akış kısmı ise hala tam olarak çözülememiştir (Özışık 1985, White 2003).

Mühendislik uygulamalarında genelde boru giriş bağlantıları koniksel (trampet ağzı), çıkıntılı veya keskin kenarlı olur. Keskin kenarlı bir giriş boru girişinde çok türbülans üretirken koniksel bir giriş ise en az türbülans üretendir. Girişte üretilen türbülans miktarı geçiş ve giriş uzunlukları üzerinde çok etkili olduğu yapılan pek çok çalışmada belirtilmiştir. Boru girişinde yüksek türbülans miktarı geçiş ve giriş uzunluklarını düşük türbülanslı bir girişe göre daha kısa yapar (Augustine 1988, Ghajar 1995).

Literatürde yapılan çalışmalarda boru içi tam gelişmiş akış mesafesi incelemeleri yapılmıştır. Tam gelişmiş akış mesafesi boru çapına göre belirlenmiştir. Nikuradse, akış yönlü mesafelerde ölçtüğü kesit ortalama hız profillerini karşılaştırarak tam gelişmiş akışı 25D ile 40D (D : boru çapı) arasındaki boru çap mesafelerinde oluştuğunu bildirmiştir (Nikuradse, 1932). Benzer yolla, Laufer, ortalama hız dağılım profillerini karşılaştırarak giriş uzunluğunun 30D olduğunu bildirmiştir (Laufer, 1953). Eksen simetrik akış bozuntuların verildiği deneysel akışlarda, Sarpkaya, tam gelişmiş akışın 30D mesafeden sonra ve Haung ve Chen ise 32D mesafesinden sonra oluştuğunu bildirmiştir (Sarpkaya 1975, Huang 1974). Bununla beraber, eksen simetrik olmayan bozuntularının verildiği akışlarda ise, Huang ve Chen, tam gelişmiş akışın 40D - 48D arasında bir mesafede oluştuğunu bildirmiştir. Çalışmalarında boru girişinde duvar tipi engel kullanılarak eksen simetrik olmayan bozuntular girişte akışa sağlanmıştır ve türbülansa geçiş için kritik Reynolds sayısı 2300 olarak ölçülmüştür (Huang vd., 1974). Perry ve

Abel (1975), $Re=3 \times 10^5$ Reynolds sayısında boru girişinde akışı çalkandırarak tam gelişmiş akışın 71.9D ve 86.2D 'de mesafesinde başladığını bildirmişlerdir. Burada, ortalama hız ve türbülans çalkantı hız değerlerinin arda arda gelen iki ölçüm istasyonunda artık değişmez olması şartı ile tam gelişmiş akışı tanımlamışlardır. Patel ve Head (1974), türbülanslı bir akışta giriş uzunluğunun ortalama hız dağılımına göre 50D ve türbülans çalkantı hız dağılımına göre ise 80D olduğunu ölçmüşlerdir. Fakat akış boyunca ölçtükleri basınç değişimleri gözlemlendiğinde ise tam gelişmiş akışın 10D-20D arasındaki mesafelerde daha erken oluştuğu görülmüştür. Barbin ve Jones (1963), $Re=388000$ Reynolds sayısında 40D uzunluğundaki bir boru ile yaptıkları deneysel çalışmada, akış boyunca statik basınç değişimlerini gözlemlediklerinde 15D çaptan sonra tam gelişmiş akışın oluştuğunu ve ortalama hız profillerini gözlemlediklerinde ise 40D uzunluğa kadar tam gelişmiş akışın hala başlamadığını bildirmişlerdir. Son zamanlarda Doherty vd. (2007), ortalama hız profilinin değişmez olması için 50D üzerinde bir gelişme uzunluğuna gerek duyulduğunu ve yüksek dereceden türbülans istatistiklerinin değişmez olması için de 80D 'lik bir akım mesafesine gerek duyulduğunu bildirmişlerdir.

Boru içi akışlarda kayma gerilmesi ile ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Sokhal ve ark (2018), guar zıncığı ve tuz karışımlarının bir boruda türbülanslı su akışının sürtünme ve kayma gerilmesi üzerlerindeki etkisini araştırmışlardır. Su içinde (1000-3000 ppm) ve KCl tuzu içermeyen (1000-3000 ppm) guar sakızı (1000-3000 ppm) boyunca konsantrasyon edilmiş solüsyonları, kısa bir süre (2.5 dakika) boyunca boru çeperine enjekte ederek, bunların su yoluyla türbülanslı akışındaki sürüklenmeyi azaltma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Vasques ve diğ. (2018), 11.7 mm boru içinde hem yukarı hem de aşağı doğru dairesel gaz-sıvı akışlarında sıvı filmin ara yüzey dalga yapısını ve çeper kayma gerilmelerini Parlaklık Tabanlı Lazer İndüklemeli Floresans tekniği (PTLIF) kullanılarak incelemiştir. Liu ve ark. (2018), dikey bir boruda akma gerilmesi sıvısının başlangıç akışını incelemiştir. Başlangıç akışını araştırmış ve düşey bir boruda basit bir akma ve kayma gerilmesi akışkanının (Carbopol 940) elde edilmesini sağlamışlardır. Carbopol, aşağıdan, borunun dibine enjekte edilen bir Newton sıvısı (Fluorinert FC-40) ile yer değiştirilerek akışı incelemiştir. Ahn ve diğ. (2017), türbülanslı boru akışlarında büyük ölçekli hareketlerin kesme gerilmesine katkısını incelemiştir. Büyük ölçekli hareketlerin (LSM) Reynolds kayma gerilmesine katkısını araştırmak için $Re \tau = 544, 934$ ve 3008 ile türbülanslı boru akışları için doğrudan sayısal simülasyon verilerini kullanmışlardır. Singh ve ark. (2017), geliştirilmiş newton sıvıları için akma gerilmesinin boru içi akışta türbülansa olan etkisini incelemiştir. Çeper kayma gerilmesinin yüksek basınçlarda değişimini göstermişlerdir.

