

5. BORULARDAKİ VİSKOZ (SÜRTÜNMELİ) AKIM

5.10. Boru Sistemleri Çözüm Yöntemleri

Boru sistemleriyle ilgili problemlerin çözümünde 3 tip çözüm yöntemi vardır. Bunlar I. Tip, II. Tip ve III. Tip çözüm yöntemleridir. Bu çözüm yöntemlerinde bir "bağımsız parametre" (verilen parametre) ve bir de bağımlı parametre (istenen parametre) vardır.

I. tip akış problemlerinde akışkan özellikleri (özellikler) (özgül kütle ve viskozite), boru çapı, uzunluğu ve pürüzlülüğü, veri ve ortalama hız verilir. Basınç düşümü ya da yük kaybı sorulur.

II. tip akış problemlerinde akışkanın özgül kütlesi ve viskozitesi, boru çapı, uzunluğu, pürüzlülüğü, basınç düşümü verilir, veri ya da ortalama hız sorulur.

III. tip akış problemlerinde akışkanın özgül kütlesi ve viskozitesi, boru uzunluğu ve pürüzlülüğü, veri ya da ortalama hız ve basınç düşümü verilir. Boru çapı sorulur. Bu üç tip çözüm yöntemindeki izlenecek sıra aşağıdaki gibi verilebilir (Streeter ve Wylie 1983, Ayyıldız 1984, Keskin 1995)

I tip akış problemlerinin çözümüne dolaysız çözüm de denir. Eğer hesaplama için bir akış sırası vermek gerekirse;

- Ortalama hız (V , m/s) bulunur,
- Re sayısı ve bağıl pürüzlülük hesaplanır,
- Moody diyagramından sürtünme katsayı alınır,
- Düz boru yük kaybı Darcy-Weisbach formülünden hesaplanır.
- Şekil kayıpları hesaplanır,
- Düz boru ve şekil kayıpları toplanarak toplam yük kaybı bulunur.

II. tip akış problemlerinin çözümünde bizden veri ya da ortalama hız istenmektedir. Bunun için işlem sırası şöyle sıralanabilir.

- Bağıl pürüzlülük (k/D) bulunur,
- Uygun bir (f) değeri kabul edilir,
- Bağıl pürüzlülüğe ve kabul edilen f değerine göre Moody diyagramından Re bulunur,
- Bulunan Re sayısından ortalama hız elde edilir,
- Elde edilen hız Darcy-Weisbach formülünde yerine konur ve yük kaybı problemde verilenle kontrol edilir. Aynı veya yakın değerde ise bu hız değerinden veri hesaplanır,
- Eğer problemde verilen yük kaybı ile hesaplanan yük kaybı değeri farklı ise yeniden hız değeri kabul edilerek Reynolds sayısı hesaplanarak bağıl pürüzlülük değeri ile bunlara karşılık olan (f) katsayısı Moody diyagramından bulunur,

- g) Bulunan (f) değeri Darcy-Weisbach formülünde yerine konularak sürtünme kaybı hesaplanır. Problem de verilen ile bulunan bu yük kaybı farklı ise işlem tekrarlanır.
- h) Verilen ile bulunan yük kaybı aynı veya yakınsa hız değerinden verdi bulunur.

III. tip akış problemlerinde boru çapı istenmektedir. Bunun için şu işlem sırası izlenebilir.

- a) Uygun bir (f) değeri kabul edilir,
- b) Düz boru yük kayıp formülü (Darcy-Weisbach) ve şekil kaybı formülleri boru çapına bağlı yazılır,
- c) Bu eşitlikler boru çapı için çözülür ve sayısal değeri bulunur,
- d) Bulunan boru çapının kontrolü için bağıl pürüzlülük ve Reynolds sayısı hesaplanır. Süreklilik denkleminde hızı bulunur.
- e) Bu son bulunan iki değere (bağıl pürüzlülük ve Re sayısı) göre f değeri Moody diyagramından okunur,
- f) Bulunan (f) değeri ile başlangıçta kabul edilen (f) değerinin birbirine yakın olması halinde hesaplanan çap değeri doğru olarak kabul edilir ve problem çözümlenmiş olur,
- g) Bulunan (f) değeri ile kabul edilen (f) değerinin farklı olması halinde bu işlemler tekrarlanır.

