

Daimi ve Sıkıştırılmaz Boru Akışında Giriş Uzunluğunun

Sayısal Analizi

Hasan DÜZ¹

¹Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, BATMAN,

hasan.duz@batman.edu.tr

Geliş Tarihi/Received:

27.07.2018

Kabul Tarihi/Accepted:

19.12.2018

Yayın Tarihi/Published:

27.12.2018

ÖZ

Dairesel boru akışlarında, viskoz etkiler sonucu boru girişinden itibaren akış önce gelişir ve sonra tam gelişmiş akış olur. Kayma gerilmesi, hız profili ve türbülans akış istatistikleri gibi akış özellikleri gelişen akışta değişirken tam gelişmiş akışta ise bunlar değişmez olur. Bu nedenle tam gelişmiş boru akışları çeşitli ampirik bağıntılarla çözüm bulurken gelişen boru akışları hala tam olarak çözülebilmemiş değildir. Boru girişinden itibaren tam gelişmiş akış oluşuncaya kadar ölçülen mesafeye giriş uzunluğu denir. Özellikle ısıtma ve soğutma gibi kısa borulu ısı transfer işlemlerinde giriş uzunluğunun bilinmesi basınç kayıplarının hesaplanması için oldukça önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada daimi ve borulu su akışlarında giriş uzunluğu, farklı boru çapı, pürüzlülüklerinde ve 2000-25000 aralığındaki Reynolds sayılarında sayısal çözümle araştırılmıştır. Analizler sonucunda boyutsuz giriş uzunluğu için sayısal verilerle uyumlu sayısal bir bağıntı önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: giriş uzunluğu, boru akışı, sayısal boru akışı

Numverical Analysis of Entrance Length in Steady and Incompressible Pipe Flow

ABSTRACT

In circular pipe flows, due to viscous effects the flow develops first from pipe inlet then becomes a fully developed flow. Flow characteristics such as shear stress, velocity profile and turbulence flow statistics while change in the developing flow, they do not change in the fully developed flow. Therefore, while the fully developed pipe flows find solutions with various empirical relations, the developing pipe flows is still not fully solved. The distance measured from the pipe inlet until the fully developed flow exists is called the entrance length. Especially in short-pipe heat transfer processes such as heating and cooling, to know the entrance length is very important to determine the pressure losses. Therefore, in this study, the entrance length were investigated with numerical solution across different pipe diameters, roughnesses and Reynolds numbers ranging from 2000 to 25000 in the steady and tubular water flows. As a result of the analysis, a numerical correlation was proposed for the dimensionless entry length which was well agree with the numerical data.

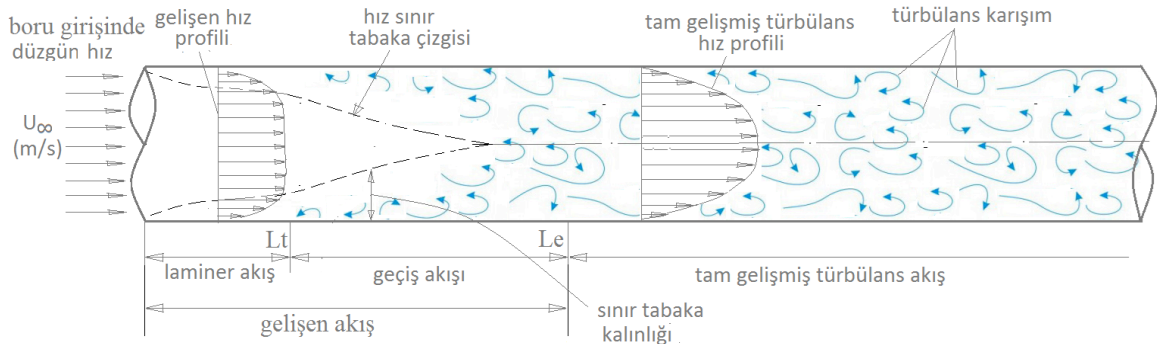
Keywords: entrance length, pipe flow, numerical pipe flow

1. GİRİŞ

Dairesel veya dairesel olmayan borularda laminerden türbülansa geçiş akışları pek çok endüstriyel uygulamada karşılaşılmaktadır. Bu nedenle geçiş akışını doğru tahmin etmek, örneğin türbülansa geçişin daha erken başlamasını istemek veya geciktirmeye çalışmak, bu gibi akış kontrol durumlarında önemli olduğu görülmüştür (Zanoun vd., 2009:2). Boru akışlarında geçiş akışlarının konusu Osborne Reynolds'un 1883 'te yaptığı iyi-bilinen dairesel boru akış deneyine kadar uzanır. Osborne Reynolds

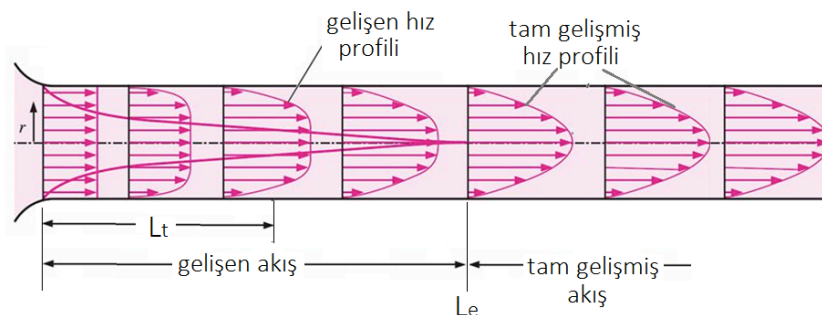
gerçekleştirdiği cam borudaki su akışı deneyiyle akışın iki farklı şekilde aktığını keşfetmiştir. Bu akış türlerini laminer ve türbülans olarak tanımlamıştır. Laminer akış düzenli akış hareketi iken türbülanslı akışlar düzensiz ve içiçe karışarak ilerleyen akış hareketidir. Genelde tüm akışlar laminerdir fakat bazı etkiler akış kararlılığını bozar ve akışı türbülanslı yapar. Bu nedenle hassas akış şartları sağlandığı takdirde tüm akışlar laminer kalabilir (Özışık, 1985: 226).

