

3. BORULAMA VE HİDROLİK HESAPLAR

Basınçlı ortamda suyun iletilmesini sağlayan atmosfere kapalı yapılara borulu sistemler denir. Normal şartlar altında suyu kısmen dolu olarak geçiren yapılar ise açık kanallardır. Boru ve açık kanallarda cereyan eden akımlarda aynı hidrolik prensipler geçerlidir, dolayısıyla her iki akıma ait hidrolik problemleri çözümünde aynı temel formüller kullanılır. Arıtma tesisi tasarımı projesinde, arıtma üniteleri, bağlantı boruları ve diğer detaylar yerleştirildikten sonra boru hattı boyunca sürtünme kayıpları ve arıtma ünitelerindeki yük kayıpları hesaplanır. Hidrolik profil, arıtma tesisindeki hidrolik seviye hattının su yüzeyi profili olarak grafik ile gösterilmesidir. Proje üzerinde arıtma üniteleri ve boruların konumları, suyun cazibe ile akabilmesini sağlamak üzere gerekli hidrolik eğim verilerek belirlenir.

Atıksu arıtma tesisi planlanırken başlangıç noktası arazi topografyasına göre seçilir. Yeterli eğim varsa giriş yapılarındaki kayıplar hesaplanır, aşağı mansaba doğru hareket edilerek uygun noktalarda hidrolik tahkikler yapılır. Yeterli eğim yoksa projelendirmeye deşarj noktası tarafından (mansaptan) başlanır ve ters istikamette yukarıya (membra) doğru çıkılır. Yük kayıpları hesaplanarak kontrol noktalarının kotları tespit edilir. Kontrol noktası olarak alıcı sudaki yüksek su seviyesi seçilerek hesaplamalar kaynağa doğru ilerletilir veya arıtma tesisinin orta noktasından her iki tarafa doğru hidrolik profil çıkartılır. Yeterli hidrolik eğim verilmediğinde birçok işletme problemi doğabilir, hatta pik yüklemelerde kontrol dışı taşmalar yaşanabilir (1), (2).

3.1. Tanımlar

Laminer akım: Akışkanın her taneciği, sabit hızda boru eksenine paralel hareket ederek boru içerisinde düzgün bir akımın oluşmasını sağlar. ($Re < 2000$).

Türbülanslı akım: Akışkanın her taneciği farklı hız ve yönde gelişigüzel hareket eder ve girdap oluşturur. Bu nedenle akışkan tanecikleri boru kesitinde düzgün olmayan bir akımın oluşmasına sebebiyet verirler. Akım şartlarının belirlenmesinde Reynolds (Re) sayısının büyüklüğü önemli bir parametredir ($Re > 2000$). Re , 2000'e çok yakınsa sistem karasız olup, Laminer ve türbülanslı akış arasında salınır.

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (3.1)$$

Burada;

V : akışkanın boru içindeki ortalama hızı, m/sn

D : borunun iç çapı, m

ν : akışkanın kinematik viskozitesi, m^2/sn (suyun çeşitli sıcaklıklardaki kinematik viskozitesi Tablo 3.1'de verilmiştir)

Hidrolik yarıçap (R): Dolu olarak su geçiren d çap ve r yarıçapındaki daire kesitli bir boruda $r/2$ veya $d/4$ alınır.

Islak kesit (S): Akışkanın doğrudan temas ettiği boru kesitidir.

Islak çevre (P): Akışkanın temas ettiği kanal veya boru duvarı, ıslak kesitin çevresini oluşturur. (Tam dolu olmayan kanal veya borudaki akışlarda ıslak çevre tanımına hava ile temas eden kesit girmez.)

Tablo 3.1. Suyun farklı sıcaklıklardaki kinematik viskozitesi (3)

Sıcaklık °C	Kinematik viskozite cSt
0	1.79
10	1.31
20	1.01
30	0.804
40	0.661
50	0.556
60	0.477

3.2. Borulama

Arıtma tesisinde bir üniteden diğerine akışın sağlanabilmesi için kanal, boru ve diğer detayların yerlerinin ayarlanması önemlidir. Borulama projesinin hazırlanmasında üç temel unsur söz konusudur:

- Montaj ve işletmeye uygunluk,
- Bakım için kolay erişilebilirlik,
- İleride muhtemel bağlantı veya yeni hatların ilave edilebilmesi.

3.2.1. Hidrolik Profil

Hidrolik profil atık suyun deşarj edileceği noktaya göre belirlenir. Bir tesiste hidrolik profil hazırlanmasında göz önünde bulundurulması gereken temel prensipler şunlardır (4):

- Hidrolik profil, pik ve ortalama tasarım debisi ile minimum başlangıç debisi için hazırlanır.
- Hidrolik profil, genellikle tesis içindeki tüm ana su hatları için hazırlanır.
- Arıtma tesisindeki toplam yük kaybı; arıtma üniteleri, bağlantı boruları ve diğer detay kısımlardaki yük kayıplarının toplamıdır.
- Arıtma ünitesindeki yük kayıpları şunlardır:
 - a. Atıksu giriş yapılarındaki yük kayıpları,
 - b. Atıksu çıkış yapılarındaki yük kayıpları,
 - c. Ünitelerdeki yük kayıpları,
 - d. Diğer kayıplar.