Bu çalışmada pürüzlülük oluşturma yerine farklı tipteki ticari boruların incelenmesi esas alınmıştır. Borulardaki çeper kayma gerilmeleri çeşitli Reynolds sayıları için hesaplanmıştır. Ayrıca basınç ölçümleri kamera yardımıyla yapılarak, görüntü işleme yöntemleriyle değerlendirildiğinden sonuçlar gözle okumaya kıyasla çok daha hassas elde edilebilmektedir. Bu yöntemle hem anlık basınç çalkantıları elde edilebilmekte, hem de bunların zaman ortalamaları bulunabilmektedir. Farklı tip borularda elde edilen çeper kayma gerilmeleri için yapay sinir ağı kullanılarak tahminsel bir model elde edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

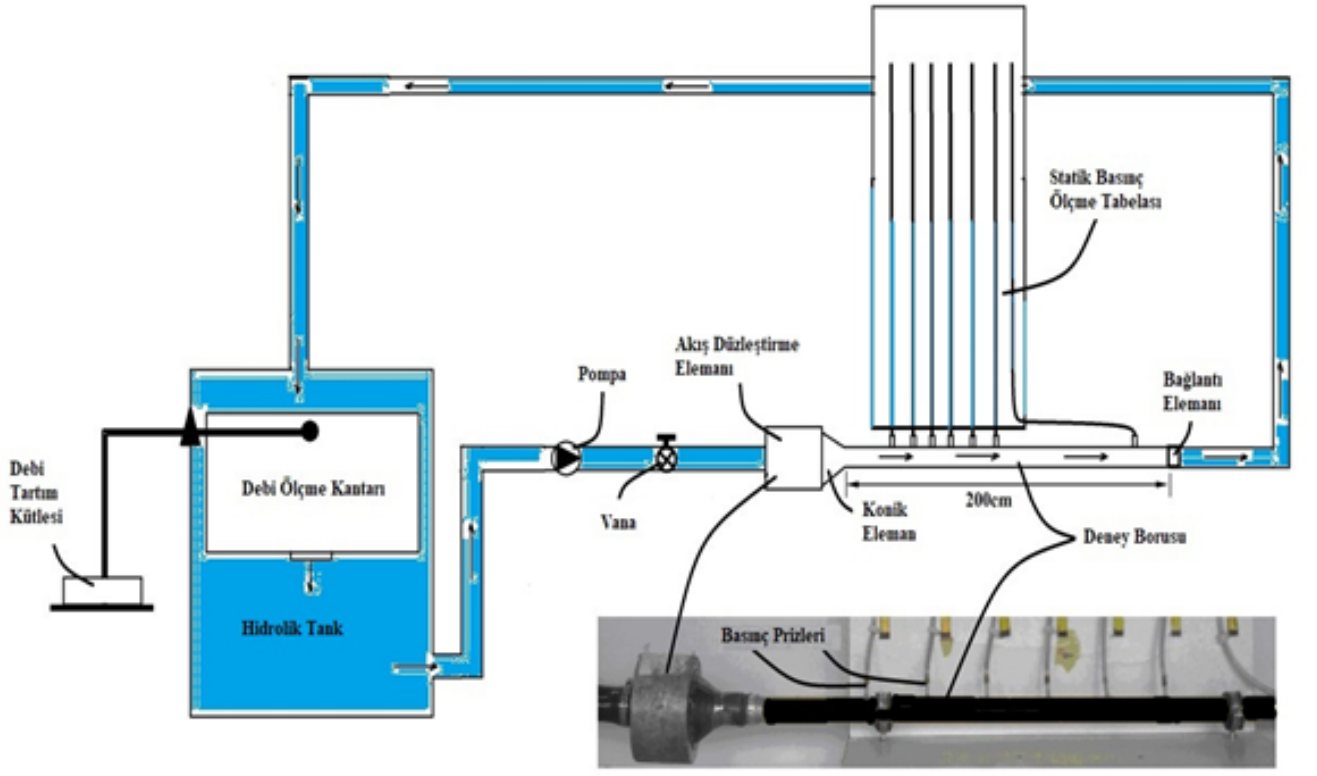
Deney düzeneği hazırlanırken değişik pürüzlülükte 5 adet boru seçilmiştir. Boru uzunluğu, hidrodinamik geçiş uzunluğu ve tam gelişmiş akış bölgesini de kapsayacak kadar uzun seçilmiştir. Bu borulara hidrodinamik geçiş bölgesinde sık aralıklarla, tam gelişmiş akış bölgesinde ise sadece giriş ve çıkışta olmak üzere çok sayıda basınç prizleri yerleştirilmiştir. Borular akışkanlar mekaniği laboratuvarında mevcut bulunan bir hidrolik tanka monte edilmiştir. Deney yapılırken debi hidrolik tank yardımıyla ölçülmüş bu debiye karşılık gelen statik basınç değerleri ise sisteme kurulan sabit bir dijital kamera yardımıyla belirli bir zaman aralığında kaydedilmiştir. Görüntü kalitesi açısından sistemdeki suya kırmızı renkli mürekkep karıştırılmıştır. Kaydedilen bu görüntülerden yararlanarak görüntü işleme programı ile anlık basınç çalkantıları elde edilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan kamera; Yüksek çözünürlükte, lens sistemi dijital zum 300x optik zum 25x, görüntü sensörü CCD algılayıcı boyut 1/1.57 cm (1/4") ve 240 fps özelliğine sahiptir. Deneylerde kullanılan boru tiplerinin bağıl pürüzlülük ve çap değerleri Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Boru malzemesi, bağıl pürüzlülükleri ve çapları