5.11. Boruların Kollara Ayrılması

Boruların kollara ayrılması iki başlık altında toplanabilir.

- a) Boruların seri bağlanması,
- b) Boruların paralel bağlanması.

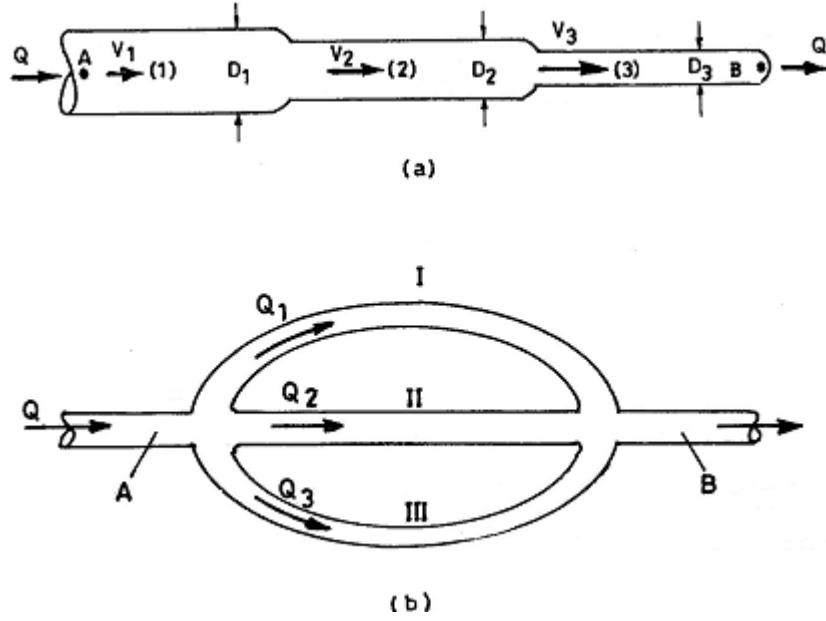
Farklı çaptaki boruların arka arkaya bağlanmasına *seri bağlama* denir (Şekil 5.16a). Bu düzenlemede birbiri arkasına bağlanan borulardaki verdiler aynıdır.

Değişik seri bağlama sorunlarında genellikle boru sayısına eşit ortalama hız ve dolayısıyla aynı sayıda bilinmeyen vardır. Çok borulu bir seri bağlama düzeninde Bernoulli eşitliğinde kullanacağımız toplam kayıplar, h_L sürekli kayıpları, h_f yersel kayıpları göstermek üzere;

$$\sum H_L = h_L + h_f$$

$$\sum H_L = f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + f_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \dots + f_n \cdot \frac{L_n}{D_n} \cdot \frac{V_n^2}{2 \cdot g} + \sum K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

şeklinde yazılabilir (Streeter ve Wylie 1983).



Şekil 5.16. Seri (a) ve paralel (b) boru sistemleri (Edis 1972b, Ayyıldız 1984)

Öte yandan süreklilik denklemi

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q$$

$$V_1 \cdot D_1^2 = V_2 \cdot D_2^2 = V_3 \cdot D_3^2 = \dots = V_n \cdot D_n^2$$

$$V_2 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot V_1 \quad V_3 = \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 \cdot V_1 \quad V_n = \left(\frac{D_1}{D_n}\right)^2 \cdot V_1$$

$$V_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2}, \quad V_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_n^2} \quad \text{şeklinde düzenlenerek bütün hızlar verdiye}$$

bağlı olarak ya da tek bir hız cinsinden yazılır. Böylece bilinmeyen sayısı bire indirilmiş olur. Bundan sonra Bernoulli eşitliği uygulanarak verdi ve borulardaki hızlar bulunabilir (Edis 1972b, Streeter ve Wylie 1983).