Arıtma tesisinde en büyük yük kaybı, pik tasarım debisi şartlarında, en büyük ünite servis dışı kaldığında, geri devirli durumda oluşur. Çeşitli arıtma birimlerindeki yaklaşık yük kayıpları Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Arıtma birimlerindeki yük kayıpları

Arıtma birimi	Toplam yük kaybı (m)
Izgara	0,02-0,3
Kum tutucu	
Havalandırmalı kum tutucular	0,5 - 1,2
Hız kontrollü kum tutucular	1,0 - 2,5
Ön çöktürme Havuzu	0,5 - 1,0
Havalandırma Havuzu	0,3 - 0,8
Damlatmalı filtre	
Düşük hızlı ve dozlama tertibatı	3,0 - 6,0
Yüksek hızlı, tek kademeli	2,0 - 5,0
İkinci (son) çöktürme Havuzu	0,5 - 1,0
Klorlama ünitesi	0,2 - 2,5

- Bağlantı boruları ve kanallardaki toplam kayıp aşağıdakilerin toplamıdır:
 - a. Giriş yük kaybı,
 - b. Çıkış yük kaybı,
 - c. Daralma ve genişleme yük kaybı,
 - d. Sürtünme (sürekli) yük kaybı,
 - e. Dirsek, ara bağlantılar, kapak, vana ve metrelerdeki yük kaybı,
 - f. Savak ve diğer hidrolik kontroller için gereken yük,
 - g. Serbest düşme için gereken (yük),
 - h. Arıtma tesisinin ilerideki genişleme ihtimaline karşı bırakılan yük.
- Boru ve mecraların bağlantı yerlerinde sıvının akış hızı, katıların çökmesine meydan vermeyecek seviyede tutulur. Pik tasarım koşullarında minimum 0,6 m/sn hız yeterlidir. Minimum başlangıç akımında ise 0,3 m/sn hız organik katı maddelerin sürüklenmesi için yeterli görülmektedir. Maksimum ve minimum debi oranı çok büyük olduğundan başlangıç şartlarında (projenin ilk yıllarında) kendi kendini temizleme hızı sağlanamaz. Bu durumda temizleme ancak daha yüksek akış şartlarında sağlanabilir. Bu tür tasarımlarda temizlemenin sıklığı dikkate alınmalıdır. Bazı durumlarda katıları askıda tutmak için havalandırma uygulanır.
- Açık kanal ve mecralarda yersel yük kayıpları hız yüksekliği ($k.v^2/2g$) olarak hesaplanır. Yersel yük kayıpları Bölüm 3.3.1'de izah edilmiştir.
- Basınçlı borularda sürtünme kayıpları Hazen-Williams veya Prandte-Colebrook bağlantıları ile bulunabilir. Bu konu 3.3.1'de izah edilmiştir.
- Kanallarda akım yüksekliği akış şartlarına bağlıdır. Bu yüzden açık kanallarda derinlik, tasarım debi değerinde, su yüzeyi hidrolik profilini temsil edecek seviyede

tutulur. Açık kanallarda akış düzenli veya düzensiz olabilir. Kesiti, debisi ve hızı sabit olan kanallarda akış düzgün olur. Kanal tasarımında genellikle pik tasarım değerinde akışın düzgün olduğu varsayılır.

Kesit değişken veya kanala giren atıksu debisi sabit değilse akış düzensiz olur. Bu durumda sürtünme formülü geçerli olmaz. Atıksu arıtma tesislerinde geçiş akışları ve düzensiz akışlar için yeterli tolerans sağlanır. Geçiş için yük kaybı genellikle enerji denklemi kullanılarak hesaplanır.

- Atıksu arıtma tesislerinde kullanılan debi ölçme cihazlarının çoğu yük kaybı esaslı ile çalışır. Hidrolik profil, debi ölçme cihazları için uygun yük kaybı hesaplamalarını da içermelidir.
- Hidrolik profil hazırlanmasında y eksenini, arıtma ünitelerini ve su yüzeyindeki yükselmeleri göstermek üzere özellikle deforme edilir. Tesiste optimum yükselmeyi belirlemek ve hidrolik kontrolleri sağlamak üzere toprak seviyesi de belirtilmelidir.

Boru hatlarında sürtünmeden kaynaklanan yük kayıpları boru çapı ile ters orantılıdır. Boru çapı büyüdükçe terfi için gerekli enerji maliyeti düşer ancak bu durumda da boru hattının amortisman maliyeti yükselir. Bu iki giderin de minimum olacağı “ekonomik çap” olarak adlandırılan bir boru çapı tanımlanmıştır. Literatürde, ekonomik çapın hesaplanması için geliştirilmiş formüller bulunmaktadır (Vibert formülü,3.2).

$$D = 1.456x \left(\frac{ne}{f} \right)^{0.154} x Q^{0.46} \quad (3.2)$$

Burada;

- D : borunun ekonomik çapı, m
n : günlük pompa çalışma saati (24'e bölünmüş)
e : kWsaat fiyatı (Fransız Frangı cinsinden)
f : hattın birim boy maliyeti (Fransız Frangı/m boru)
Q : debi, m³/sn

Bu formülde 1,456 sayısı 50 yılda %8 yıpranmayı göstermektedir. Ancak bu değerler teorik olup piyasada satılan ve “ticari çap” olarak tanımlanan değerlerle örtüşmez. Bu yüzden pratikte ekonomik çapın hemen üstünde bir boru çapı seçilir.

3.3. Yük Kayıplarının Hesaplanması

Boru veya kanalın genişlediği veya akımın doğrultu değiştirdiği yerlerde hızın büyüklüğünün ve doğrultusunun değişmesi nedeniyle enerji kayıpları meydana gelir. Bunlar yersel (lokal) enerji (yük) kayıplarıdır. Sürekli yük kaybı ise boru hattı boyunca akış uzunluğu ile orantılı olan yük kayıplarıdır. Akış yolunun kısa olduğu durumlarda yersel yük kayıpları daha fazla önem kazanır. Atıksu arıtma tesislerinde boru ve kanalların çoğu oldukça kısa olduğundan yersel yük kayıplarının mertebesi önem kazanır.

