

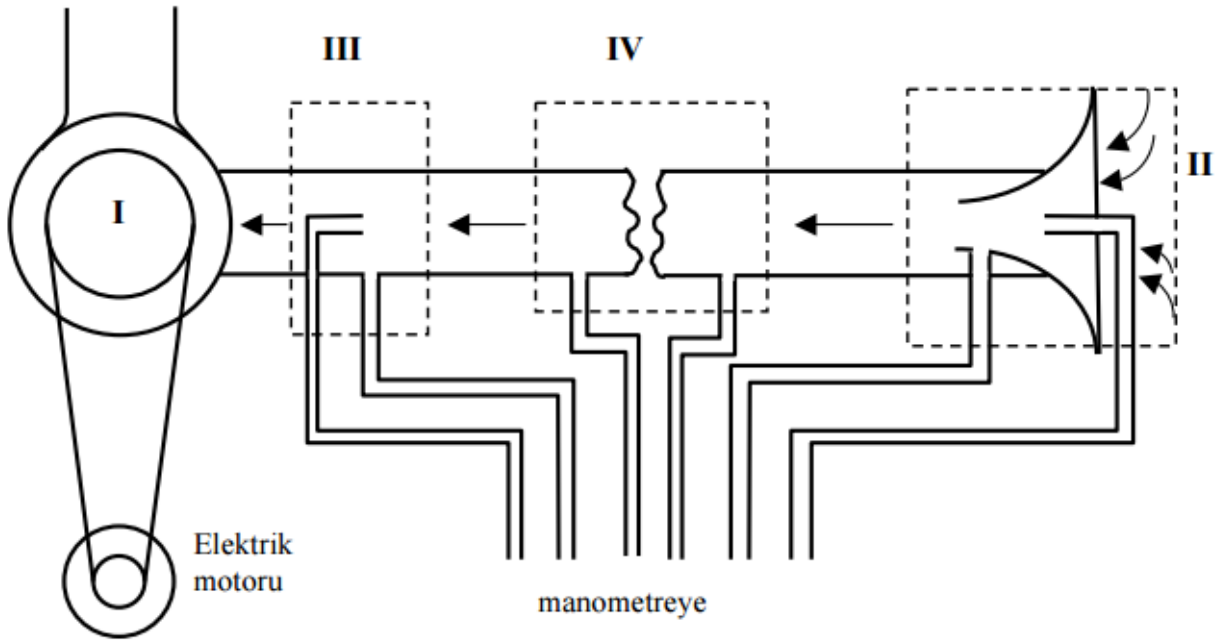
## GEM 4013 GEMİ LABARATUVARI AKIŞKAN BORUSU DENEYİ

### 1. DENEYİN AMACI

Dairesel kesitli bir boruda laminar ve türbülanslı akış şartlarında hız profili ve enerji kayıplarını deneysel olarak belirlemek ve literatürde mevcut amprik bağıntılarla karşılaştırmaktadır.

### 2. DENEY DÜZENEGİNİN GENEL TANIMI

Şekil 1’de şematik olarak gösterilen deney düzeneğinde; iki ayrı devirde çalışabilen bir elektrik motorunun döndürdüğü vantilatör tarafından akışkan borusu içine ortamdan hava emilmektedir. Vantilatörün çıkışındaki bir sürgeç vasıtasıyla kontrol edilebilen hava debisi, akışkan borusunun emme ucuna bağlı bir lüle ile ölçülmektedir. Akışkan borusu üzerindeki basınç ölçme yerleri plastik hortumlarla bir manometreye bağlanmıştır.