Boruların birbirleri üzerine kapanarak kapalı gözler oluşturacak şekilde düzenlenmesine paralel bağlama adı verilir (Şekil 5.16b). Şekildeki I, II ve III boruları paralel bağlanmıştır. Boruların ayrıldığı (A) ve birleştiği (B) noktalarına düğüm noktası denir. Maddenin korunumu ilkesine göre bir düğüm noktasına giren verdilerin toplamı bu noktadan çıkan verdilerin toplamına eşittir. Şekildeki düzen için;

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

olacaktır (Streeter ve Wylie 1983, Soğukoğlu 1995). A ve B düğüm noktalarındaki şekil kayıpları yok kabul edilirse iki nokta arasında Bernoulli eşitliği yazıldığında A'dan B'ye I, II ya da III borusundan gidilebilir. A ve B noktalarının yükleri H_A ve H_B boruların yük kayıpları sırasıyla h_{L_1} , h_{L_2} ve h_{L_3} ile gösterilip A'dan B'ye bu üç ayrı yoldan gidilerek

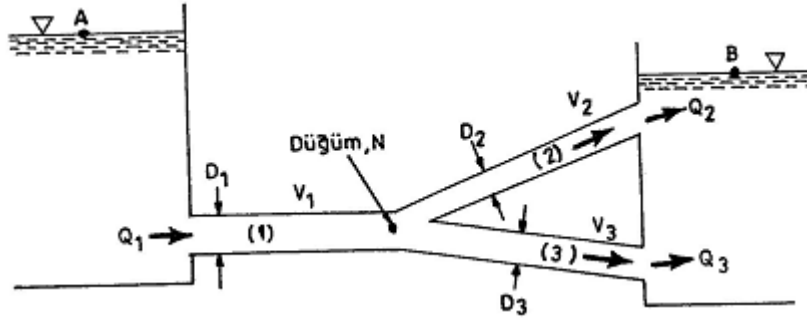
$$H_A = H_B + h_{L_1} \quad H_A = H_B + h_{L_2} \quad H_A = H_B + h_{L_3}$$

gibi üç ayrı denklem yazılabilir. Bu denklemlerden yük kayıpları bulunursa

$$h_{L_1} = h_{L_2} = h_{L_3} = H_A - H_B$$

elde edilir. Buna göre paralel borularda akışkanın birim ağırlığının uğradığı yük kaybı aynı olmaktadır. Akış hangi borudan olursa olsun aynı yük kaybına uğramakta ve B birleşme noktasına geldiklerinde aynı yüke sahip olmaktadır (Edis 1972b).

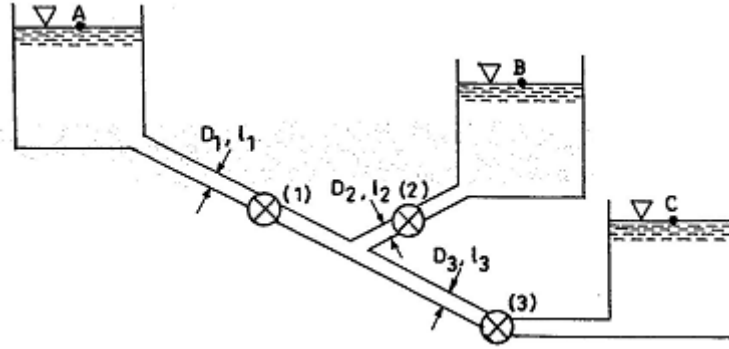
Bir başka çoklu boru sistemi Şekil 5.17'de görülen "düğüm noktalı" boru sistemidir.