Bernoulli teoremi: Sürtünmesiz akış şartlarında (ideal akışkan hali), sıkıştırılmayan akışkanlar için akışkan tanecığının potansiyel, basınç ve hareket (kinetik) enerjisi toplamı

sabittir. İdeal akış şartlarında akışkanın mekanik enerji korunumu Bernoulli denklemi ile ifade edilebilir.

Akışkan taneciğinin ağırlığı ρ , g , v ile ifade edilebilir, Bu durumda Bernoulli denklemindeki enerji ifadeleri (5):

$$\text{Potansiyel enerji} = \rho g v z / \rho g v = z$$

$$\text{Basınç enerjisi} = p v / \rho g v = p / \rho g$$

$$\text{Kinetik enerji} = (\rho v V^2 / 2) / \rho g v = V^2 / 2g$$

Netice olarak Bernoulli denklemi:

$$z + p / \rho g + V^2 / 2g = C \quad (3.3)$$

olur. Burada,

- ρ : akışkanın yoğunluğu, kg/m^3
- g : yerçekimi ivmesi, m/sn^2
- v : akışkanın hacmi, m^3
- z : akışkanın referans yatay bir düzleme göre konumu, m
- p : akışkan taneciğine uygulanan basınç, pascal (Newton/ m^2)
- V : akışkan taneciğinin hızı, m/sn
- C : sabit

Bir akışta akışkan taneciğinin P gibi bir noktaya $p / \rho g$ kadar yükseltildiğini düşünürsek, P noktasının koordinatı basınç yüksekliğini, P noktasının konumu ise hidrolik gradyanı ifade eder. Akışkan taneciğini P noktasından C noktasına $V^2/2g$ değeri kadar yükselttiğimizde C noktasının konumu akışın enerji çizgisini belirler.

İdeal akış şartlarında, diğer bir deyişle sürtünmesiz ortamda, C noktasının konumu sabit olup enerji çizgisi yatay durumdadır. Gerçek akış şartlarında, sürtünmenin sebep olduğu enerji kaybı nedeniyle, akışkan içinde ve akış istikametinde farklı iki nokta arasındaki enerji çizgisi azalan bir eğilim gösterir. Bu durumda iki noktadaki enerji çizgisi arasındaki seviye farkı yük kaybı olarak tanımlanır.

3.3.1. Dairesel Kesitli Hatlarda Yersel Yük Kayıplarının Hesaplanması

Dairesel kesitli hatlardaki akış şartlarında yersel yük kaybı hesaplamalarında (3.4) formülü kullanılmaktadır. Bu formül, hattın herhangi bir noktasında mevcut genişleme ve daralma ile vana, dirsek ve benzeri bağlantıların olması durumunda, bu noktadaki basınç kaybı hesabında kullanılır. Bu bağlantıların cinsine ve niteliğine bağlı olarak yersel yük kaybı katsayıları (k) değişmekte olup k' nın değeri yük kaybını etkiler.

$$\Delta h = k V^2 / 2g \quad (3.4)$$

Burada;

- Δh : yersel yük kaybı, metre akışkan yüksekliği
- V : boru içinde ortalama akışkan hızı, m/sn
- g : yerçekimi ivmesi, m/s^2

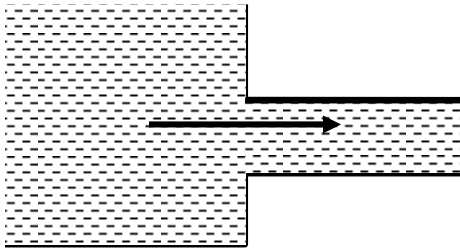
k : boyutsuz sabit, söz konusu yerin tabiatına bağlı yük kaybı katsayısı

Formül (3.4) boruların yapılara giriş ve çıkışlarında, boru daralma ve genişlemelerinde, değişik açılardaki dirseklerde, boru hattı üzerinde mevcut olabilecek muhtelif tip vana, T ve Y bağlantılarında akışın sebep olduğu yerel kayıpların hesaplamalarında da kullanılır. Aşağıda değişik yapı ve bağlantıların sebep olduğu yük kaybı hesaplamalarında kullanılan yük kaybı katsayıları (k) örneklerle verilmiştir:

1. Büyük tanklara boru bağlantısında yük kaybı katsayısı

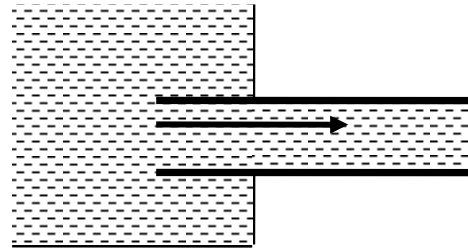
ÇIKIŞ

a) Tanktan çıkış-keskin açı ile



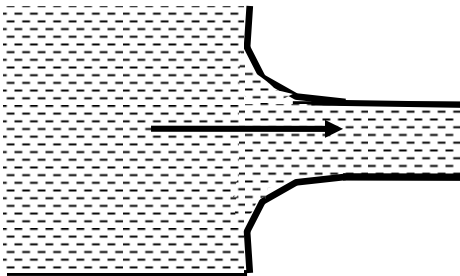
$$k=0.5; \quad \Delta h = 0.5 \frac{V^2}{2g}$$

b) Çıkış borusu tankın içinden
(içeri giren kısım çapın 1-2 katı)