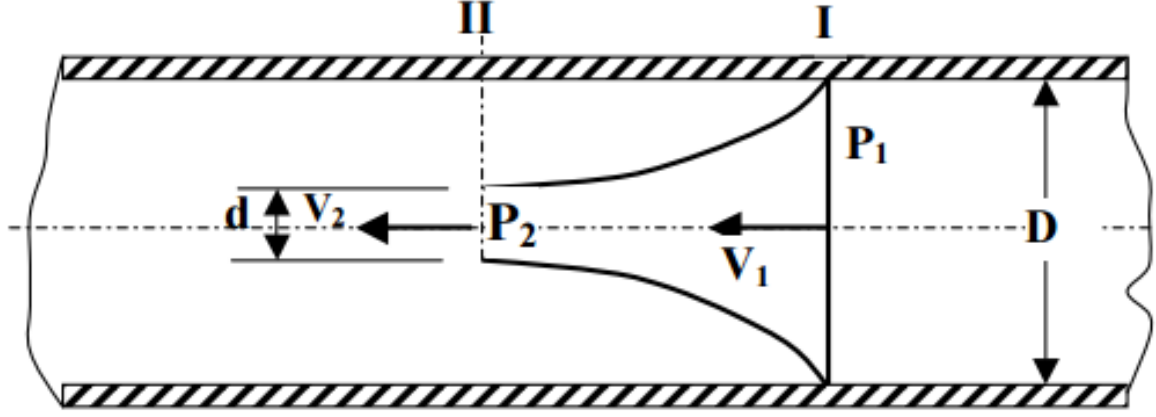
**Şekil 1.** Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Deney düzeneği, şekilde görülen aşağıdaki ana bölümlere ayrılabilir:

- I. Elektrik motoru tarafından döndürülen vantilatör
- II. Boru girişinde debinin ölçüldüğü lüle bölgesi
- III. Boru kesitinde hız dağılımının ölçüldüğü bölgesi
- IV. Boruda basınç kaybının ölçüldüğü bölge

### 3. LÜLE İLE DEBİ ÖLÇÜLMESİ

Genel olarak boruların içine konulan lüleler akışa karşı bir engel oluştururlar. Kesit değişiklikleri nedeniyle hızlarda değişimler, dolayısıyla da statik basınçlarda değişimler olur. Lüleden önceki ve sonraki bölgelerde ölçülen statik basınçlar yardımıyla Bernoulli ve süreklilik denklemleri kullanılarak, önce hız sonra da debi hesaplanabilir.



Şekil 2. Boru içine yerleştirilmiş lüle

Şekil 2’de görülen I ve II kesitleri için Bernoulli ve süreklilik denklemleri;

$$P_1 + \rho \frac{\bar{V}_1^2}{2} = P_2 + \rho \frac{\bar{V}_2^2}{2} \quad (1)$$

$$\bar{V}_1 \cdot A_1 = \bar{V}_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

olarak ifade edilir.  $A_1 = \pi D^2/4$  ve  $A_2 = \pi d^2/4$  olduğundan; (2) eşitliğinden,

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (3)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı (1)’de yerine konursa:

$$P_1 + \rho \frac{\bar{V}_2^2}{2} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4 = P_2 + \rho \frac{\bar{V}_2^2}{2} \quad (4)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (5)$$

bulunur. Böylece lülenin en dar kesitindeki  $\bar{V}_2$  hızı I ve II kesitlerindeki statik basınçların farklarına ve lülenin en geniş ve en dar kesitlerinin çaplarına bağlı olarak elde edilebilir. Lüle duvarındaki sürtünmeler nedeniyle, gerçekte bu hız daha küçük olmaktadır. Sürtünme kayıplarının etkisi  $\beta$  sayısı ile gösterilirse,  $A_2$  kesitindeki gerçek hız ( $\beta \cdot \bar{V}_2$ ) değerinde olur.  $A_2$  kesitindeki gerçek debi,

$$Q = \beta \cdot \bar{V}_2 \cdot A_2 \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir.  $\bar{V}_2$  hızının değeri (5)'e göre, yukarıdaki bağıntıda yerine konursa, Q debisi için,

$$Q = \frac{\beta \cdot A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} \quad (7)$$

elde edilir.  $\beta$  kayıp sayısı lüleye bağlı bir sayıdır.  $d$  ve  $D$  çapları cinsinden  $\beta$  sayısı, debi katsayısı olarak;

$$\alpha = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \quad (8)$$

şeklinde bir tek sayıyla verilebilmektedir. Deneyde kullanılan lüle için  $\alpha=0.985$  ve  $d=50$  mm, olarak verilmiştir. Ölçülen  $P_0$ ,  $T_0$  değerleriyle  $R=287$  J/kgK alınarak havanın yoğunluğu;