Şekil 5.17. Düğüm noktalı çoklu boru sistemi (Munson vd. 1994)

Şekilde (1) nolu borudaki verdi, (2) ve (3) nolu borulardaki akışkan verdilerinin toplamına eşittir (Streeter ve Wylie 1983). $Q_1 = Q_2 + Q_3$ Her bir depodaki akışkan yüzeyine Bernoulli eşitliğini uyguladığımızda görülebileceği gibi (2) nolu borudaki yük kaybı (3) nolu borudaki yük kaybına boru çapları ve verdileri farklı olsa bile eşit olmalıdır ($h_{L_2} = h_{L_3}$)

Çoklu boru sistemlerinde çözüm zor ve karmaşıktır. Örneğin Şekil 5.18'de görülen sistemde farklı yüksekliklerde bulunan ve serbest sıvı yüzeyleri de birbirinden farklı olan A, B ve C gibi üç depo birbirine bağlanmıştır. Eğer (1) nolu vana kapalı olsa sıvı (B)'den (C)'ye akacaktır ve verdi kolayca hesaplanacaktır.



Şekil 5.18. Uç depolu boru sistemi (Munson vd. 1994)

Benzer hesaplamalar (2) ya da (3) nolu vanaların kapalı diğerlerinin açık olması durumunda da kolayca yapılabilecektir. Bunun yanında tüm vanalar açık iken akış hangi depoya ya da yöne doğrudur bu bilinmemektedir. Şekil 5.18'deki durum için A deposu yüksekte olduğu için muhtemelen akış B ve C'ye doğrudur. Akışkanın B deposuna girmesi ya da çıkması B ve C depolarının yüksekliğine ve boruların uzunluk, çap, pürüzlülük gibi özelliklerine bağlıdır. Genelde böyle problemlerde akım yönü belli değildir ve çözüm süreci bu yönün saptanmasını da kapsamaktadır.

5.12. Pompa Bulunan Boru Hatları

Bir boru sisteminde Şekil 5.19'da olduğu gibi bir pompanın olduğunu düşünelim. Pompa sıvıyı (1) deposundan alıp (2) deposuna basmaktadır. Pompa sıvıyı (1)'den alıp (2)'ye bastığında sıvıyı yalnızca $(z_2 - z_1)$ kadar yukarıya çıkarmamakta aynı zamanda emme ve basma borusundaki yük kayıplarını da yenmektedir. Bu durumda sıvının yükseltileceği yükseklik değerine kayıplar nedeniyle meydana gelen yük kayıpları da eklenmelidir. Pompanın sıvıyı emip basabilmesi için gerekli olan güç (N);

$$N = \frac{H_m (m) \cdot Q (m^3 / s) \cdot \gamma (N / m^3)}{1000 \cdot \eta_p} (kW)$$

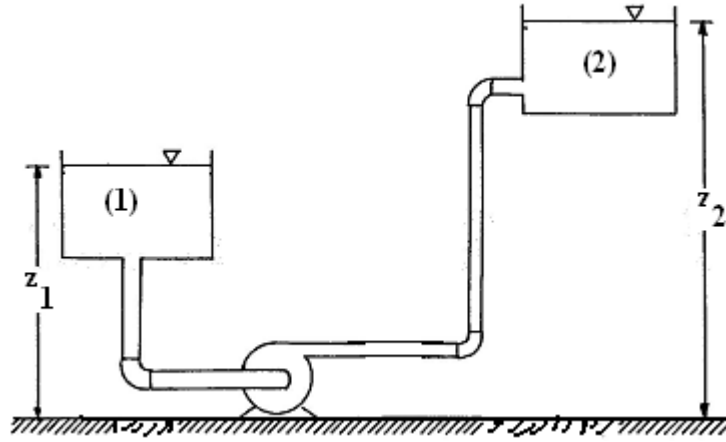
bağıntısıyla hesaplanır. Burada;

H_m : Pompanın sıvıya verdiği gerçek yükür ve yükseklik farkıyla düz boru ve şekil kayıplarını içerir,

η_p : Pompa verimi (%).

$$H_m = (z_2 - z_1) + \sum h_L$$

$z_2 - z_1 = H_g =$ geometrik yük olarak alınabilir.