$$k=1; \quad \Delta h = \frac{V^2}{2g}$$

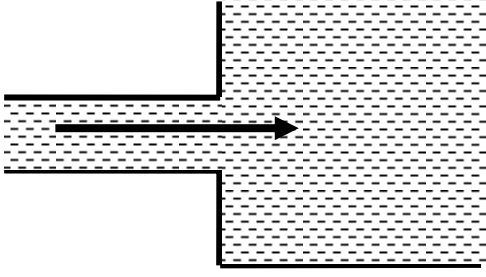
c) Yuvarlatılmış çıkış



$k = 0.05$ (bu ortalama bir değerdir,
 k profilin yuvarlatılma şekline bağlı);

$$\Delta h = 0.05 \frac{V^2}{2g}$$

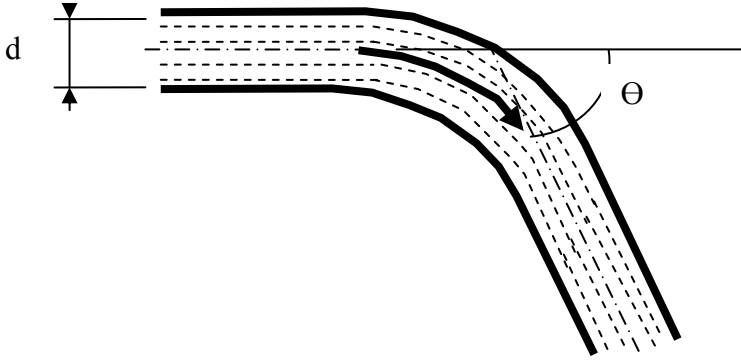
GİRİŞ



$$k = 1 \quad ; \quad \Delta h = \frac{V^2}{2g}$$

2. Borularda dönüşlerde yük kaybı katsayısı

a) geniş açılı (yumuşak) dönüş (9)



$$k = \left[0.13 + 1.85 \left[\frac{d}{2r} \right]^{3.5} \right] \frac{\theta}{180} \quad (3.5)$$

Burada;

k : yük kaybı katsayısı, $\Delta h = k \frac{V^2}{2g}$

r : kıvrımın yarıçapı, m

d : borunun iç çapı, m

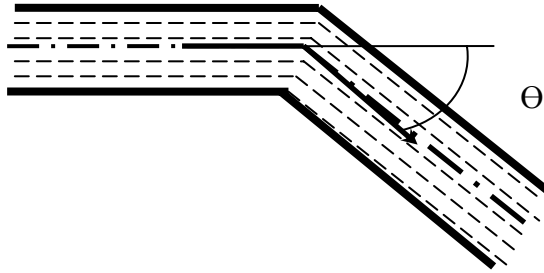
θ : açı, derece

k , 3.5 bağıntısından bulunabilir. Ayrıca Tablo 3.3'de r , d ve θ 'nın fonksiyonu olarak verilmiştir.

Tablo 3.3. Borularda geniş açılı dönüşlerde çeşitli r , d ve Θ değerlerinde yük kaybı katsayısı

r/d \ $\Theta(^{\circ})$	1	1,5	2	2,5
11°25	0,037	0,021	0,018	0,017
22°5	0,074	0,043	0,036	0,034
30	0,098	0,057	0,048	0,046
45	0,147	0,085	0,073	0,069
90	0,294	0,170	0,145	0,138
180	0,588	0,341	0,291	0,275

b) keskin dönüş



$$k = 67.610^{-6} \theta^{2.17} \quad (3.6)$$

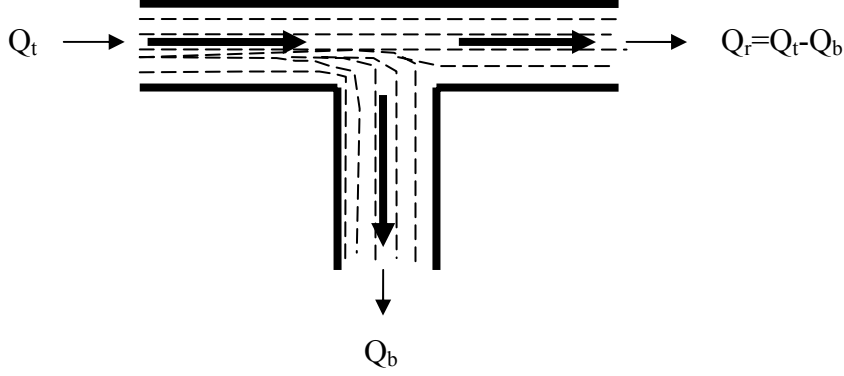
k , (3.6) bağıntısından bulunabilir (9). k yük kaybı katsayısı, çeşitli Θ açıları için Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Borulardaki keskin dönüşlerde çeşitli Θ değerlerinde k yük kaybı katsayısı

$\Theta (^{\circ})$	22,5	30	45	60	90
k	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13

3. T (Düz boru ile aynı çapta 90° keskin açılı) bağlantılarında yük kaybı katsayısı

a) gidiş istikametinde dallanma



$$\Delta h = k \frac{V_t^2}{2g} \quad (3.7)$$

k ve Δh 'ın, düz borunun (k_r ve Δh_r) veya dallanmış kısmının (k_b ve Δh_b) dikkate alınmış olmasına göre ikişer değeri vardır.