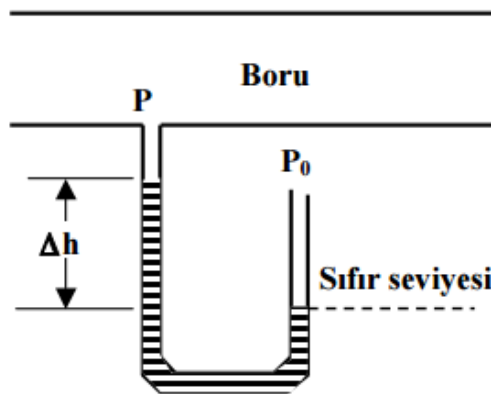
$$\rho = P_0 / R \cdot T_0 \quad (9)$$

bağıntısından bulunur. Burada,  $P_0$  ortam basıncı ve  $T_0$  ortam sıcaklığının [K] cinsinden değeridir. Akışkanın yoğunluğu ortamın sıcaklığı ve basınçla değişir. Gerçek debi (8) bağıntısına göre

$$Q = \alpha \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} = \alpha \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_0 - P_2)} \quad (10)$$

olarak hesaplanır. Lülenin geniş kesiti (lüle girişi), ortama açılması nedeniyle,  $P_0$  basıncındadır.  $P_2$  basıncı ise, lülenin en dar kesitinde, 1a veya 1b kodlu basınç prizlerinden ölçülen basınçtır. Basınç değerleri atmosfer basıncına karşı okunduğundan (efektif basınç), 1a veya 1b 'de okunan basınçlar doğrudan  $(P_0 - P_2)$  basınç farkını verir.

**NOT:** Manometredeki, Şekil 3, basınç okumalarında dikkat edilmesi gereken özellikler:



Şekil 3. Manometrede basınç okunması.

1. Basınçlar atmosfer basıncına karşı ölçülmektedir (Effektif basınç).
2. Sıfır seviyesinin üzerindeki basınçlar  $P_0$  basıncından ( $\Delta h$ ) mm su sütunu kadar küçüktür ( $P < P_0$ , emme).
3. Eğik manometrede okunan değerler hesaplara alınırken manometrenin eğikliği göz önüne alınmalıdır.
4. Manometre sıvısı olarak renklendirilmiş saf su kullanılmaktadır. Yapılacak hesaplarda seviye farkı bulunduktan sonra, **1 cmSS = 98.1 Pa** olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

#### 4. DAİRESEL KESİTLİ BORULARDA HIZ DAĞILIMI

##### 4.1. Teorik Hız Dağılımı

Bir boru içerisindeki laminar akışta hız profili,

$$\frac{V(r)}{V_{max}} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (11)$$

şeklindeki parabolik bir bağıntıyla ve türbülanslı akışta

$$\frac{V(r)}{V_{max}} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^4 \right]^{1/7} \quad (12)$$

şeklinde üstel bir fonksiyonla ifade edilmektedir. (11) ve (12) bağıntılarında  $V(r)$  boru ekseninden itibaren herhangi bir  $r$  noktasındaki hızı,  $V_{max}$  boru eksenindeki maksimum hızı ve  $R$  boru yarıçapını göstermektedir. (12) denklemindeki  $n$  değeri Reynolds sayısına göre değişmekte olup, bu değişim Nikuradse tarafından,