Şekil 5.19. Pompa bulunan boru sistemi

5.13. Borularda Verdi Ölçümleri

Viskoz kuvvetler göz önüne alındığında anlık verdinin ölçülmesinde orifismetre, lüle ve venturimetre gibi cihazlar kullanılır. Bu cihazların temel prensibi kesit alanı daraltılarak hızın artırılması ve basıncın azaltılmasıdır.

Şekil 5.20'de görülen ve sıvı verdilerinin ölçülmesinde kullanılan araçlardan biri olan orifisde verdi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır (Streeter ve Wylie 1983, Çengel ve Cimbala 2008).

$$Q = C_o \cdot A_o \left(\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho (1 - \beta^4)} \right)^{1/2}$$

Burada;

Q : Borudan akan akışkan verdisi (m^3/s),

A_o : Orifis kesit alanı ($\pi d^2/4, m^2$),

$P_1 - P_2$: (1) ve (2) noktaları arasındaki basınç farkı (N/m^2),

ρ : Akışkanın özgül kütlesi (kg/m^3),

β : Çaplar oranıdır. Yani orifis çapının boru çapına oranıdır ($\beta = d/D$),

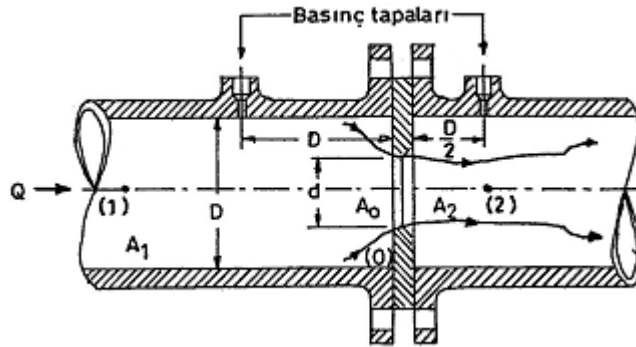
C_o : Orifis verdi katsayısıdır ve farklı değerleri Şekil 5.21'de verilmiştir.

Ayrıca aşağıdaki formülden de hesaplanabilir (Çengel ve Cimbala 2008).

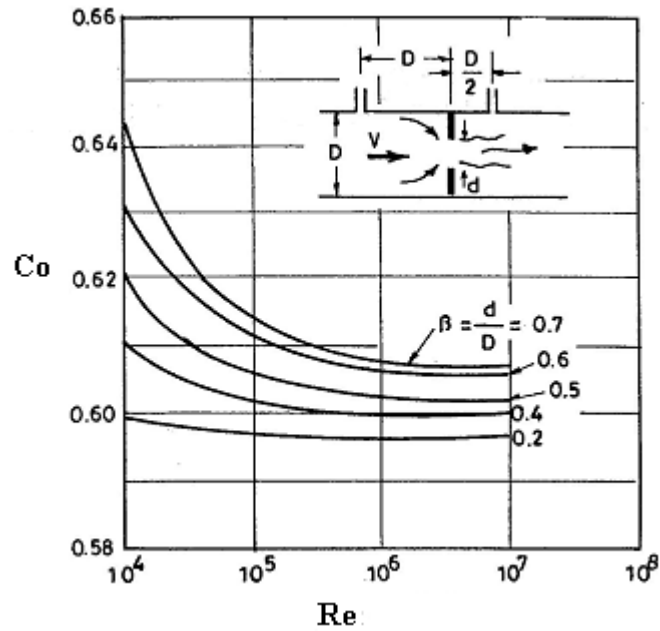
$0.25 < \beta < 0.75$ ve $10^4 < Re < 10^7$ ise

$$C_o = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{Re^{0.75}}$$

$Re > 300000$ ise $C_o = 0.61$ alınabilir.