Boru Türü	Çap (mm)	Bağıl pürüzlülük ϵ / D
Alüminyum	26	0.0016
Bakır	25	0.00016
Siyah	27.6	0.0024
Galvanizli	27.6	0.0026
PPRC	20.5	0.00033

Şekil 2.'de deney düzeneği, Şekil 3.'de ise alüminyum boru ile yapılan bir deney sırasında ilk 5. saniyede elde edilen görüntü verilmiştir. İlk 6 piyezometre borusu başlangıçtan itibaren $L=0.2$ m mesafeden başlayarak 0.1 m aralıklarla dizilmiştir, sonuncusu ise $L=1.7$ m mesafesindedir.



Şekil 2. Deney düzeneği



Şekil 3. Alüminyum boru 1. deney 05. saniyede çekilen görüntü ($Re = 50067$)

Deneylerde en az 105 sn görüntü alınmış, beşer saniye aralıklarla görüntü durdurularak yirmi bir zaman diliminde statik basınç ölçümleri yapılmıştır. Her bir kesitteki statik basınç değerlerinin ortalaması alınmış, birbirine yakın basınç prizleri arasındaki ortalama basınç farkından yararlanarak çeper kayma gerilmeleri tespit edilmiştir. Boru uzunluğu, hidrodinamik geçiş uzunluğu ve tam gelişmiş akış bölgesini de kapsayacak kadar uzun seçilmiştir. Bu borulara hidrodinamik geçiş bölgesinde sık aralıklarla tam gelişmiş akış bölgesinde ise sadece giriş ve çıkışta olmak

üzere çok sayıda basınç prizleri yerleştirilmiştir. Her bir boru için ve değişik Reynolds sayılarında kayma gerilmesinin boru boyunca değişimi grafiksel olarak sunulmuştur.

Deneylerde Reynolds sayısı, oda sıcaklığında bulunan 27 °C sıcaklıkta bulunan suyun özellikleri referans alınarak Eşitlik 1 yardımı ile hesaplanmıştır. Eşitlik 1'de V_{ort} ortalama hız değeri (m/s), ρ yoğunluk değeri (kg/m³), D boru çapı değeri (m) ve μ (Pa.s) dinamik viskozite değerini göstermektedir.

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskozite Kuvveti}} = \frac{V_{ort} \times D}{\nu} = \frac{\rho \times V_{ort} \times D}{\mu} \quad (1)$$

Deney çalışmasında statik basınç yükseklikleri ve hacimsel debi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerle Reynolds sayısı ve çeper kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerden belirsizlik değeri belirlenirken Kline ve McClintock tarafından belirlenen yöntem (Eşitlik 2) esas alınmıştır (Kline 1953, Holman 1989). Eşitlik 2.'de x belirsizlik özellikleri, W ise belirsizlik değerini ifade eder. Bu çalışmada çeşitli parametreler için hesaplanan belirsizlik analizi Tablo (1) de gösterilmiştir.

$$W_x = \left[(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots \dots \dots \dots (x_n)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Tablo 1. Belirsizlik Değerleri

Parametre	Belirsizlik Değeri (%)
Basınç Kaybı Ölçümlerinde	±%3.2
Kütle ve zaman ölçümlerindeki	±%1.1
Boru boyundaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik	±%1
Boru çapındaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik	±%1
Fiziksel Özelliklerin Belirsizliği (Viskozite ve Yoğunluk)	±%1
Reynold sayısındaki belirsizlik	±%2.7
Sürtünme faktöründeki belirsizlik	%7.4

Kayma Gerilmesi

Dairesel bir boruya üniform hızla giren akışkan çeperde kaymama koşulundan dolayı boru yüzeyi ile temasta olan tabakadaki akışkan parçacıkları tamamen durur. Boru çeperindeki kayma gerilmesi τ_w yüzeydeki hız profilinin eğimi ile ilgilidir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş bölgede, hız profili değişmeden kaldığı gibi çeper kayma gerilmesi de sabit kalır. Borunun hidrodinamik giriş bölgesindeki akışı dikkate aldığımızda sınır tabaka kalınlığının en az olduğu boru girişinde çeper kayma gerilmesi en yüksek değerdedir. Bu nedenle borunun girişinde basınç düşüşü daha fazladır ve giriş bölgesinin etkisi, borunun tamamı için olan ortalama sürtünme faktörünü daima artırma yönündedir (Hasan, 2018). Bir boru üzerinde farklı iki noktadaki çeper kayma gerilmesi; basıncın L boru boyunca değişimi ile hızın boru yarıçapı boyunca değişimi kullanılarak Eşitlik (3) ile hesaplanır.