|           |                 |                   |                   |                   |                 |                   |
|-----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| <b>Re</b> | $4 \times 10^3$ | $2.3 \times 10^4$ | $1.1 \times 10^5$ | $1.1 \times 10^6$ | $2 \times 10^6$ | $3.2 \times 10^6$ |
| <b>n</b>  | 6.0             | 6.6               | 7.0               | 8.8               | 10.0            | 10.0              |

olarak verilmektedir. Yukarıdaki bağıntılar pürüzsüz borular için geçerli olup, pürüzlü borular için değişik bağıntılar önerilmektedir. Pürüzlü borular için von Karman Hız Profili;

$$\frac{V_{max} - V(r)}{V_i} = -\frac{1}{0.3} \left[ \ln(1 - \sqrt{r/R}) + \sqrt{\frac{r}{R}} \right] \quad (13)$$

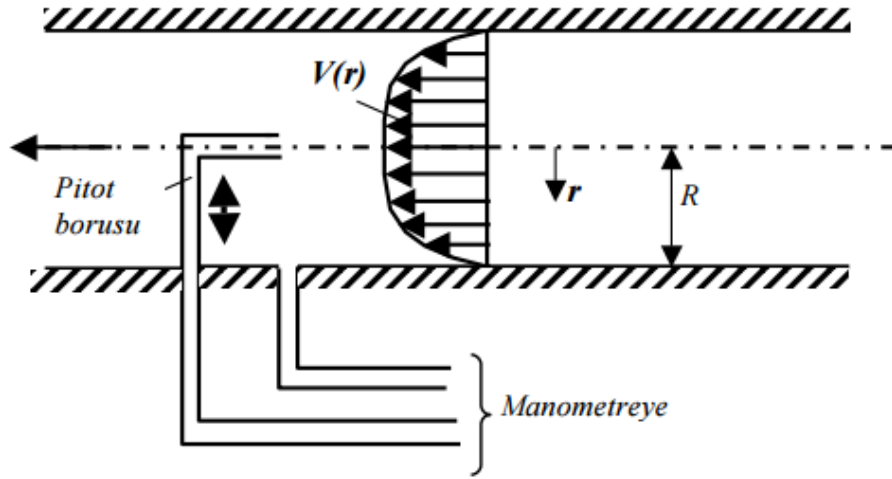
olarak verilmektedir. Burada  $V_i = \sqrt{\frac{\tau_u}{\rho}}$  olup, sürtünme hızı olarak tanımlanmıştır. Bu deneyde, borunun pürüzsüz olduğu varsayılacaktır.

##### 4.2 Hız Dağılımının Deneysel Olarak Belirlenmesi

Hız dağılımının deneysel olarak belirlenebilmesi basınç ölçümüne dayanmaktadır.

Hız profilinin belirleneceği kesitte, biri statik basınç sondası ile statik basınç, diğeri Pitot

borusu ile toplam basınç olmak üzere iki ayrı basınç ölçümü yapılır (Şekil-4).



**Şekil 4.** Boru içinde  $V(r)$  yerel hızının ölçülmesi.

Her kesitte,  $P_{statik} + P_{dinamik} = P_{toplam}$  yazılabilir. ( $P_{toplam}$ ) pitot borusu ile, ( $P_{statik}$ ) de statik basınç sondası ile ölçülerek,

$$P_{dinamik} = P_{toplam} - P_{statik} = \rho \cdot \frac{V(r)^2}{2} \quad (14)$$

ile  $V(r)$  hızı için;

$$V(r) = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{dinamik})} \quad (15)$$

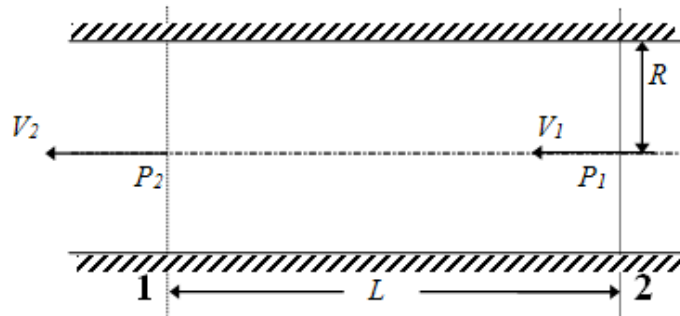
şeklinde bir bağıntı elde edilir. Böylece seçilen her  $r$  yarıçapında  $V(r)$  hızı kesit içinde belirlenmiş olur.