Şekil 5.20. Orifis metre (Munson vd. 1994)



Şekil 5.21. Orifis metre verdi katsayısı (C_o) (Munson vd. 1994, White 2012)

Akış doğrultusundaki boyutu akışa dik boyuta nazaran ihmal edilemeyen değerlerde olan çıkışlara lüle denir (Şekil 5.22). Lülelerde verdi ölçümü aşağıdaki formülle hesaplanır (Munson vd. 1994).

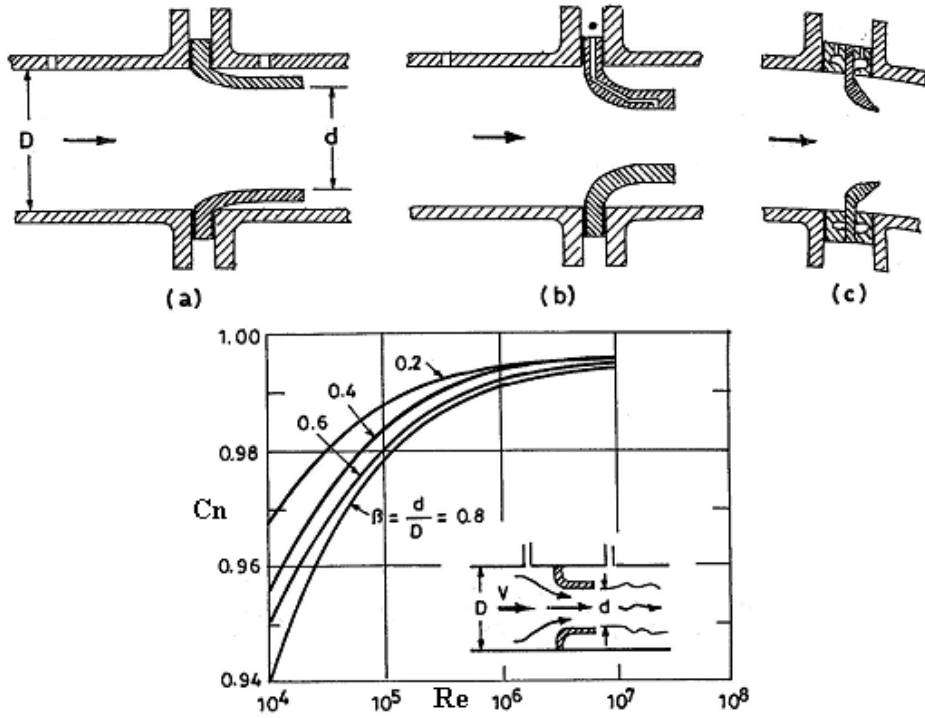
$$Q = C_n \cdot A_n \left(\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho \cdot (1 - \beta^4)} \right)^{1/2}$$

Q : Verdi (m^3/s),

A_n : Lüle kesit alanıdır ($\pi d^2/4, m^2$)

$P_1 - P_2$: (1) ve (2) noktaları arasındaki basınç farkı (N/m^2),

ρ : Akışkanın özgül kütlesi (kg/m^3),
 β : (d/D) lüle çapının boru çapına oranıdır,
 C_n : Lüle verdi katsayısı olup Şekil 5.22'de verilmiştir. Ayrıca aşağıdaki formülden de hesaplanabilir (Çengel ve Cimbala 2008).
 $0.25 < \beta < 0.75$ ve $10^4 < \text{Re} < 10^7$ koşulunda
 $C_n = 0.9975 - (6.53\beta^{0.5} / \text{Re}^{0.5})$ kullanılabilir. Ayrıca
 $\text{Re} > 300000$ ise $C_n = 96$ alınabilir.