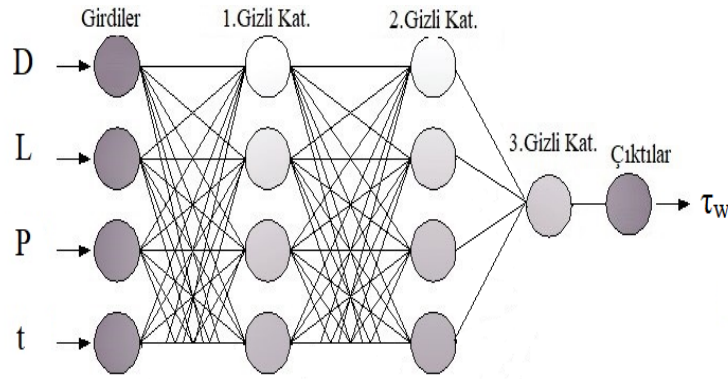
$$\tau_w = \frac{(D \div 2) \times (P_1 - P_2)}{2 \times (L_2 - L_1)} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'e göre; D boru çapı, P her bir basınç prizindeki basınç, L ise her bir basınç prizi arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları ya da kısaca YSA; insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. YSA, belirli değerlere dayanarak, girdi alanında olan noktaları çıktı alanında olan eş noktalara belli bir fonksiyonla bağlamaktadır (Teti vd. 2010). Yapay sinir ağları, örüntü tanıma, tahmin etme, sınıflandırma vb. geniş uygulama alanına sahiptir. Yapay sinir ağları, insanlara benzer olarak örnekler ile öğrenirler. Bu nedenle veri seti, eğitim ve test kümesi olarak iki kısma ayrılır (Fındık vd. (2010).

YSA’da tahminsel model oluşturmak için MATLAB 2016a yazılımı kullanılmıştır. Model oluşturmak ve tahminleme işlemleri için her bir boru çeşidinden 1. ve 2. ölçüm noktaları arasındaki basınç farkı hesaplamaları dikkate alınmıştır. Tahminsel model için 64 giriş verisi 16 çıkış verisi kullanılmıştır. Giriş verileri çap D, Boru uzunluğu L ve süre t olarak seçilmiş, çıkış verisi ise kayma gerilmesi τ_w olarak seçilmiştir. Oluşturulan YSA modelinin yapısı Şekil 4.’de verilmiştir.



Şekil 4. YSA yapısı

YSA kullanılarak elde edilen tahminsel modelin doğruluğunu belirlemek için ortalama karesel hata (MSE) ve kök ortalama karesel hata (RMSE) analizleri yapılmıştır. Yapılan hata analizlerine ait bilgiler Tablo 2.’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Hata Analizleri, Formülleri ve Parametreleri

Hata Analizi	Formülü	Parametreler
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{exp,i} - A_{ANN,i})^2$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Veri Seti Sayısı
RMSE	$\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{n}}$	P: Tahmin Değeri A: Gerçek Değer n: Veri Seti Sayısı

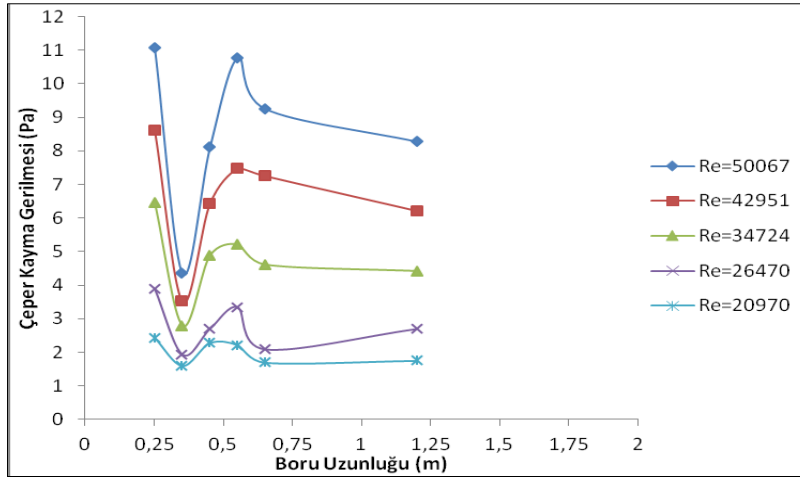
BULGULAR

Deneylerde 5 farklı boru tipi için tam gelişmiş akışın başladığı yerler Tablo 4 de gösterilmiştir. Tablo 4’e göre tam gelişmiş akışın oluştuğu en kısa mesafeye sahip boru tipi galvanizli borudur.

Tablo 4. Boru tipilerine göre Tam gelişmiş akışın başlama mesafesi

Boru Türü	Tam gelişmiş akışın başlama mesafesi
Alüminyum	25D
Bakır	26D
Siyah	23.6D
Galvanizli	23.4D
PPRC	31.7D

Şekil 5-9’ da farklı malzemeden yapılmış tüm borular için çeper kayma gerilmesinin değişik Reynolds sayılarında boru boyunca değişimi görülmektedir.