## 5. BORULARDA BASINÇ KAYBI

### 5.1. Basınç Kaybının $\bar{V}$ Ortalama Hızına Bağlı Olarak Hesaplanması

Bir boru akışında enerji kaybı, Darcy-Weisbach denklemi ile,

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (16)$$



**Şekil 5.** Boruda basınç kaybı.

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntıda  $L$ , boru uzunluğunu;  $D$ , boru çapını;  $\bar{V}$ , ortalama hızı;  $\lambda$ , sürekli kayıp katsayısını göstermektedir.  $\lambda$ , sürekli kayıp katsayısı laminar akış şartlarında ( $Re < 2000$ ) sadece Reynolds sayısı ile,

$$\lambda = 64/Re \quad (17)$$

şeklindeki ifade ile değişir. Geçiş akışı ( $2000 \leq Re \leq 3000$ ) ve türbülanslı akışın başlangıç değerlerinde hem Reynolds sayısı hem de izafi pürüzlülüğe ( $\varepsilon = k/D$ ), yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışta sadece izafi pürüzlülüğe bağlı olarak değişmektedir.  $\lambda$  değeri akışın Reynolds sayısı ve izafi pürüzlülüğe göre, Moody diyagramından alınabileceği gibi literatürde mevcut ampirik bağıntılar kullanılarak da bulunabilir. Pürüzsüz borularda; Blasious tarafından,

$$\lambda = \frac{0.3164}{(Re)^{0.25}} \quad ; \quad Re \leq 100.000 \quad (18)$$

Kanokav tarafından;

$$\lambda = \frac{1}{(1.8 \log_{10} Re - 1.5)^2} \quad ; \quad 4000 \leq Re \leq 10^8 \quad (19)$$

ve Prandtl-Von karman tarafından;

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log_{10}(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (20)$$

bağıntıları önerilmektedir.

Pürüzlü borularda:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \cdot \left[ \log_{10} \frac{Re}{0.135 \cdot \left( Re \cdot \frac{k}{D} \right) + 6.5} \right] \quad ; \quad 4000 \leq Re \leq 10^8, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.05 \quad (21)$$

bağıntısı, Round tarafından önerilmiştir. Bu bağıntılarda  $k$  pürüz yüksekliği;  $Re$ , Reynolds sayısı olup

$$Re = \frac{\bar{V} \cdot D}{\nu} \quad (22)$$

olarak tanımlanmıştır.

Yüksek Reynolds sayılarında Blasious bağıntısı Moody diyagramından elde edilen değerlere göre oldukça fazla hata verirken, Konakov denklemi diğer denklemlere göre daha uygun değer vermektedir. Aşağıdaki tabloda, yukarıdaki bağıntıların karşılaştırılması verilmektedir.

|          | $\lambda$ |        |        |        |        |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Re       | 4000      | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ | $10^7$ |
| Blasious | 0.0398    | 0.0316 | 0.0178 | 0.0100 | 0.0056 |
| Prandtl  | 0.0400    | 0.0309 | 0.0180 | 0.0117 | 0.0082 |
| Konakov  | 0.0403    | 0.0308 | 0.0178 | 0.0116 | 0.0081 |
| Moody    | 0.0402    | 0.0305 | 0.0180 | 0.0117 | 0.0080 |

Böylece L ve D bilindiğine göre, önce borudan geçen akışkanın debisi Bölüm 3'de anlatıldığı gibi ölçülüp  $\bar{V}$  ortalama hızı hesaplanır. Bilinen  $\nu$  (kinematik viskozite) ile Reynolds sayısı hesaplanarak  $\lambda$  kayıp katsayısı (18) veya (19) denklemlerinden belirlenir. Daha sonra da (16) bağıntısından  $\Delta P$  basınç kaybı hesaplanır.