Burada;

V_t : giriş akımı hızı, m/sn

k_r ve k_b , Tablo 3.5 de Q_t ve Q_b nin fonksiyonu olarak verilmiştir

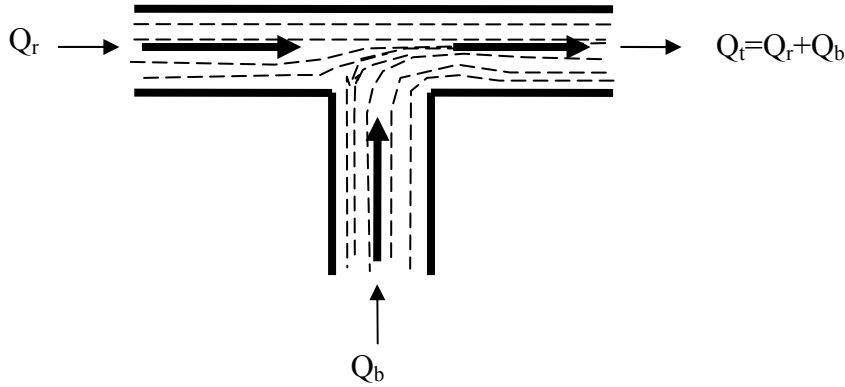
Q_t : toplam giriş akımı debisi, m³/sn

Q_b : dallanmış kısımdaki debi, m³/sn

Tablo 3.5. Gidiş istikametinde dallanma olan T bağlantılarında Q_t ve Q_b 'ya göre k_r ve k_b , değerleri.

$\frac{Q_b}{Q_t}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
k_r	0.04	-0.08	-0.05	0.07	0.21	0.35
k_b	0.95	0.88	0.89	0.95	1.10	1.28

b) Giriş akımına bağlantı



$$\Delta h = k \frac{V_t^2}{2g} \quad (3.8)$$

k ve Δh 'ın, düz borunun (k_r ve Δh_r) veya giriş kısmın (k_b ve Δh_b) dikkate alınmış olmasına göre ikişer değerleri vardır.

Burada;

V_t : birleşimden sonraki akımın hızı, m/sn

k_r ve k_b , Tablo 3.6 da Q_t ve Q_b nin fonksiyonu olarak verilmiştir

Q_t : toplam birleşimden sonraki akımın debisi, m³/sn

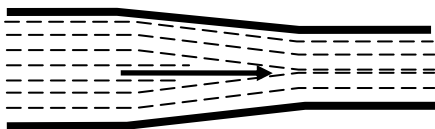
Q_b : dallanmış kısımdaki (yan giriş) debi, m³/sn

Tablo 3.6. Giriş akımına bağlantı olan T bağlantılarında Q_t ve Q_b 'ya göre k_r ve k_b , değerleri

$\frac{Q_b}{Q_t}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
k_r	0.04	0.17	0.30	0.41	0.51	0.60
k_b	-1.12	-0.40	0.08	0.47	0.72	0.91

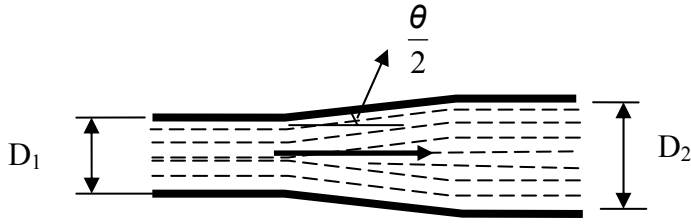
4. Konikliklerde (Redüksiyon) yük kaybı katsayısı

a) Daralan koniklik



Daralan konikliklerde yük kaybı ihmal edilebilir.

b) Açılan koniklik



1. Genişleme açısı $\leq 10^\circ$

$$\Delta h = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.9)$$

k, aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$k = 3.2 - (tg \theta / 2)^{1.25} \cdot [1 - (\frac{D_1}{D_2})^2]^2 \quad (3.10)$$

Burada;

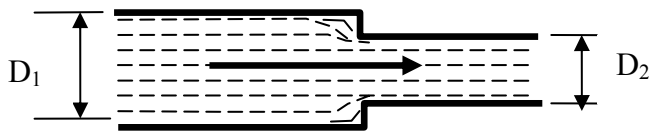
- V_1 : genişlemeden önceki ortalama hız, m/sn
- D_1 : genişleme öncesi borunun iç çapı, m
- D_2 : genişleme sonrası borunun iç çapı, m

2. Genişleme açısı $> 10^\circ$

Yük kaybı aşağıda ani genişlemeler için verilen bağıntı ile bulunur (3.11).

5. Çapta ani değişimlerde yük kaybı katsayısı

a) ani daralma



$$\Delta h = k \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.11)$$

Burada;

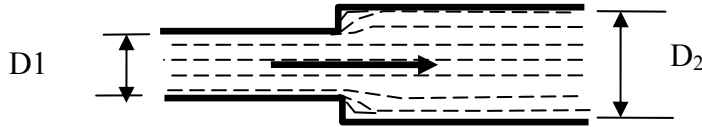
- V_2 : sıkışma sonrası ortalama hız, m/sn
- D_1 : sıkışma öncesi borunun iç çapı, m
- D_2 : sıkışma sonrası borunun iç çapı, m

k katsayısı, $(D_2/D_1)^2$ oranına bağlı olarak Tablo 3.7'den belirlenebilir. Özel hal için (tanktan boruya giriş halinde) $\left[\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = 0\right]$ $k = 0.5$ alınır.

Tablo 3.7. k katsayısının $(D_2/D_1)^2$ oranına bağlı olarak belirlenmesi (8)

$(D_2/D_1)^2$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
k	0.5	0.46	0.41	0.36	0.30	0.24	0.18	0.12	0.06	0.02	0

b) ani genişleme



$$\Delta h = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.12)$$

$$k = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2 \quad (3.13)$$

Burada;

V_1 : genişleme öncesi ortalama hız, m/sn

D_1 : genişleme öncesi borunun iç çapı, m

D_2 : genişleme sonrası borunun iç çapı, m

Bunların dışında hesaplamalarda gerekli olabilecek kısmi yük kaybı katsayıları Tablo 3.7'de verilmiştir.