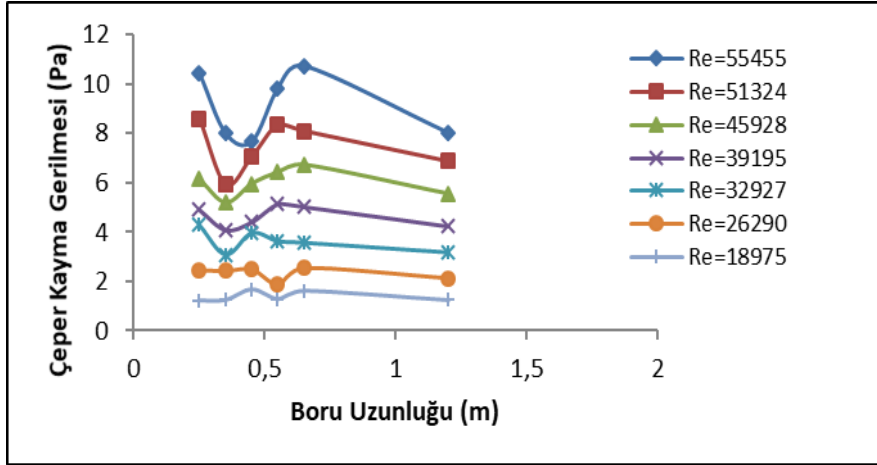


Şekil 5. Alüminyum boru için boru boyunca çeper kayma gerilmesi τ_w ' nin değişimi.

Boru girişinden itibaren gelişen akış kısmında kayma gerilmesi $L_e/D \cong 13.5$ 'a kadar ani bir şekilde düşmekte, sonra $L_e/D \cong 21$ 'e kadar tekrar yükselmekte ve ardından biraz daha düşükten sonra tam gelişmiş akış bölgesinde ($L_e/D \cong 25$ 'den biraz daha ileride) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu mesafelerin tüm Reynolds sayılarında yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi duvar kayma gerilmesi boru girişinde ani bir düşüş gösterirken sabit değerlere ulaşana kadar gösterdiği değişim parabolik bir eğriyi göstermiştir. Eğrinin değişen kısmı boru girişinde gelişen akışı gösterirken değişmez kısım ise tam gelişmiş akışı göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi duvar kayma gerilmesi minimum bir değerden sonra artmaktadır. Artmaya başlamasının nedeni ise akışta oluşmaya başlayan türbülansdır. Duvar kayma gerilmesinin minimum değer gösterdiği nokta (L_e) laminar akışın son bulduğu ve türbülansın başladığı noktadır. Burada giriş uzunluğu, L_e , kayma gerilmesi sabit değerlere ilk ulaştığında boru girişinden itibaren ölçülen mesafedir.

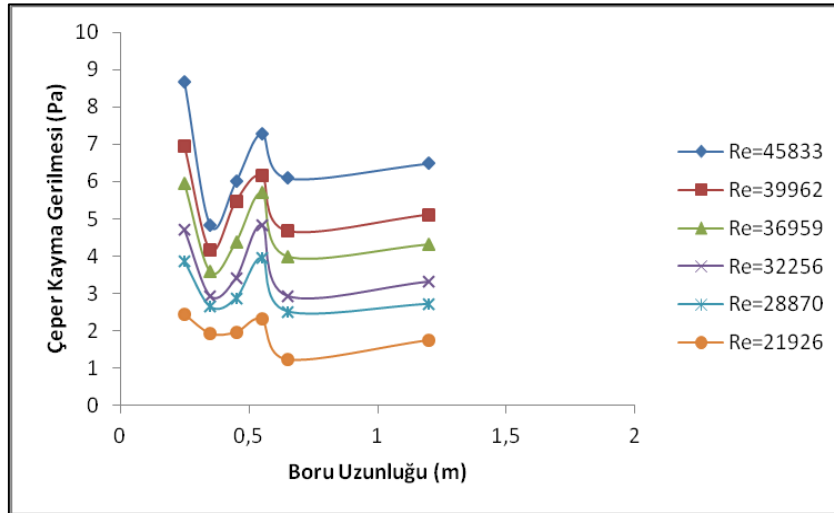
Büyük Reynolds sayılarında gelişen akış bölgesinde kayma gerilmesindeki ani düşüş ve yükseliş daha belirgin olurken, düşük Reynolds sayılarında bu çalkantı daha da azalmaktadır. Alüminyum borunun 0.35 metresi duvar kayma gerilmesinin minimum değeri gösterdiği nokta olup laminar akışın son bulduğu ve türbülansın başladığı noktadır. Borunun 0.65 metresinde ise tam gelişmiş türbülanslı akışın başladığı görülmektedir.