Katı düz yüzey üzerinden akışlarda, akış yüzey girişinde laminer fakat belirli bir akış mesafesinden sonra akışı tetikleyen bozuntular akışı türbülanslı yapar. Şekil 1 'de boru içerisinde akan bir akışkanın laminer, geçiş ve türbülans olma aşamaları gösterilmiştir. Girişten itibaren akışın ilk türbülansa uğradığı akış mesafesine geçiş uzunluğu " L_t " denir. Geçiş uzunluğundan sonra laminer-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 (2005) tarafından ve son zamanlarda ise Willis vd. (2008) tarafından incelenmiştir. Girişten itibaren akış tam türbülanslı oluncaya kadar ölçülen mesafeye ise giriş uzunluğu (L_e) denir. Laminerden türbülansa geçişte giriş pürüzlülüğü, giriş geometrisi, boru iç yüzey pürüzlülüğü, girişte akışı karıştırmak ve akışa ısı geçişi gibi etkenler bu iki akış uzunluğu üzerinde oldukça etkili olmaktadır (Ghajar ve Tam, 1995:187). Genel olarak zaman ortalamalı akış özellikleri (hız ve basınç alanı) ve türbülans özellikler (türbülans çalkantı hızları u'^2) artık akış boyunca ilk değişmez olduklarında tam gelişmiş akışın başladığı kabul edilir (Zagarola ve Smits,1998:36).



Şekil 1. Boru girişinde gelişen akış ve tam gelişmiş akış

Şekil 2 gelişen bir boru akışını göstermektedir. Boru girişinden itibaren viskoz etkiler sonucu gelişen hız sınır tabakası akış boyunca kalınlığı artar. Sınır tabaka kalınlığı boru yarıçapı ile sınırlandığından 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. (2007) zaman ortalamalı türbülans akış istatistikleri tümüyle değişmez olduğunda tam gelişmiş akışın başladığı kabulünün yapılması gerektiğini bildirmiştir.



Şekil 2. Gelişen ve tam gelişmiş akışta hız profili değişimi

Tam gelişmiş laminer veya türbülans boru akışları teorik veya ampirik bağıntularla büyük ölçüde çözülmüşken gelişen akış kısmı ise hala tam olarak çözülememiştir (Özışık, 1985:226; White, 2003:240).

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 ve Tam, 1994: 287).

1.1 Literatür Araştırması

Nikuradse (1932) akış yönlü mesafelerde ölçtüğü kesit ortalama hız profillerini karşılaştırarak tam gelişmiş akışı 25D ile 40D (D : boru çapı) arasındaki boru çap mesafelerinde oluştuğunu bildirmiştir. Benzer yolla, Laufer (1953) ortalama hız dağılım profillerini karşılaştırarak giriş uzunluğunun 30D olduğunu bildirmiştir. Eksen simetrik akış bozuntularının verildiği deneysel akışlarda, Sarpkaya (1975) tam gelişmiş akışın 30D mesafeden sonra ve Haung ve Chen (1974) ise 32D mesafesinden sonra oluştuğunu bildirmiştir. Bununla beraber, eksen simetrik olmayan bozuntularının verildiği akışlarda ise, Huang ve Chen (2004) 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. 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. Bununla birlikte, bir kriter olarak tam gelişmiş akış için büyük ölçekli türbülans yapıların gelişmeleri gözlemlendiğinde ise giriş uzunluğunun daha da yüksek olduğuydu. Bu yapılar oldukça yavaş gelişmektedir. Bu büyük ölçekli yapılar daha erken olduğu düşünülen tam gelişmiş akış noktasını geçtikten sonra bile boyutsal olarak gelişmeleri devam etmektedir. Bu nedenle büyük ölçekli yapılar daha uzun bir gelişme uzunluğu gerektirdiğinden, tam gelişmiş akış için bir ana kriter olarak ortalama hız veya yüksek dereceden türbülans istatistiklerin kullanılması yerine bu yapıların gelişmeleri üzerinde durulması gerektiğini önermiştir. Zagarola ve Smits (1998) akış bozuntularının verilmediği akışlarda, tam gelişmiş akışın oluştuğundan emin olmak için 160D 'lik bir uzunluğun alınması gerektiğini bildirmiştir. Sonuç olarak giriş uzunluğu gözlemlenen akış karakteristiklerine göre farklı olabilmektedir. Dolayısıyla giriş uzunluğu basınç gradyeni için kısa, ortalama kesit hız profili için uzun ve türbülans istatistikleri için daha da uzun olabilmektedir.

Aşağıda Tablo 1'de ise boru akışları ile yapılan deneysel çalışmalarda ölçülen giriş uzunlukları verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi boyutsuz giriş uzunlukları (L_e/D) geniş bir Reynolds sayı aralığında ve türbülanslı akışlar için bildirilmiştir. Çalışmaların çoğunda ise boru giriş geometrisinden bahsedilmemiştir. Tablo 1'de ve yukarıda verilen literatür bilgilerine göre giriş uzunlukları 25D ile 80D çap uzunluğu arasında değişkenlik göstermiştir. Tabloda ayrıca giriş uzunluğunu hesaplamak için ampirik bağıntılarında önerildiği görülmektedir.

Yukarıda verilen önemli çabalara rağmen, tam gelişmiş akış için kesin bir giriş uzunluğundan veya bağıntısı bahsetmek zordur. Bununla birlikte tam gelişmiş akışın oluştuğundan emin olmak için akışkanlar mekaniği topluluğu yeteri büyüklükte L_e / D mesafelerin alınması gerektiğini önermektedir. Bununla birlikte akışın tam gelişmiş olduğundan emin olmak için gerekli olan minimum giriş uzunluk kriterini ilgilendiren çalışmalarda bir bütünlük sağlamadıkları görülmektedir.

Bu çalışmada ise görülen belirsizlikleri gidermek amacıyla bu çalışmada giriş uzunlukları $2 \times 10^3 - 25 \times 10^3$ gibi düşük Reynolds sayı aralığında sayısal yöntemle araştırılmıştır. Sayısal çalışmada girişin konik tipli ve üst akımın türbülanslı olduğu kabul edilerek boru girişinde düzgün hız profilli ve yüksek türbülans seviyeli ($I = \%7$) bir akış giriş sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Sayısal çözüm güvenilirliğini sağlamak amacıyla sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analiz edilen sayısal sonuçlardan boyutsuz giriş uzunluğunu ifade eden sayısal iki bağıntı çıkarılmıştır.