3.3.2. Tam Dolu Borularda Yük Kayıpları

Dolu borularda yük kayıplarının hesapları için ampirik formüller kullanılmaktadır. Colebrook-White formülü her türlü akışkana uygulanabilirliği nedeniyle birçok ampirik formüle tercih edilir olmuştur. Ancak kompleks matematiksel yapısı dolayısıyla eşdeğer bazı ampirik formüller hala kullanılmaktadır.

1. Darcy-Weisbach formülü

Bu eşitlik aynı zamanda Darcy-Weisbach formülü olarak da bilinir. Ana iletim hatlarında yük kaybı hesabında kullanılır:

$$J = \frac{\lambda V^2}{2gD} \quad (3.14)$$

Tablo 3.8 Bazı ara elemanlarda yük kaybı katsayıları.

Ekipman	k
Baca	0,05
Terminal baca	1
Tam açık sürgülü vanalar	0,19
¼ ü kapalı sürgülü vanalar	1,15
½ si kapalı sürgülü vanalar	5,6
¾ ü kapalı sürgülü vanalar	24,0
Tam açık kelebek vanalar	0,3
20° kapalı kelebek vanalar	1,4
40° kapalı kelebek vanalar	10
60° kapalı kelebek vanalar	94
Salınımlı çek vanalar	0,6 - 2,3
Salınımlı tam açık çek vanalar	2,5
Diyafram vanalar, tam açık	2,3

Burada;

- J : yük kaybı, (m su sütunu/m boru boyu), boyutsuz
 λ : yük kaybı katsayısı (sürtünme katsayısı), boyutsuz
 D : boru iç çapı, m
 g : yerçekimi ivmesi, m/sn²

2. Manning-Strickler formülü

Kısmen dolu boru hatlarındaki (ve açık kanallarda) yük kayıpları için:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (3.15)$$

Tam dolu borularda yük kaybı formülü:

$$J = 6.35(nV)^2 D^{-4/3} \quad (3.16)$$

Burada;

- n : Manning formülünde pürüzlülük katsayısı, boyutsuz
 V : ilgili bölümdeki ortalama sıvı akış hızı, m/sn
 R : hidrolik yarıçap, (S/P), m
 S : ıslak kesit, m²
 P : ıslak çevre, m

Muhtelif borular için n değerleri Tablo 3.8 de verilmiştir.

Tablo 3.9 Muhtelif borular için Manning formülü n katsayısı değerleri (6)

Boru cinsi	N
PVC-PRV	0,009 - 0,013
Yeni kaplanmış demir	0,010 - 0,013
Eski kaplanmış demir	0,015
Beton boru	0,012 - 0,015
Kaplanmış çelik	0,012

3. Hazen-Williams formülü

Hazen-Williams formülü de yük kaybı hesaplarında sıkça kullanılır. Bu formülde yük kaybı, yük kaybı katsayısının (C_{wh})'nin fonksiyonu olarak tanımlanır. C_{wh} , borunun çapı ve iç yüzeyinin pürüzlülüğüne göre değişir. Temel bağıntı:

$$V = 0.849 C_{wh} R^{0.63} J^{0.54} \quad (3.17)$$

Tam dolu borularda ise:

$$J = 6.824 \left(\frac{V}{C_{wh}} \right)^{1.852} . D^{-1.167} \quad (3.18)$$

Burada;

- C_{wh} : Hazen-William formülünde pürüzlülük katsayısı, boyutsuz
 Re : Reynolds katsayısı ($Re=VD/v$), boyutsuz
 v : kinematik viskozite, m²/sn

Muhtelif borular için C_{wh} değerleri Tablo 3.10' da verilmiştir.

Tablo 3.10. Muhtelif borular için Hazen-Williams formülü C_{wh} katsayısı değerleri

Boru cinsi	C_{wh}
PVC-PRV	140-150
Kaplanmış çelik, yeni	135-150
Kaplanmış çelik, eski	80-120
Beton, asbest, kaplanmış çelik	130-150

Hazen-Williams formülü türbülanslı akış şartlarında ($Re \geq 2000$) her türlü sıvı ve gaz akışkanlarına uygulanabilir. Diğer yandan, yüksek miktarda süspansiyon içeren sıvı akışkanların yük kayıplarının hesaplanması için uygun değildir.

4. Colebrook-White formülü

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3.71.D} + \frac{2.51}{Re} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.19)$$

Burada;

k : Eşdeğer pürüzlülük katsayısı, metre

Pürüzlülük katsayısı (k) değerinin seçilmesi ile Colebrook formülünden λ katsayısının hesabı mümkün olmakta ve Darcy formülünden (3.12), J yük kaybı belli akış şartlarında hesaplanabilmektedir. Tablo 3.11'de çeşitli pürüzlülük katsayıları ($k=0,03$ mm ve $k=0,10$ mm) ve D değerleri için Colebrook formülü kullanılarak bulunan yük kayıpları verilmiştir. Bu tablo kinematik viskozitesi suyun kinematik viskozitesine çok yakın olan sıvılar için hiç hesap yapılmadan kullanılabilir. Kinematik viskozitesi farklı olan akışkanlar için Colebrook'un λ formülünü çözmeye gerek kalmadan hazır tabloları kullanmaya olanak sağlayan prosedür aşağıda verilmiştir:

Colebrook formülünde, k ve D 'nin belli değerleri için, λ sadece V/v ye bağlıdır.