Şekil 6’ da bakır boru için çeper kayma gerilmesinin değişik Reynolds sayılarında boru boyunca değişimi görülmektedir. Bakır borunun 0.35 metresi duvar kayma gerilmesinin minimum değeri gösterdiği nokta olup laminar akışın son bulduğu ve türbülansın başladığı noktadır. Borunun 0.65 metresinde ise tam gelişmiş türbülanslı akışın başladığı görülmektedir. Alüminyum borudakine benzer şekilde boru girişinden itibaren gelişen akış kısmında kayma gerilmesi $L_e/D \cong 14$ 'e kadar ani bir şekilde düşmekte, sonra $L_e/D \cong 22$ 'e kadar tekrar yükselmekte ve ardından biraz daha düşükten sonra tam gelişmiş akış bölgesinde ($L_e/D \cong 26$ 'den biraz daha ileride) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bakır boruda düşük Reynolds sayılarında bu karakter bozulmakta ve daha düzgün bir kayma gerilmesi elde edilmektedir.



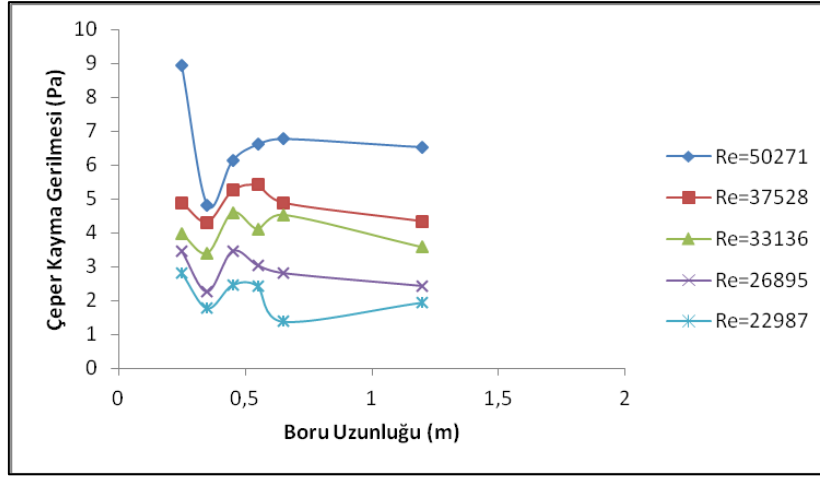
Şekil 6. Bakır boru için boru boyunca çeper kayma gerilmesi τ_w ' nin değişimi.

Şekil 7' de siyah boru için çeper kayma gerilmesinin farklı Reynolds sayılarında boru boyunca değişimi görülmektedir. Siyah boruda da alüminyum borudakine benzer şekilde boru girişinden itibaren gelişen akış kısmında kayma gerilmesi $L_t/D \cong 12.7$ 'ye kadar ani bir şekilde düşmektedir. Daha sonra $L_t/D \cong 20$ 'e kadar tekrar yükselmekte ve ardından biraz daha düştükten sonra tam gelişmiş akış bölgesinde ($L_t/D \cong 24$ 'den biraz daha ileride) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



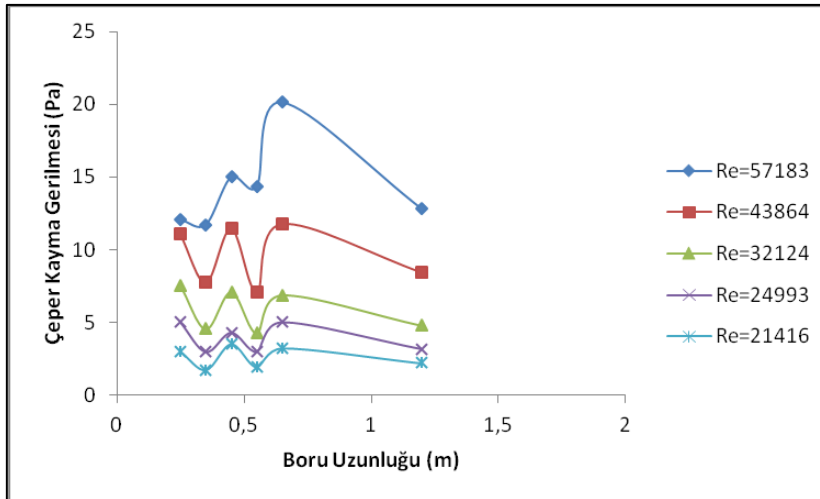
Şekil 7. Siyah boru için boru boyunca çeper kayma gerilmesi τ_w ' nin değişimi.

Şekil 8' de galvanizli boru için çeper kayma gerilmesinin değişik Reynolds sayılarında boru boyunca değişimi görülmektedir. Boru girişinden itibaren gelişen akış kısmında kayma gerilmesi $L_t/D \cong 13$ 'e kadar ani bir şekilde düşmekte, sonra $L_t/D \cong 20$ 'e kadar tekrar yükselmekte ve ardından biraz daha düştükten sonra tam gelişmiş akış bölgesinde ($L_t/D \cong 23.5$ 'dan biraz daha ileride) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu mesafelerin tüm Reynolds sayılarında yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Galvanizli boru için boru boyunca çeper kayma gerilmesi τ_w ' nin değişimi.

Şekil 9'da PPRC boru için çeper kayma gerilmesinin değişik Reynolds sayılarında boru boyunca değişimi görülmektedir. Burada kayma gerilmesinin değişimi önceki borulardan biraz farklı bir karakter göstermiştir. $L_t/D \cong 12$ ile $L_e/D \cong 32$ aralığında kayma gerilmesi iki kez iniş çıkış yaparak tam gelişmiş akış bölgesinde yaklaşık sabit kalmıştır. Bunun nedeni ise plastik boruda iç çapın düşük olmasıdır. Çünkü aynı Reynolds sayısı düşünüldüğünde düşük çaplı boruda akış hızı daha yüksektir. Akış hızı laminer akış kararlılığının erken bozulmasında çok etkilidir bu nedenle geçiş mesafesini etkilemektedir.