Table 1. Deneysel çalışmalardan aktarılan boyutsuz giriş uzunlukları

Boyutsuz giriş uzunlukları (L_e/D)			
Ortalama akış özelliklerine göre	türbülans istatistiklerine göre	Deneysel Reynolds Sayısı	Yazarlar
80	-----	-----	Reynolds (1883)
$L_e/D = 2.09 \times 10^{-8} * Re^{-1.66}$	-----	5000-15000	Augustine (1988:65)
$L_e/D = 1.6 Re^{1/4}$	-----	$10^5 - 10^6$	Anselmet v.d. (2009:582)
$L_e/D = 4.4 Re^{1/6}$	-----		
uzun bir ampirik bağıntı	-----	$1,95 \times 10^5$	Salami (1986),
25 - 40	-----	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^6$	Nikuradse (1966)
30	-----	$5 \times 10^4 - 5 \times 10^5$	Laufer (1954:45).
50	80	$10^3 - 10^4$	Patel ve Head (1969:----)
-----	70	$3 \times 10^4 - 1 \times 10^5$	Zanoun ve Egbers (2016:151)
-----	72	175000	Perry ve Abell (1978:245)
50	80	$1 \times 10^5 - 2 \times 10^5$	Doherty v.d. (2007:269)
40 kadar görülmeyen	-----	388000	Barbin ve Jones (1963:33)
-----	70	$1.5 \times 10^5 - 8.5 \times 10^5$	Zimmer v.d. (2011:4)
Min. 131	-----	$3 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$	Zagarola ve Smits (1998)

2. YÖNTEMLER

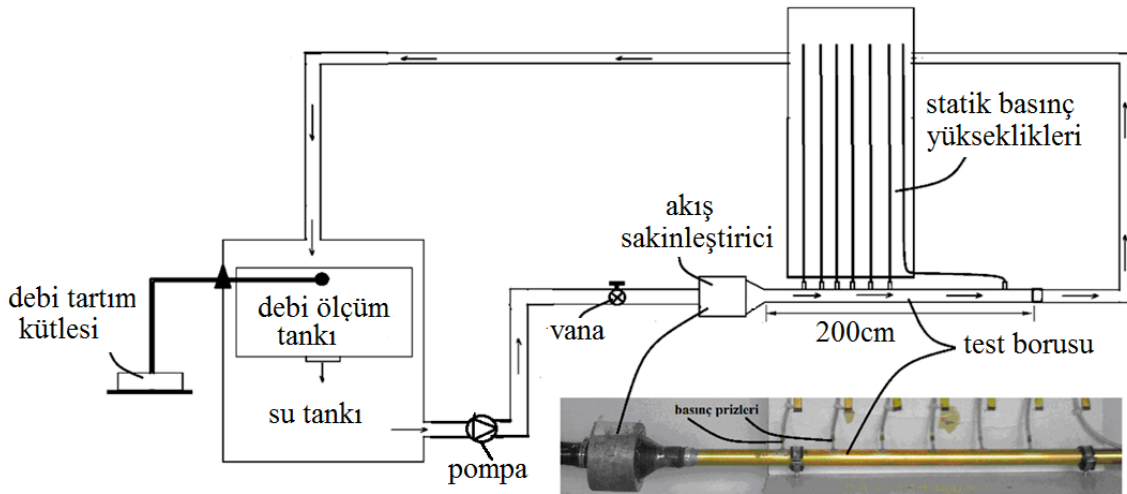
2.1 Deneysel Çalışma

İlk önce sayısal çözüme geçerlilik kazandırmak için farklı malzemelerden oluşmuş dört boru tipi ile deneysel bir çalışma yapılmıştır. Aşağıda Tablo 2 'de bu boru türleri, bağıl pürüzlülükleri ve çapları verilmiştir. Deneyleri gerçekleştirmek için Şekil 3 'te şeması gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği bir pompa, bir debi ölçüm tankı, piezometre borularının bağlandığı tahta tabela, debi ayar vanası, test boruları ve kayıt için bir kameradan oluşmaktadır. Deneysel çalışmada akışkan olarak su kullanıldı. Boru iç çeperine etki eden statik basınçları ölçmek için boruların üzerine belirli aralıklarda basınç prizleri kaynak edildi. Basınç prizlerine geçirilen plastik piezometre boruları tahta tabelaya yapıştırılmıştır ve içindeki su seviyesini ölçmek için yanına şerit metre yapıştırılmıştır. Şekil 3 'de görüldüğü gibi pompa çıkışındaki bir vana ile farklı debilerde akışlar oluşturulabilmiştir. Her akıştaki debi ise tartım tankı ile ölçülmüştür.

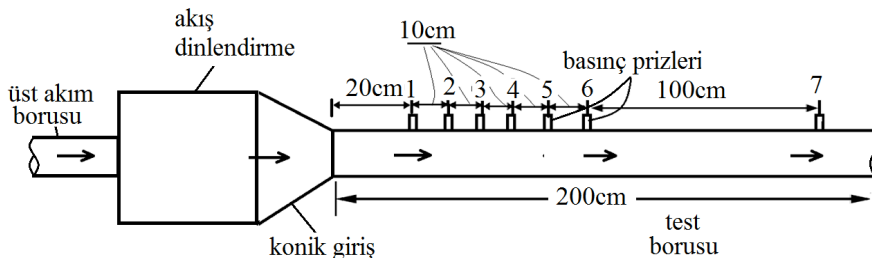
Her akışta, tabela üzerindeki hidrostatik basınç yüksekliklerin zamana bağlı değişimlerini ölçmek için piezometre borularının bağlı olduğu tahta tabela her akış için üç dakikalık süreyle kameraya kaydedilmiştir.

Elde edilen kayıtlardan beşer saniyelik aralıklarla toplam 21 tane anlık görüntüler çıkarılmıştır. Bu görüntülerden piezometredeki su yükseklikleri okunmuştur.