## 5.2. Basınç Kaybının Ölçülmesi

Boru boyunca herhangi (1) ve (2) kesitleri arasındaki deneysel basınç kaybı, statik basınçların ölçülmesiyle

$$\Delta P_d = P_1 - P_2 \quad (23)$$

bağıntısından elde edilmektedir. Borudaki toplam basınç düşümü belirlenmesinde  $L=3 \text{ m}$  değeri için  $P_{10}$  ve  $P_{13}$  basınç değerleri ölçülerek

$$\Delta P_L = P_{13} - P_{10} \quad (24)$$

bağıntısından hesaplanır. Benzer şekilde boru eksenı boyunca meydana gelen basınç düşüşü eksenı boyunca  $P(x)$  statik basıncı ölçülerek belirlenir. Lülenin giriş alanı ( $x=0$ ) sonsuz olduğundan  $\bar{V}_1 = 0$  ve  $P_1 = P_0$  olmaktadır

$$\Delta P_d(x) = P_0 - P(x) \quad (25)$$

## 6. DENEY RAPORUNDA İSTENENLER

1. Deneyin amacını belirtiniz.
2. Deneyde hangi büyüklüklerin ve nasıl ölçüldüğünü belirtiniz.
3. Deneyde ölçülen değerler tablo halinde veriniz.
4. Bir debi için ayrıntılı hesap örneği verilecek ve tüm hesaplamalar tablo halinde gösterilecek.
5. Aşağıdaki grafikler milimetrik kâğıda el ile çiziniz.
  - a. Deneysel olarak ölçülen boru eksenı boyunca meydana gelen basınç düşüşünü,  $\Delta P_d(x)$ , beş farklı debi için aynı grafikte çiziniz.

- b. Ölçülen  $\Delta P_L$  basınç düşümleri kullanılarak hesaplanan  $\lambda$  sürekli kayıp katsayısını, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak,  $\lambda=f(Re)$ , çiziniz. Aynı grafik üzerinde (18) bağıntısı ile elde edilen değişimi de çiziniz
- c. Borudaki toplam basınç düşümü ile borudaki ortalama hız arasındaki  $\Delta P_L=f(\bar{V})$  değişimini (16) ve (18) bağıntıları ile  $L=3 \text{ m}$  alarak teorik ve ölçülen  $P_{13}$  ve  $P_{10}$  basınçları arasındaki farka göre deneysel olarak aynı grafikte çiziniz.
- d. Boru kesitinde boyutsuz teorik hız dağılımını,  $V/V_{\max}=f(r/R)$ , (12) bağıntısı ile ve deneysel hız dağılımlarını da (15) bağıntısı ile dinamik basınç değerlerinden hesaplanan hıza dayalı olarak iki farklı Reynolds sayısı ( $Q_1$  ve  $Q_5$  debileri) için aynı grafikte çiziniz
6. Deney sonuçlarını yorumlayınız.

## 7. SEMBOLLER

|            |                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|
| $A$        | Kesit alanı                                        |
| $\alpha$   | Debi katsayısı                                     |
| $\beta$    | Kayıp sayısı                                       |
| $d$        | Lülenin en dar kesitinin çapı                      |
| $D$        | Lülenin veya borunun çapı                          |
| $\Delta h$ | Seviye farkı                                       |
| $\Delta P$ | Basınç farkı                                       |
| $\lambda$  | Borularda sürekli kayıp katsayısı                  |
| $L$        | İki kesit arasındaki uzaklık                       |
| $P$        | Basınç                                             |
| $Q$        | Debi                                               |
| $r$        | Değişken yarıçap                                   |
| $R$        | Borunun yarıçapı, havanın gaz sabitesi             |
| $Re$       | Reynolds sayısı                                    |
| $\rho$     | Havanın yoğunluğu                                  |
| $\nu$      | Havanın kinematik viskozitesi                      |
| $V$        | Hız                                                |
| $\bar{V}$  | Ortalama hız                                       |
| $x$        | Boru veya lüle eksenine boyunca değişken koordinat |