- v_f : yük kaybı bulunması istenilen f sıvısının kinematik viskozitesi, m^2/sn
- v_b : kinematik viskozitesi 1.3×10^{-6} ya çok yakın olan (Tablo 3.11'in hazırlandığı sıvı) referans sıvısının viskozitesi, m^2/sn
- V_f : f sıvısının söz konusu bölümdeki ortalama hızı, m/sn
- V_b : referans sıvının hızı, (V/v oranı her iki sıvıda aynı olacak şekilde)
- J_f : f sıvısının yük kaybı, (m sıvı/m boru)
- J_b : referans sıvının V_b hızındaki yük kaybı, (m sıvı/m boru)

Eğer;

$V_f/v_f = V_b/v_b$, her iki sıvı için de λ değerleri eşit olacaktır ve buradan:

$$V_b = V_f (v_b/v_f) \text{ elde edilir.} \quad (3.20)$$

V_b 'ye tekabül eden J_b tablodan (gerekirse interpolasyon ile) bulunur. Darcy formülü her iki sıvı için yazılarak aşağıdaki bağlantı bulunur:

$$J_f/J_b = V_f^2/V_b^2 = v_b^2/v_f^2$$

Buradan;

$$J_f = J_b (v_f/v_b)^2 \quad (3.21)$$

Tablo 3.11 Tam dolu borularda yük kaybı (Colebrook formülü kullanılarak hesaplanmıştır) (2), (7).

Q (l/sn)	DN 40			DN 50			DN 60		
	J (m/km)*		V(m/sn)	J (m/km)*		V(m/sn)	J (m/km)*		V(m/sn)
	k=0,03mm	k=0,1mm		k=0,03mm	k=0,1mm		k=0,03mm	k=0,1mm	
1,30	34,252	39,343	1,03	11,546	12,834	0,65			
1,50	44,479	51,569	1,19	14,949	16,754	0,76	6,173	6,754	0,53
1,80	62,155	72,937	1,43	20,805	23,578	0,92	8,567	9,465	0,64
2,00	75,482	89,197	1,59	25,206	28,752	1,02	10,362	11,515	0,71
2,50	114,150	136,889	1,99	37,920	43,874	1,27	15,529	17,483	0,88
3,00	160,406	194,632	2,39	53,051	62,109	1,53	21,655	24,651	1,06
3,50	214,198	262,418	2,79	70,574	83,450	1,78	28,725	33,016	1,24
4,00				90,468	107,894	2,04	36,730	42,573	1,41
4,60				117,456	141,321	2,34	47,557	55,614	1,63
	DN 65			DN 80			DN 100		
2,60	11,289	12,597	0,78	4,121	4,48	0,52			
4,00	24,781	28,377	1,21	8,978	9,984	0,8	3,039	3,289	0,51
4,60	32,050	37,023	1,39	11,581	12,981	0,92	3,911	4,261	0,59
5,00	37,385	43,413	1,51	13,487	15,191	0,99	4,547	4,975	0,64
6,00	52,421	61,575	1,81	18,842	21,455	1,19	6,331	6,993	0,76
6,60	62,600	73,971	1,99	22,456	25,719	1,31	7,531	8,362	0,84
7,00	69,866	82,859	2,11	25,032	28,772	1,39	8,385	9,341	0,89
9,80	131,412	159,041	2,95	46,742	54,849	1,95	15,547	17,660	1,25
13,00				79,354	94,716	2,59	26,230	30,302	1,66
	DN 125			DN 150			DN 200		
9,00	4,469	4,906	0,73	1,844	1,984	0,51			
13,00	8,756	9,806	1,06	3,595	3,935	0,74			
16,00	12,838	14,549	1,30	5,255	5,814	0,91	1,297	1,389	0,51
20,00	19,416	22,293	1,63	7,92	8,870	1,13	1,945	2,105	0,64
22,00	23,187	26,772	1,79	9,443	10,633	1,24	2,314	2,516	0,70
24,00	27,277	31,655	1,96	11,092	12,552	1,36	2,713	2,962	0,76
26,00	31,684	36,942	2,12	12,867	14,627	1,47	3,141	3,443	0,83
32,00	46,802	55,226	2,61	18,937	21,787	1,81	4,600	5,096	1,02
36,00	58,454	69,432	2,93	23,602	27,339	2,04	5,717	6,372	1,15
46,00				37,409	43,940	2,60	9,003	10,172	1,46
	DN 250			DN 300			DN 350		
46,00	3,013	3,310	0,94	1,238	1,334	0,65			
56,00	4,331	4,807	1,14	1,776	1,930	0,79	0,838	0,897	0,58
70,00	6,550	7,358	1,43	2,677	2,942	0,99	1,261	1,363	0,73
90,00	10,467	11,922	1,83	4,262	4,744	1,27	2,002	2,189	0,94
110,00	15,253	17,565	2,24	6,192	6,965	1,56	2,902	3,204	1,14
130,00	20,899	24,285	2,65	8,46	9,604	1,84	3,957	4,406	1,35
140,00	24,043	28,049	2,85	9,721	11,080	1,98	4,542	5,078	1,46
160,00				12,495	14,343	2,26	5,828	6,561	1,66
	DN 400			DN 450			DN 500		
80,00	0,841	0,902	0,64	0,474	0,503	0,50			
140,00	2,357	2,594	1,11	1,324	1,438	0,88	0,792	0,851	0,71
180,00	3,760	4,191	1,43	2,108	2,317	1,13	1,259	1,368	0,92
270,00	8,035	9,148	2,15	4,488	5,036	1,70	2,671	2,960	1,38
300,00	9,800	11,219	2,39	5,468	6,170	1,89	3,251	3,622	1,53
350,00	13,117	15,136	2,79	7,307	8,311	2,20	4,338	4,872	1,78
400,00				9,401	10,767	2,52	5,575	6,304	2,04
460,00				12,249	14,129	2,89	7,255	8,263	2,34