Test borusu bir konik ağızlı bir akış sakinleştirici elemandan sonra bağlanmıştır. Akış sakinleştiricisi akıştaki türbülans kısmen gidermek amacıyla ve konik ağız ise boruya düzgün hız profili sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu şekilde akışkanın düşük türbülanslı ve düzgün bir hız profili ile test borusuna geçmesi arzu edilmiştir. Test borusuna geçen üst akım türbülansı akışın laminerden türbülansa geçişini tetiklemede etkili olmaktadır. Deneyde kullanılan borular ve üzerindeki basınç prizlerinin mesafeleri şekilde gösterilmiştir. Deneyde 2 m 'lik test boruları kullanıldı ve bu da 72D 'lik bir akış mesafesine denk gelmektedir. Yukarıda literatür kısmında bildirildiği gibi pek çok deneysel çalışmada hız profilleri gözlemlendiğinde tam gelişmiş akışın 30D-50D arasındaki akış mesafelerinde oluştuğu bildirilmiştir. Barbin ve Jones (1963) ise akış boyunca ölçtükleri basınç gradyenine göre tam gelişmiş akış 10D-20D arasındaki mesafelerde başlamaktadır. Edinilen bu bilgilere göre test boru uzunluğu tam gelişmiş akışın bir kısmını da kapsayacak şekilde yeterince uzun seçildiği görülür. Boru üzerine yedi ayrı noktada basınç prizleri kaynak edilmiştir. Prizler arasındaki mesafeler Şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4 'te, 7. priz boru girişinden 1.7 m uzaklıkta ve 6. prizden de 1m daha aşağı akımda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4 'te görüldüğü gibi ilk altı priz akış boyunca 10cm aralıklı eşit mesafelerde yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan beş boru türü yeni imal boruları değildir bunlar kullanılmış tesisatlardan sökülen borular olmuştur. Bu nedenle yüzey pürüzlülükleri deneysel akışlardan yararlanılarak ölçülmüştür. Son iki priz tam gelişmiş akış kısmında olduklarından aralarındaki basınç farkları ölçülerek her borunun bağıl pürüzlülükleri bu yolla ölçülmüştür. Bu yöntemde tam gelişmiş akıştan alınan basınç farkları ile Darcy sürtünme faktörleri hesaplanmıştır. Bulunan Darcy sürtünme faktörleri Reynolds sayısı ile değişimlerinde uygun Colebrooke denklem değerleriyle denk gelecek şekilde karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırmada uygun Colebrooke denklem eğrisini bulmak için Colebrooke denkleminde bulunan bağıl pürüzlülük teriminin değerleri değiştirilmiştir. Karşılaştırmada iyi uyum sağlandığı takdirde girilen en son bağıl pürüzlülük değeri kullanılan borunun bağıl pürüzlülüğü değeri olmuştur. Kaydedilen bağıl pürüzlülük değerleri Tablo 2'de verilen boruların bağıl pürüzlülük değerleri olmuştur. Tablo 2 deneyde kullanılmış boru tiplerini, çaplarını ve bağıl pürüzlülüklerini vermektedir.



Şekil 3 Deney seti şeması ve deney borusu detayı



Şekil 4. Deney borusu ve basınç prizleri arasındaki mesafeler

Statik basınçlar boru üzerinde yedi ayrı noktada basınç prizlerine bağlı plastik piezometre hortumlarındaki su yüksekliklerinden okunmuştur. Her debideki boru akışı için bu piezometre hortumları kamera ile üç dakika süreyle kayıt altına alınmıştır. Her akış kaydından 21 adet görüntü elde edilmiş bu görüntülerdeki su yükseklikleri okumalarından her bir piezometre borusu için zaman ortalamalı statik basınç değerleri elde edilmiştir. Deneyle aynı paralellikte boru akışları sayısal çözümle simule edilmiştir. Sayısal çözümlerden çıkarılan statik basınç değerleri deney değerleri ile Şekil 5 'te karşılaştırılmıştır.

Table 2. Boru malzemesi, bağlı pürüzlülükleri ve çapları

Boru Türü	Çap	Bağlı pürüzlülük
	(mm)	ϵ / D
alüminyum boru	26	0,0016
bakır boru	26	0,00016
ticari çelik boru	28	0,0024
galvanizli boru	28	0,0026
plastik boru	21	0,00033

2.2 Sayısal Çalışma

Temelde akışkan akışları kütle, momentum ve enerji korunum yasalarını ifade eden diferansiyel akış denklemleriyle ifade edilir. İzotermal akışlarda (ısı transfersiz) süreklilik ve momentum denklemleri çözüm için yeterli olurken izotermal olmayan akışlarda ise her üç korunum denklemine de gerek duyulur. Korunum denklemleri basit akışlar dışında analitik çözümleri zordur bu nedenle genelde akış problemleri sayısal veya deneysel yöntemlerle çözülür. Deneysel yöntem gerçeğe yakın sonuç verir fakat maliyetlidir, yüksek zaman gerektirir ve istenilen detaylar ölçülemez bu nedenle son tercih durumundadır. Sayısal yöntem uygulamak ise matematiksel bir çözüm yöntemidir ve yaklaşık sonuç verendir. Sayısal çözüm doğruluğu deneysel verilerle desteklenmelidir. Bilgisayarların gelişmesi ile sayısal yöntemler kullanılır hale gelmiştir çünkü problemler sayısal programlarla kısa zamanda çözülebilmektedir. Sayısal çözümler bilgisayarın tükettiği elektrik dışında hemen hemen maliyeti yoktur bununla birlikte istenilen her detaya ulaşılabilir.

Türbülanslı akışlar daimi bir akış olsada akış alanı zamana bağlı sürekli değişim gösterir. Bu nedenle zamana bağlı analitik çözümleri pek mümkün değildir. Çünkü türbülanslı akışlar geniş bir aralıkta oluşabilen, gelişen, dağılan ve en sonunda yok olan türbülans akış yapılarını (girdaplar) içermektedir. Ancak sayısal yöntemler uygulanarak türbülanslı akışların zamana bağlı akış hareketliliği simule edilebilir. Akış alanında tüm türbülans akış hareketlerini zamana bağlı çözen bu yöntem doğrudan sayısal benzeşim (DNS) denir. Bu yöntem şimdiki bilgisayar kapasitesinin çok çok üstünde hesaplama gerektirdiğinden basit akışlar dışında uygulanması çok zor olan bir yöntemdir.

Türbülanslı bir akışı çözenin diğer bir yöntemi ise türbülansın zaman içerisindeki etkilerinin zaman ortalamasını almaktır. Bu şekilde türbülanslı akış zamandan bağımsız yapılır. Zaman ortalaması alınan temel akış denklemlerine ise Reynolds ortalamalı Navier-stokes denklemleri (RANS) denir. RANS denklemlerde oluşan ve türbülans etkileri taşıyan denkleme Reynolds gerilmeler denir. Reynolds gerilmeleri çözmek için pek çok yarı ampirik türbülans modeli geliştirilmiştir. Türbülanslı akışların RANS denklemlerle sayısal çözümlerinde hesaplama maliyeti DNS ile doğrudan bir çözüme göre çok çok daha düşük olmaktadır.