Şekil 5.22. Lüleler ve lüle verdi katsayısı (Munson vd. 1994, White 2012)

Boru içerisinde akan sıvıların verdilerinin ölçülmesinde kullanılan bir diğer alet venturimetredir. Venturimetre önce daralan sonrada genişleyen bir borudan ibarettir. En doğru sonucu verir ve diğerlerinin en pahalısıdır. Prensip olarak diğer iki verdi ölçerin benzeridir ancak kayıpları en aza indirecek biçimde tasarlanmıştır. Bir venturimetrede verdi ölçümü için;

$$Q = C_v \cdot A_T \cdot \left(\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho \cdot (1 - \beta^4)} \right)^{1/2}$$

formülü kullanılır (Streeter ve Wylie 1983).

Burada;
 150

Q: Verdi (m/s),

A_T : Venturi kesit alanı (m^2). $(\frac{\pi d^2}{4})$

$P_1 - P_2$: (1) ve (2) noktalarındaki basınç farkı (N/m^2),

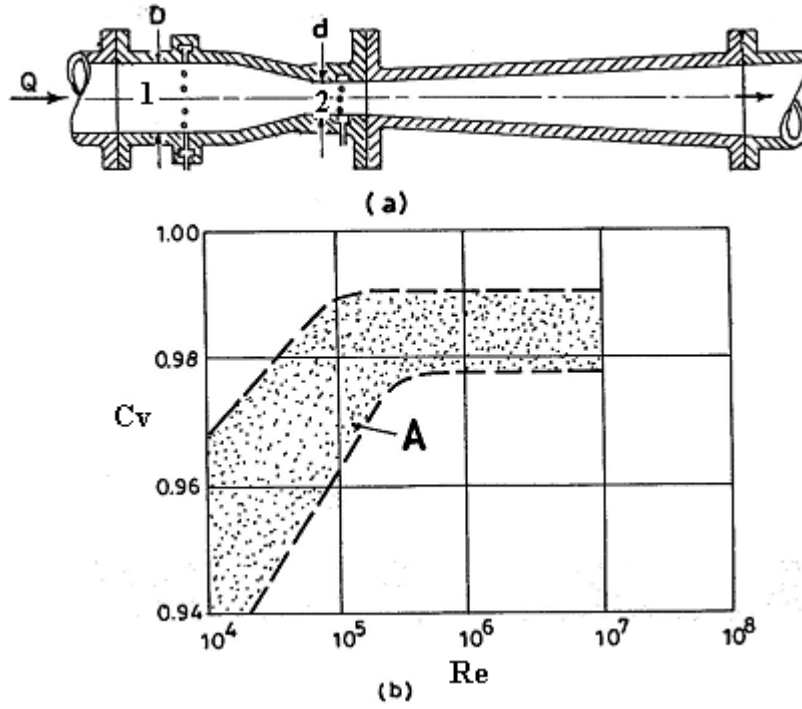
ρ : Akışkanın özgül kütlesi (kg/m^3)

$\beta = d/D$: Venturi çapının boru çapına oranı,

C_v : Venturimetre verdi katsayısı olup, β , Re ve venturimetrenin geometrik yapısına ve birleşim yerlerine bağlıdır. Genellikle 0,90 –0,98 alınır.

$1.5 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$ ve $0.316 < \beta < 0.775$ ise

$C_v = 0.9858 - 0.196 \times \beta^{4.5}$ ile hesaplanabilir (White 2012). Şekil 5.23'de venturimetre ve verdi katsayıları verilmiştir.



Şekil 5.23. Venturi metre (a) ve verdi katsayıları (C_v) (b) (A: venturimetrenin geometrisine bağlı olarak verdi katsayısı değişim alanı) (Streeter ve Wylie 1983, Munson vd. 1994)