Q (l/sn)	DN 600			DN 700			DN 800		
	J (m/km)*		V(m/sn)	J (m/km)*		V(m/sn)	J (m/km)*		V(m/sn)
	k=0,03mm	k=0,1mm		k=0,03mm	k=0,1mm		k=0,03mm	k=0,1mm	
160,00	0,417	0,443	0,57						
230,00	0,812	0,875	0,81	0,383	0,407	0,60			
300,00	1,327	1,449	1,06	0,625	0,671	0,78	0,326	0,346	0,60
350,00	1,768	1,943	1,24	0,830	0,898	0,91	0,433	0,462	0,70
460,00	2,944	3,281	1,63	1,379	1,510	1,20	0,717	0,774	0,92
560,00	4,259	4,794	1,98	1,990	2,201	1,46	1,033	1,125	1,11
660,00	5,805	6,589	2,33	2,707	3,018	1,71	1,403	1,540	1,31
760,00	7,581	8,666	2,69	3,529	3,962	1,97	1,826	2,019	1,51
900,00				4,855	5,497	2,34	2,507	2,795	1,79
	DN 900			DN 1000			DN 1100		
460,00	0,403	0,431	0,72	0,241	0,255	0,59			
520,00	0,506	0,543	0,82	0,303	0,322	0,66	0,190	0,201	0,55
620,00	0,701	0,758	0,97	0,419	0,448	0,79	0,263	0,279	0,65
720,00	0,925	1,007	1,13	0,552	0,595	0,92	0,347	0,370	0,76
950,00	1,552	1,712	1,49	0,925	1,008	1,21	0,579	0,626	1,00
1200,00	2,406	2,685	1,89	1,431	1,578	1,53	0,895	0,977	1,26
1500,00	3,666	4,135	2,36	2,176	2,425	1,91	1,359	1,499	1,58
1750,00	4,909	5,580	2,75	2,910	3,268	2,23	1,816	2,018	1,84
1900,00	5,739	6,549	2,99	3,400	3,834	2,42	2,120	2,365	2,00
2300,00				4,885	5,559	2,93	3,042	3,425	2,42
	DN 1200			DN 1400			DN 1500		
600,00	0,162	0,171	0,53						
850,00	0,308	0,329	0,75	0,145	0,153	0,55			
1200,00	0,584	0,632	1,06	0,275	0,293	0,78	0,196	0,208	0,68
1500,00	0,886	0,968	1,33	0,416	0,447	0,97	0,297	0,317	0,85
1800,00	1,246	1,374	1,59	0,584	0,633	1,17	0,416	0,449	1,02
2400,00	2,142	2,394	2,12	1,001	1,099	1,56	0,712	0,777	1,36
2800,00	2,867	3,228	2,48	1,337	1,480	1,82	0,951	1,045	1,58
3300,00	3,917	4,444	2,92	1,813	2,033	2,14	1,296	1,435	1,87
4100,00				2,750	3,099	2,66	1,952	2,184	2,32
5300,00							3,179	3,599	3,00
	DN 1600			DN 1800			DN 2000		
1300,00	0,166	0,176	0,65	0,094	0,098	0,51			
1600,00	0,244	0,260	0,80	0,137	0,145	0,63	0,082	0,086	0,51
2000,00	0,369	0,397	0,99	0,208	0,221	0,79	0,124	0,131	0,64
3000,00	0,788	0,863	1,49	0,441	0,478	1,18	0,263	0,282	0,95
4100,00	1,418	1,576	2,04	0,793	0,870	1,61	0,472	0,512	1,31
5000,00	2,065	2,315	2,49	1,152	1,276	1,96	0,685	0,750	1,59
6000,00	2,920	3,301	2,98	1,627	1,816	2,36	0,966	1,066	1,91
7600,00				2,549	2,877	2,99	1,510	1,686	2,42
9000,00							2,083	2,343	2,86

* yük kaybı, m sıvı/km boru

KAYNAKLAR

- (1) Yılmaz Muslu, 1996, Atıksuların arıtılması, Cilt II, İ.T.Ü. Matbaası.
- (2) Pont-a-Mousson, 1992, A comprehensive ductile iron pipeline system.
- (3) Robert H. Perry, Don W. Green, 1997, Perry's Chemical Engineers' Handbook, seventh edition, McGraw-Hill International Editions.
- (4) Syed R. Kasım, 1985, Wastewater Treatment Plants, Treatment, Design, and Operation, CBS Publishing Japan Ltd.
- (5) R.E. Featherstone and C. Nalluri, 1982, Civil Engineering Hydraulics, Essential Theory with Worked Examples, Granada Publishing Limited.
- (6) Horace William King, Ernest F. Brater, 1959, Hidrolik el kitabı, T.C.Nafia Vekaleti, Devlet Su İşleri Umum Müdürlüğü Neşriyatı Sayı:70.
- (7) Biwater Industries, 1993, Water Industrial Manual Water Products and Services.
- (8) B. Mutlu Sümer, İstemi Ünsal, Mehmetçik Bayazıt, 1985, Hidrolik, Birsen Yayınevi,
- (9) Cevat Erkek, Necati Ağırlioğlu, 2002, Su Kaynakları Mühendisliği Uygulamaları, 3. baskı, Beta Yayınevi,.