Bu çalışmada türbülanslı boru akışları RANS denklemlerle ve sayısal yöntem uygulanarak bilgisayar ortamında çözülmüştür. Reynolds gerilmelerin çözümünde SST k-omega türbülans modeli tercih edilmiştir. Laminerden türbülansa geçişi sağlamak için Gamma-Theta modeli kullanılmıştır (Ansys 18.2,

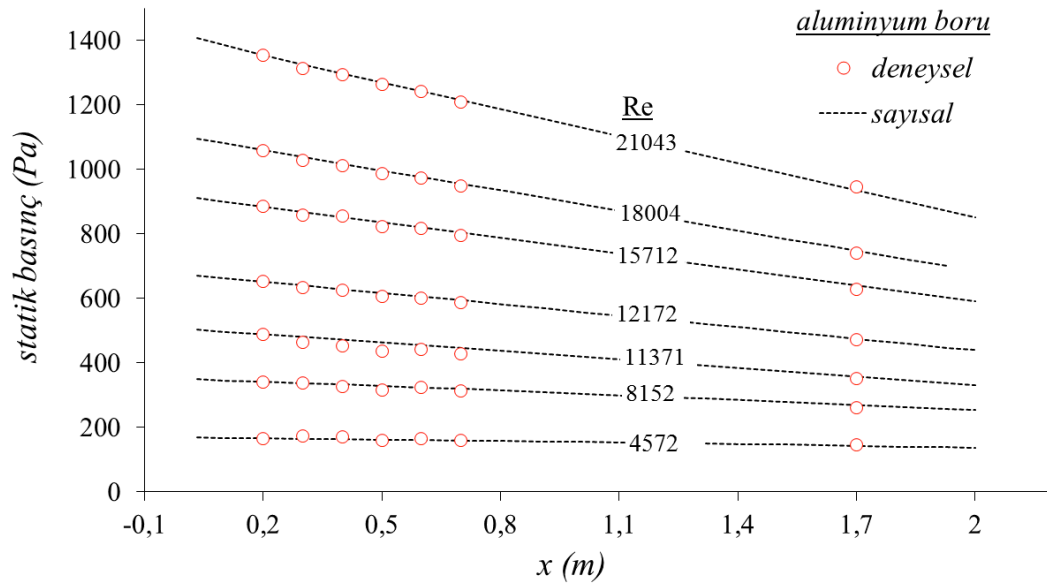
2018). Boru uzunluğu tam gelişmiş akışın bir kısmını kapsayacak şekilde yeterince uzun seçilmiştir. Sınır şartları, akışkan özellikleri ve akış türü ise yukarıda Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3 ‘te verilenlere göre geometrisi oluşturulan akış alanı CFX akış çözücü program ile çözülmüştür. Sayısal akışlar deneysel akışlar ile paralel tutulmuştur. Sayısal çözüme geçerlilik kazandırmak amacıyla yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar Şekil 5’te karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için akış boyunca basınç düşüş değerleri kullanılmıştır. Şekil 5’te görüldüğü gibi sayısal değerler deneysel verilerle çok uyumlu çıkmıştır. Bu karşılaştırmada akışlar için maksimum ve ortalama sapma miktarları ise Tablo 4 ‘te gösterilmiştir.

Table 3. Sınır şartları ve akış alanı özellikleri

<i>Akış durumu</i>	Daimi, sıkıştırılmaz ve izotermal akış
<i>Temel akış denklemleri</i>	RANS denklemler
<i>Türbülans modeli</i>	SST k-omega modeli ve Gamma-Theta modeli
<i>Boru girişi</i>	Düzgün hız profilinde ve yüksek türbülans yoğunluklu (T_U) = %7
<i>Boru duvarı</i>	pürüzlü
<i>Boru çıkışı</i>	atmosfere açık sıfır etkin basınçta
<i>akışkan</i>	27 °C ‘de su

Tablo 4 ‘te görüldüğü gibi, tüm boru akışlarında, sayısal veriler ortalama olarak %7-9 civarında deney verilerinden sapma göstermişlerdir. Böyle bir sapmanın olması doğaldır çünkü deneysel yöntemlerde ölçümler tam kesin değildir ve belirsizlikler içerebilmektedir. Her ne kadar iyi kalibre edilmiş ve test edilmiş deney ölçerler kullanılsa da yinede ölçümlerde belirsizlikler oluşabilmektedir. Bu nedenle deneysel akışlarda ölçülen değerlere uygun olarak sayısal çözüm için girilen akış özellikleri bazı çözümlerde saptalara neden olabilmektedir.



Şekil 5. akış boyunca basınç değişiminde sayısal ve deneysel verilerin karşılaştırılması

Table 4. Akış boyunca basınç değişiminde sayısal değerlerin deneysel değerlerden sapma yüzdeleri

Sapma (%)	Alüminyum Boru	Bakır Boru	Ticari Çelik Boru	Galvanizli Boru	Plastik Boru
Maksimum	±%20	±%24	±%36	±%35	±%18
Ortalama	±%7.30	±%7.70	±%7.60	±%9.40	±%9

3. SAYSAL BULGULAR

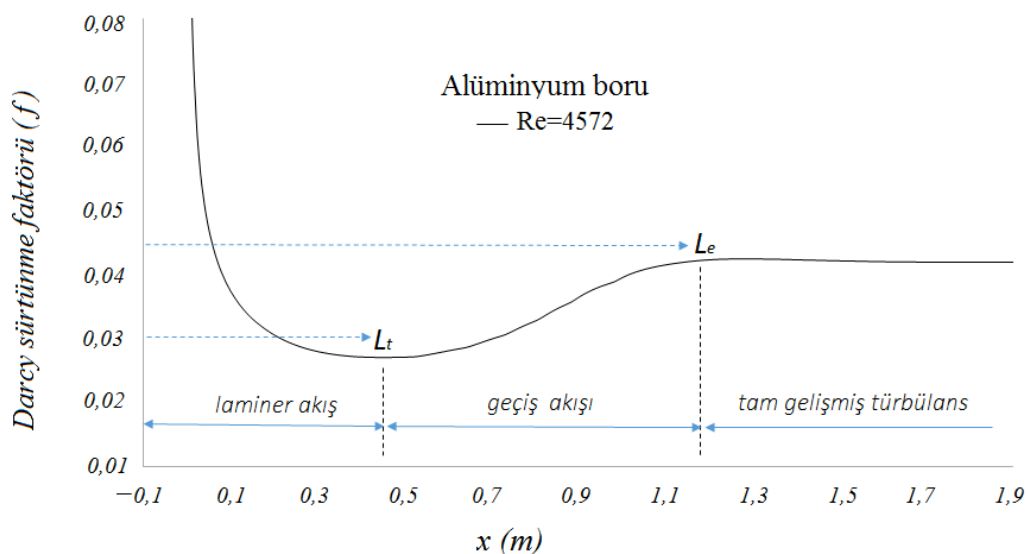
Burada giriş uzunlukları Reynolds sayısı, boru çapı ve boru pürüzlülüğü ile olan değişimleri incelenmiştir. Giriş uzunlukları sayısal sonuçlardan nasıl çıkarılabilir. Bazı akış özellikleri giriş akışı boyunca değerleri değişirken tam gelişmiş akış bölgesinde ise bu özellikler değişmezdir. Bu değişimler gözlemlenerek giriş uzunlukları bulunabilir. Hız, kayma gerilmesi ve sürtünme faktörü gibi akış özellikleri gelişen akış boyunca değişim gösterirler. Duvar kayma gerilmesi veya sürtünme faktörü akış boyunca daha belirgin olarak değiştiğinden burada geçiş mesafeleri Darcy sürtünme faktörü değişiminden bulunmuştur. Duvar kayma gerilmesi, basınç ve Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişki ise Δx diferansiyel kalınlığındaki boru akışında statik kuvvet dengesinden bulunur.