Şekil 9. PPRC boru için boru boyunca çeper kayma gerilmesi τ_w ' nin değişimi.

Boruların basınç değeri tahmini için Matlab 2016a yazılımında YSA kullanılmıştır. Deney düzeneğinde yapılan ölçümlerde en yakın Reynolds değerlerine göre 5 farklı malzemeden yapılmış boruların, boru boyunca ölçüm alınan L noktalarındaki kayma gerilmesi değerleri ve YSA tarafından tahmin edilen kayma gerilmesi değerleri Tablo 4.'de gösterilmiştir. Reynolds değerleri, Alüminyum boru için 50067, Bakır boru için 51324, Siyah boru için 45833, Galvanizli boru için 50271 ve PPRC boru için 57183 değeri olarak referans alınmıştır. Tablo 4.'de verilen deneysel ve tahminsel çeper kayma gerilmesi değerleri arasında her iki değerinde birbirlerine en yakın olduğu boru cinsi bakır borudur. Bu benzerlik, YSA kullanılarak yapılan tahminsel modelin başarılı bir şekilde çeper kayma değerlerini tahmin ettiğini göstermektedir. YSA'da tahminsel model için 2 farklı hata analizi yapılmıştır. Elde edilen hata oranları Tablo 5.'te gösterilmiştir. Tablo 5'e göre çeper kayma gerilmesi değerleri için oluşturulan tahminsel modeller arasında en az hata oranına sahip boru cinsi bakır borudur.

Tablo 4. Boruların Deneysel ve Tahminsel Çeper Kayma Gerilmesi Değerleri

Ölçüm Noktası	Alüminyum		Bakır		Demir (Siyah)		Galvanizli		PPRC	
	Deneysel	Tahminsel	Deneysel	Tahminsel	Deneysel	Tahminsel	Deneysel	Tahminsel	Deneysel	Tahminsel
L1	11.08	10.45	10.40	10.26	8.60	8.25	8.90	8.11	12.06	11.82
L2	4.37	4.21	7.90	7.82	4.80	4.65	4.80	4.52	11.73	11.54
L3	8.10	7.96	7.60	7.41	5.90	5.41	6.10	5.96	15.01	14.69
L4	10.70	10.14	9.80	9.64	7.20	7.02	6.61	6.24	14.34	14.02
L5	9.30	9.02	10.70	10.44	6.09	6.00	6.77	6.62	20.13	19.55
L6	8.20	8.11	8.01	7.95	6.48	6.22	6.52	6.32	12.81	12.08

Tablo 5. Tahminsel Modellerin Boru Tiplerine Göre Hata Oranları

Hata Oranları	Boru Tipi				
	Alüminyum	Bakır	Demir (Siyah)	Galvanizli	PPRC
Mean Absolute Error	0.1309	0.1028	0.1293	0.2011	0.2644
Root Mean Squared Error	0.162	0.1059	0.1661	0.2741	0.2859

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Şekiller genel olarak incelendiğinde gelişme bölgesindeki akış karakterinin hem Reynolds sayısına hem de boru pürüzlülüğüne bağlı olarak değişim gösterdiği söylenebilir. Pürüzlülüğü yüksek borularda kayma gerilmesindeki ani düşüş ve yükseliş daha belirgin olarak ortaya çıkarken, pürüzlülüğü düşük borularda bu olay daha tedrici olarak yaşanmakta, ancak gelişme bölgesinde birden fazla dalgalanma görülmektedir. Siyah, Galvanizli, Alüminyum ve bakır boru pürüzlülük değerleri çok yakın olmasına rağmen plastik boru değerleri daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni ise plastik boruda çapın düşük olmasıdır. Çünkü aynı Reynolds sayısında inceleme yapıldığında, düşük çapı boruda akış hızı daha yüksektir. Akış hızı laminer akış kararlılığının erken bozulmasında çok etkilidir bu nedenle geçiş mesafesini etkilemektedir. Akış hızı arttırıldığında laminerden türbülansa geçiş mesafesi kısalmaktadır. Alüminyum boru ve bakır boru çapları aynı olmasına rağmen yakın Reynolds sayılarında alüminyum boru akışının çeper kayma gerilmesi değerleri daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni ise alüminyum borunun pürüzlülük değerinin bakır borununkinden çok çok daha yüksek olmasıdır. Aynı şartlarda daha pürüzlü yüzeyler laminer akışı daha erken bozar dolayısıyla geçiş mesafesi kısalmaktadır. Farklı malzemelerden yapılan borulardaki kayma gerilmeleri için bir hesapsal zeka yöntemi olan yapay sinir ağı kullanılarak tahminsel bir modeller elde edilmiştir. Elde edilen tahminsel modellerin geçerliliklerini değerlendirmek için MAE ve RMSE hata analizleri yapılmıştır. YSA, MAE hata analizi sonuçlarına göre basınç değerleri tahminini Alüminyum boru için %13, Bakır boru için %10, Demir boru için %12, Galvanizli boru için %20 ve PPRC boru için %26 hata oranı ile tahmin etmiştir.