## İNDİSLER :

|        |                                     |
|--------|-------------------------------------|
| $o$    | Ortam                               |
| $t$    | Teorik                              |
| $d$    | Deneysel                            |
| $L$    | $L$ uzunluğundaki boru parçası için |
| $\max$ | Maksimum                            |

**CİZELGELER : Denev Tutanağı :**

|        |        |      |
|--------|--------|------|
| $P_0=$ | $T_0=$ | $v=$ |
|--------|--------|------|

**Tablo 1: Boruda hız dağılımı ( $n_1=1500$  d/dak,  $n_2=3000$  d/dak)**

|            |       | 1b<br>(cm SS) | 14a<br>(cm SS) | R-r<br>(mm)    | 0 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 30 | 38,2 |
|------------|-------|---------------|----------------|----------------|---|---|---|---|----|----|----|------|
| %20 $n_1$  | $Q_1$ |               |                | 14b<br>(cm SS) |   |   |   |   |    |    |    |      |
| %100 $n_2$ | $Q_5$ |               |                |                |   |   |   |   |    |    |    |      |

**Tablo 2: Boruda basınç kaybı (Boru boyu,  $P_{10}$ - $P_{13}$ , 3 m)**

|          | $Q_1$     | $Q_2$     | $Q_3$      | $Q_4$     | $Q_5$      |
|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| $P_{1b}$ |           |           |            |           |            |
| $P_{10}$ |           |           |            |           |            |
| $P_{11}$ |           |           |            |           |            |
| $P_{12}$ |           |           |            |           |            |
| $P_{13}$ |           |           |            |           |            |
|          | %20 $n_1$ | %50 $n_1$ | %100 $n_1$ | %30 $n_2$ | %100 $n_2$ |

**Tablo 3: Boruda basınç kaybı:**

| $\frac{Q}{(m^3/kg)}$ | $\bar{V}$<br>(m/s) | $Re$ | $\lambda_t$ | $\Delta P_t$<br>(Pa) | $\Delta P_d$<br>(Pa) | $\lambda_d$ |
|----------------------|--------------------|------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|
|                      |                    |      |             |                      |                      |             |
|                      |                    |      |             |                      |                      |             |
|                      |                    |      |             |                      |                      |             |
|                      |                    |      |             |                      |                      |             |
|                      |                    |      |             |                      |                      |             |

**Tablo 4: Boru kesitinde hız dağılımı:**

| $R-r$<br>(mm) | $r$<br>(mm) | $r/R$<br>(-) | $Q_1=$        |        |                            |                         | $Q_5=$               |        |                            |                         |
|---------------|-------------|--------------|---------------|--------|----------------------------|-------------------------|----------------------|--------|----------------------------|-------------------------|
|               |             |              | $P_{dinamik}$ | $V(r)$ | $V/V_{max}$<br>(Deneyssel) | $V/V_{max}$<br>(Teorik) | $\Delta P_{dinamik}$ | $V(r)$ | $V/V_{max}$<br>(Deneyssel) | $V/V_{max}$<br>(Teorik) |
| 0.0           | 38,2        | 1,000        |               |        |                            | 0                       |                      |        |                            | 0                       |
| 1.0           | 37,2        | 0,974        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 2.0           | 36,2        | 0,948        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 5.0           | 33,2        | 0,869        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 10.0          | 28,2        | 0,738        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 20.0          | 18,2        | 0,476        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 30.0          | 8,2         | 0,215        |               |        |                            |                         |                      |        |                            |                         |
| 38.2          | 0           | 0,000        |               |        | 1                          | 1                       |                      |        | 1                          | 1                       |