$$\tau_d = \frac{1}{4} \frac{D}{\Delta x} \Delta P = \frac{D}{4} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

$$\Delta P = f * \frac{\Delta x}{D} \frac{\rho U^2}{2} = f * \frac{\rho U^2}{2D} \quad \tau_d = \frac{1}{8} f \rho U^2$$

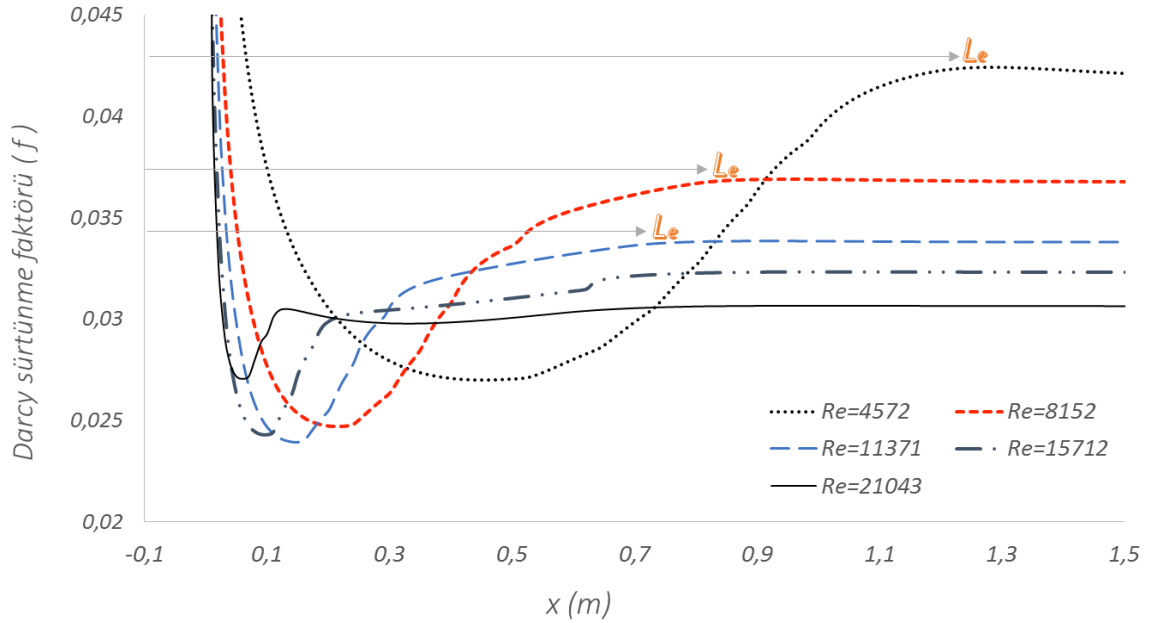
Burada ΔP , Δx kalınlığındaki boru akışında sürtünmeden dolayı oluşan basınç farkını göstermektedir. U borudaki ortalama akış hızını, f Darcy sürtünme faktörünü ve τ_d ise duvar kayma gerilmesini göstermektedir. Görüldüğü gibi duvar kayma gerilmesi ve sürtünme faktörü basınç gradyenine bağlı bir fonksiyondur. Tam gelişmiş akışta basınç düşüşü doğrusal olduğundan basınç gradyeni sabit olur dolayısıyla duvar kayma gerilmesi ve sürtünme faktörü de tam gelişmiş akışta sabit olur. Gelişen akış bölgesinde ise basınç düşüşü parabolik bir değişim gösterdiğinden kayma gerilmesi ve sürtünme faktörü de parabolik bir değişkenlik gösterir.

Şekil 6 'da sayısal çözümden çıkarılmış duvar kayma gerilmesinin akış boyunca değişimi gösterilmiştir. Şekilde 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 başlamanın nedeni ise akışta oluşmaya başlayan türbülansdır. Duvar kayma gerilmesinin minimum değer gösterdiği nokta laminer akışın son bulunduğu ve türbülansın başladığı noktadır. Burada giriş uzunluğu, L_e , kayma gerilmesi sabit değerlere ilk ulaştığında boru girişinden itibaren ölçülen mesafedir.



Şekil 6. boru akışı boyunca sayısal Darcy sürtünme faktörünün değişimi

Örneğin alüminyum boru akışlarında farklı Reynolds sayılarında çıkarılan Darcy sürtünme faktörlerinin akış boyunca değişim eğrileri Şekil 7 'de gösterilmiştir. Şekil 7 gözlemlendiğinde giriş uzunluklarının düşük Reynolds sayılarına doğru uzadığı görülür. Bunun nedeni ise düşük hızlarda akış kararlılığının bozulması zor olmaktadır bu nedenle laminer düzen daha baskındır. Şekil 7 'de minimum sürtünme faktörünün olduğu akış uzunlukları (L_t) düşünüldüğünde düşük Reynolds sayılarından yüksek Reynolds sayısına doğru bu mesafenin kısalma hızı arttığı görülür. Çıkan sonuç ise yüksek Reynolds sayılarına doğru geçiş uzunlukları (L_t) birbirine çok yakınlaşmaktadır. Bunun nedeni ise yüksek Reynolds sayılarında yüksek hızdan dolayı akış hemen türbüle olabilmektedir.