Bu çalışmada basınç kayıpları gözle okuma yerine kamera kullanarak daha hassas tayin edilebilmiştir. Dolayısıyla geçiş bölgesindeki kayma gerilmesinin boru boyunca değişimi de incelenebilmiştir. Daha doğru yorumlar yapabilmek için çok daha fazla sayıda farklı pürüzlülükteki boruların incelenmesi gerekir. Deneysel çalışma yapan ve bu tür basınç ölçümlerine ihtiyaç duyan araştırmacıların pahalı ölçme aletleri alma yerine bu yöntemi kullanmaları tavsiye edilebilir. Kayma gerilmeleri için farklı hesapsal zekâ yöntemleri kullanılarak ve daha fazla veri toplanarak daha başarılı tahminsel modeller elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Abraham, J.P., Sparrow, Tong, J.C.K., Bettenhausen, D.W. (2010). Internal flows which transit from turbulent through intermittent to laminar. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 256–263.

Ahn, J., Lee, J., & Sung, H. J. (2017). Contribution of large-scale motions to the Reynolds shear stress in turbulent pipe flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 66, 209-216.

Augustine J.R. (1988). Pressure drop measurements in the transition Region for a circular tube with a square-edged entrance. *Doctora thesis*. Bachelor of Science in Mechanical Engineering The University of Southwestern Louisiana Lafayette, Louisiana

Barbin A.R. and Jones J.B. (1963). Turbulent Flow in The inlet Region of A Smooth Pipe. *J. Basic Eng.* 85(1), 29-33

Çengel, Y. A., Cimbala, J.M. (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, Birinci baskıdan çeviri, İzmir Güven Kitabevi.

Doherty, J., Ngan, P., Monty, J., and Chong, M., (2007). The Developments of Turbulent Pipe Flow. *16th Australian Fluid Mechanics Conference*, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, Dec. 2–7, pp. 266–270.

Findik, T., Taşdemir, Ş., Şahin, İ. (2010). The use of artificial neural network for prediction of grain size of 17-4 pH stainless steel powders, *Sci. Research and Essays*, 5, 11, 1274-1283.

Ghajar, A.J. and Tam, L.M. (1995). Flow Regime Map for a Horizontal Pipe with Uniform Wall Heat Flux and Three Inlet Configurations. *Experimental Thermal and Fluid Science*; 10:287-297.

Hasan, D. Ü. Z. (2018). Daimi ve Sıkıştırılmaz Boru Akışında Giriş Uzunluğunun Sayısal Analizi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 8(2/2), 1-12.

Holman, J.P., (1989). *Experimental Methods for Engineers*, 5th edition Mc-Graw Hill Company, New York.

Huang, L. M., and Chen, T. S., (1974). Stability of the Developing Laminar Pipe Flow, *Phys. Fluids*, 17, pp. 245–247.

Huang, L. M., and Chen, T. S., 1974, Stability of Developing Pipe Flow Subjected to Non Axisymmetric Disturbances, *J. Fluid Mech.*, 63, pp. 183–193

Kerswell, R. R., (2005). Recent Progress in Understanding the Transition to Turbulence in a Pipe. *Institute of Physics Publishing, Nonlinearity*, 18, pp. R17–R44.

Kline, S.J. and McClintock, F.A., (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical engineering*, 75, 3-8, 1953.

Laufer, J., (1953). The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow. *NACA*, Report No. 1174.

Liu, Y., & de Bruyn, J. R. (2018). Start-up flow of a yield-stress fluid in a vertical pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 257, 50-58.

Nikuradse, J., (1932). Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren. *Forsch. Arb. Ing.-Wes. Heft*, 356, pp. 1–36.

Özışık N., (1985). HEAT TRANSFER: a basic approach. *MackGraw-Hill Book Co*, international edition, New York.

Perry, A. E., and Abel, C. J., (1975). Scaling Laws for Pipe-Flow Turbulence. *J. Fluid Mech.*, 67, pp. 257–271.

Patel V.C., Head M.R. (1974). Some observations on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows. *J. Fluid Mech.* 25, 181.

- Sarpkaya, T., (1975). A Note on the Stability of Developing Laminar Flow Subjected to Axisymmetric and Non-Axisymmetric Disturbances. *J. Fluid Mech.*, 68, pp. 345–351.
- Singh, J., Rudman, M., & Blackburn, H. M. (2017). The effect of yield stress on pipe flow turbulence for generalized Newtonian fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 249, 53-62.
- Sokhal, K. S., Gangacharyulu, D., & Bulasara, V. K. (2018). Effect of guar gum and salt concentrations on drag reduction and shear degradation properties of turbulent flow of water in a pipe. *Carbohydrate polymers*, 181, 1017-1025.
- Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 59 (2),717-739.
- Vasques, J., Cherdantsev, A., Cherdantsev, M., Isaenkov, S., & Hann, D. (2018). Comparison of disturbance wave parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97,484-501.
- Willis, A. P., Peixinhoy, J., Kerswell, R. R., and Mullin, T., (2008). Experimental and Theoretical Progress in Pipe Flow Transition. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 366_1876_, pp. 2671–2684.
- White F.M., (2003). Fluid Mechanics, 5th edition, *McGraw-Hill Book Co*, New York.