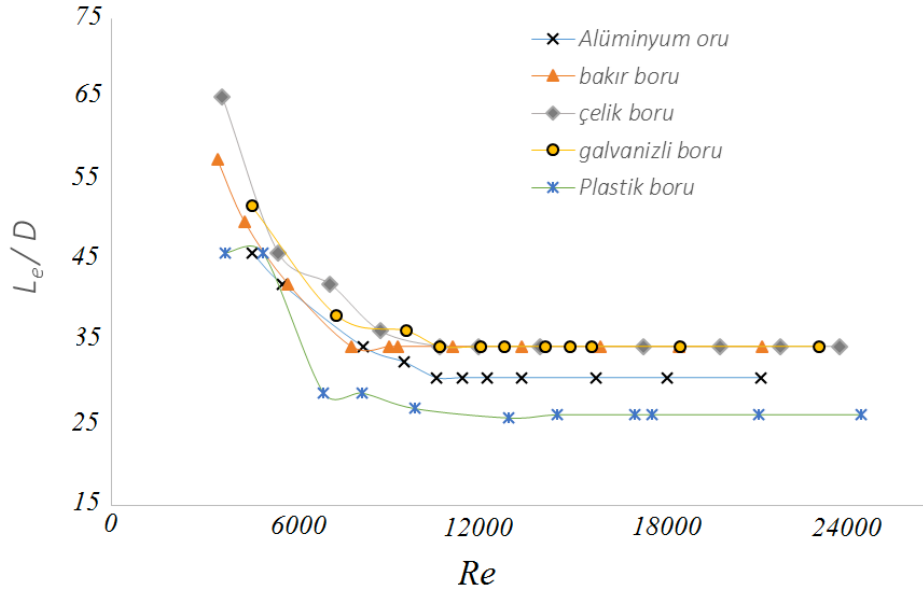
Şekil 7. Farklı Reynolds sayılarında sayısal Darcy sürtünme faktörünün akış boyunca değişimleri

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Darcy sürtünme faktörü değişimleri gözlemlenerek sayısal çalışmadan çıkarılan tüm giriş uzunluklarının boyutsuz değerleri aşağıda Şekil 8 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 8 'de görüldüğü gibi boyutsuz giriş değerleri Reynolds sayısı ile ters orantılı olarak azalmışlardır. Düşük Reynolds sayılarında azalma gösterirken yüksek Reynolds sayılarına doğru artık değişmez değerler olmuşlardır. Bunun nedeni ise yüksek Reynolds sayılarına doğru hız arttığından laminerden türbülansa geçiş erken gerçekleşmekte dolayısıyla akış çok kısa mesafelerde tam gelişmiş türbülans olmaktadır.

Şekil 8 'de gösterilen boyutsuz giriş (L_e / D) değerleri incelendiğinde en düşük Reynolds sayısından 8000 civarındaki Reynolds sayılarına kadar boyutsuz mesafenin hızlı bir düşüş gösterdiği daha yüksek Reynolds sayılarına doğru ise boyutsuz değerlerin değişmez olduğu görülür. Her beş boru tipi incelendiğinde plastik boru boyutsuz değerlerinin diğerlerine göre daha düşük olduğu görülür. Plastik ve bakır boru pürüzlülük değerleri çok yakın olmasına rağmen plastik boru değerleri daha düşük olmuştur. Bunun nedeni ise plastik boruda 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.

Akış hızı arttırıldığında laminerden türbülansa geçiş mesafesi kısalmaktadır. Alüminyum boru ve bakır boru çapları aynı olmasına rağmen yakın Reynolds sayılarında alüminyum boru akışının boyutsuz değerleri az daha düşük 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 kısılır. Şekil 8 'e göre boru çapı ve bağıl pürüzlülük değeri giriş



Şekil 8. Boyutsuz giriş uzunluklarının Reynolds sayısı ile değişimleri

uzunlukları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Düşük Reynolds sayılarında giriş uzunlukları değişirken yüksek Reynolds sayılarında ise değişme çok az görülmektedir. Burada bağlı pürüzlülükten çok akış hızının giriş uzunlukları üzerinde etkili olduğu görülür. Genel görünürde $Re > 8000$ 'den itibaren yüksek Reynolds sayılarında boyutsuz giriş uzunlukları 25 ile 45 değerleri arasında değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenliğin nedeni ise boru çapı ve bağlı pürüzlülük olmuştur. $Re < 8000$ için boyutsuz değerler incelendiğinde ise bağlı pürüzlülüğün pek etkili olmadığı fakat çapın hala etkili olduğu görülür. Aynı şekilde $Re < 8000$ gibi düşük Reynolds sayılarında Reynolds sayısının boyutsuz mesafeler üzerinde çok etkili bir parametre olduğu görülür. Şekil 8 'de plastik boru çapı küçük olduğundan boyutsuz değerlerin daha düşük olduğu görülür. Galvaniz, bakır ve çelik boru değerleri ise üst üste gelmiştir. Galvaniz ve çelik boru çapları bakır borunununkinden 2mm daha yüksek olduğundan bu borularda akış hızı aynı Reynolds sayısında bakır borunununkinden biraz daha düşük olur. Dolayısıyla düşük hız ve düşük bağlı pürüzlülük giriş uzunluklarının yüksek olmasına neden olmuştur. $Re > 8000$ 'den itibaren akış hızı ve pürüzlülük giriş uzunlukları üzerinde etkili iki önemli parametre olmuştur. Bu iki parametrenin giriş uzunluğu üzerindeki etkisini içerecek şekilde giriş uzunlukları Denklem 2 ve Denklem 3 ile yaklaşık olarak ifade edilebilmektedirler.

$$\frac{L_e}{D} = 35 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} \quad 8000 < Re < 25000 \quad (2)$$

$$\frac{L_e}{D} = 0.546 \frac{D^{0.2}}{\varepsilon^{0.06}} (118.5 - 0.005 Re) \quad Re < 8000 \quad (3)$$

Bu iki bağıntıda D ve ε , sırasıyla, çap ve pürüzlülüktür ve bağıntılardaki işlevleri sadece bir çarpan olmuştur bu nedenle birimleri geçerli değildir. Fakat her iki bağıntıda "m" birimindeki değerleri geçilmelidir. Denklem 2 $8000 < Re < 25000$ aralığındaki ve Denklem 3 ise $Re < 8000$ aralığındaki giriş uzunluklarını vermektedir. Her iki bağıntı ile bulunan boyutsuz giriş uzunluklarının verilen sayısal değerlerden ortalama ve maksimum sapma değerleri ise Tablo 5 'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde Denklem 2 için sayısal maksimum ve ortalama sapma yüzdeleri eşittir. Çünkü verilen boyutsuz giriş uzunlukları bu Reynolds aralığından Reynolds sayısından bağımsızdır. Denklem 2 'nin sapma yüzdeleri incelenildiğinde ise denklemin sayısal değerlerle çok iyi uyum sağladığı görülür. Fakat Denklem 3 'ün maksimum ve ortalama sapma yüzdeleri ise yüksek ve düzensiz olmuştur bu nedenle Denklem 3 'ün sayısal değerlerle uyumlu bir bağıntı olduğu söylenemez.

Tablo 5. Önerilen iki sayısal bağıntının sayısal değerlerden sapma yüzdeleri

Denklem 2					
Sapma (%)	Alüminyum Boru	Bakır Boru	Ticari Çelik Boru	Galvanizli Boru	Plastik Boru
Maksimum	+0,503	-2,23	-5,2	-5,6	+1,8
Ortalama	+0,503	-2,23	-5,2	-5,6	+1,8
Denklem 3					
Maksimum	8,34	21,36	21	8,64	13,86
Ortalama	4,33	10,76	7	5	7,36

Sonuç olarak Denklem 2 sayısal değerlerle çok iyi uyum sağladığı görülmektedir. Fakat Denklem 2 'nin bir bağıntı olarak önerilmesi erkendir çünkü yeterince deneysel verilerle karşılaştırılmalıdır, bu şekilde tahmin yeteneği iyice öğrenilmelidir. Denklem 3 'ün giriş uzunluklarını tahmin etmede yetersiz olduğu görülmektedir. Bu nedenle düşük Reynolds sayılı türbülanslı akışlarda giriş uzunluklarını ifade etmek için daha detaylı sayısal ve deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada boru girişinde gelişen akışlar için tam gelişmiş şartlarının başladığını gösteren giriş uzunlukları sayısal yöntemle araştırılmıştır. Sayısal çalışmada farklı pürüzlülük ve çaplara sahip borularla $2000 < Re < 25000$ aralığında su akışları RANS denklemlerle sayısal olarak çözülmüş ve simule edilmiştir. Giriş uzunlukları yüksek türbülans yoğunluklu ($I=7\%$) ve düzgün hız profiline sahip giriş akış şartıyla boru çapı, bağıl pürüzlülük ve Reynolds sayısı ile değişimleri analiz edilmiştir. RANS denklemlerde görülen Reynolds gerilmelerin çözümü için SST k-omega modeli seçilmiştir ve gelişen boru akışı kısmında ise türbülans yoğunluğu ampirik bağıntılarla belirleyen Gamma-Theta modeli SST k-omega ile birlikte türbülans çözüm için tercih edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre giriş uzunlukları yaklaşık olarak $Re=8000$ Reynolds sayılarına kadar Reynolds sayısı ile azalma gösterirken daha yüksek Reynolds sayılarında ise yaklaşık olarak sabit değerleri izlemişlerdir. Bu nedenle sayısal boyutsuz giriş uzunlukları $Re < 8000$ ile için Denklem 3 ve $8000 < Re < 25000$ için Denklem 2 ile yaklaşık olarak ifade edilebildikleri görülmüştür. $Re < 8000$ için boru çapı, pürüzlülük ve Reynolds sayısı giriş uzunlukları üzerinde etkili parametreler iken $Re > 8000$ 'den itibaren ise sadece boru çapı ve pürüzlülüğün etkili parametreler olduğu görülmüştür. Sonuç olarak verilen aralıkta Denklem 2 sayısal verilerle çok iyi uyum sağladığı görülmüştür fakat bir bağıntı olarak önerilebilmesi için yeterince deneysel verilerle test edilmelidir. Denklem 3 ise sayısal verilerle kötü uyum sağlamıştır bu nedenle düşük Reynolds sayılı türbülanslı akışlarda giriş uzunluklarını ifade etmek için daha detaylı sayısal ve deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

6. KAYNAKLAR

- Ansyz 18.2 (2018), Help Menu, ANSYS CFX Transition Models: Two Equation Gamma Theta Transition Model.
- Augustine J.R. (1988). Pressure drop measurements in the transition Region for a circular tube with a square-edged entrance. *Doktora thesis*. Bachelor of Science in Mechanical Engineering The University of Southwestern Louisiana Lafayette, Louisiana
- Anselmet F. Ternat ,F. Amielh M. Boiron O. Boyer P. & Pietri L., 2009. "Axial development of the mean flow in the entrance region of turbulent pipe and duct flows".*Elsevier C. R. Mecanique*. 337, 573–584
- 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

- 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.
- 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
- Ghajar, A.J. ve Lap-Mou Tam (1994). Heat transfer measurements and correlations in the transition region for a circular tube with three different inlet configurations. *Experimental Thermal and Fluid science*, 8:79-90
- Kerswell, R. R., 2005, "Recent Progress in Understanding the Transition to Turbulence in a Pipe," *Institute of Physics Publishing, Nonlinearity*, 18, pp. R17–R44
- 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.
- Huang, L. M., and Chen, T. S., 1974, "Stability of the Developing Laminar Pipe Flow," *Phys. Fluids*, 17, pp. 245–247.
- Laufer, J., 1953, "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow," NACA, Report No. 1174.
- Nikuradse, J., 1932, "Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren," *Forschg. Arb. Ing.-Wes.* Heft, 356, pp. 1–36.
- 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., Some observations on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows, *J. Fluid Mech.* 25 (1974) 181.
- Reynolds, O., 1883, "On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and Determination of the Criterion," *Philos. Trans. R. Soc. London*, 186, pp. 123–164.
- 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.
- Salami L.A. (1986) "an investigation of turbulent developing flow at the entrance to a smooth pipe", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*", volume 7, Issue 4, P. 247-257
- Özışık N., 1985. "HEAT TRANSFER: a basic approach", *McGraw-Hill Book Co*, international edition
- Willis, A. P., Peixinho, 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
- Zagarola, M.V., and Smits, A. J., 1998, "Mean-Flow Scaling of Turbulent Pipe Flow," *J. Fluid Mech.*, 373, pp. 33–79.
- Zanoun E.-S., Kito M. and Egbers C. (2009). "A Study on Flow Transition and Development in Circular and Rectangular Ducts" *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131 / 1-1
- Zanoun E.-S. and Egbers, C. (2016). Flow Transition And Development In Pipe Facilities. *Journal Of Engineering And Applied Science*, Vol. 63, No. 2, PP. 141-155
- Zimmer F., Zanoun E.S. and Egbers C. (2011). "A study on the influence of triggering pipe flow regarding mean and higher order statistics". 13th European Turbulence Conference (ETC13) *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 318, Section 3.