

6. HESAPLAMA ESASLARI

6.1 Et Kalınlığının Hesaplanması

Gerekli et kalınlığının hesaplanması için, ISO 161-1'deki boru hesaplama formülü kullanılır.

$$\sigma_s = PN \cdot \frac{da \cdot s_{\min}}{20 \cdot s_{\min}} = PN \cdot S$$

PN	: Nominal basınç	(bar), 1 bar = 0,1 N/mm ²
s	: Et kalınlığı	(mm)
S	: Boru serisi S=da/2.s	(-)
σ_s	: Çevresel gerilmesi	(N/mm ²)
SDR	: Standart Boyut oranı SDR= da/e= 2S+1	
da	: Boru dış çapı	(mm)

Buna göre minimum et kalınlığı aşağıdaki gibidir:

$$s_{\min} = \frac{PN \cdot da}{20 \cdot \sigma_s + PN}$$

Çevre gerilmesi hesabı emniyet katsayısına bağlı olup, hesaplamada emniyet katsayısı göz önüne alınmalıdır.

$$\sigma_s = \frac{MRS}{C}$$

MRS: Minimum Gerekli Dayanıklılık (Tablo 2.1'e bakınız)

Emniyet katsayısı, emniyet faktörü ISO/DIN 12162' de Toplam İşletme Katsayısı ile ifade edilir ve çok sayıda işlevi vardır. Öncelikle boru hesaplamalarının (ölçümlendirmelerin) doğruluğu ve boruda nominal basıncın artması durumunda emniyeti sağlamalıdır.

Su borusu için C_{min}= 1.25

Gaz borusu için C_{min}= 2.0

6.2 HDPE İçin Çevre Gerilmesi Tablosu

Tablo 6.1 HDPE Çevre Gerilmesi

PE-Sınıflı	MRS (N/mm ²)	Gerilme σ_s (N/mm ²)	Emniyet Faktörü C	Örnek Boru	Ø 110 PN10
				Et Kalınlığı s (mm)	Ağırlık (kg/m)
PE 63	6.3	5.0	1.25	10.0	3.14
PE 80	8.0	6.3	1.25	8.1	2.62
PE 100	10.0	8.0	1.25	6.6	2.17

6.3 Stabilité (Çökme) Basıncı

Toprak altına döşenen boruların, toprak yükü dışında maruz kaldığı yükler vardır. Bunlar, deniz deşarji gibi doğrudan denize boru döşenmesinde olduğu gibi, boru toprak altına döşenmesine rağmen, zemin suyunun oluşturacağı yükler gibi ek yüklerdir.

Bu yüklerin dışında gömlekleme yöntemi ile iç içe geçen borularda, borular arası boşluğu doldurmak için yapılan gömlekleme betonu veya emiş maksatlı vakumla çalışan borularda oluşan ek yükler gibi aşırı gerilmenin olacağı projelerde stabilite (çökme) hesabı yapmak gerekecektir.

PE 100 Borular için stabilite (çökme) basıncı hesabı:

$$P_k = \frac{10 \cdot E_c}{4 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left[\frac{s}{r_m} \right]^3$$

P_k	: Kritik çökme basıncı	(bar)
E_c	: Elastite modülü	(N/mm ²)
μ	: Enine termoplast sayısı 0.4	(-)
s	: Et kalınlığı	(mm)
r_m	: Ortalama boru yarı çapı	(mm)

PE 100 Borular için kabul edilebilir stabilite (çökme) basıncı hesabı:

$$P_{k,zul} = P_k \cdot \frac{f_r}{s}$$

$P_{k,zul}$: Kabul edilebilir kritik çökme basıncı	(bar)
f_r	: Azalma faktörü (0,9.....0,95)	(-)
s	: Emniyet faktörü (≥ 2)	(-)

PE 100 Borular için stabilite (çökme) basıncı hesabı:

$$\sigma_k = P_k \cdot \frac{r_m}{s}$$

σ_k	: Kritik çökme basıncı	(N/mm ²)
P_k	: Kritik çökme basıncı	(bar)
r_m	: Ortalama boru yarı çapı	(mm)
s	: Et kalınlığı	(mm)

6.4 Boru Çapının Hidrolik Hesabı

Boru kesitinin tespiti; sıvı geçiş yolunda geçiş debisi sabit ise süreklilik dengesi sağlanır.

$$Q = 0.0036 \cdot A \cdot v$$

Q	: Taşıma miktarı, debi	(m ³ /h)
A	: Boru kesiti	(mm ²)
v	: Akış hızı	(m/s)

Gaz ve buhar geçiş yolunda geçiş debisi sabit ise, süreklilik dengesi sağlanır. Burada aşağıdaki formül

$$m = 0.0036 \cdot A \cdot v \cdot \rho$$

m	: Geçiş debisi	(kg/h)
ρ	: Taşınan maddenin yoğunluğu	(kg/m ³)

Gerekli boru kesitinin hesaplanmasında, pratik kullanışlı formül aşağıda belirtildiği gibidir (Bu formülde sabit sayılar, yukarıdaki formülde sabit rakamların çarpımından gelir):

$$d_i = 18.8 \cdot \sqrt{\frac{Q^*}{v}}$$

$$d_i = 35.7 \cdot \sqrt{\frac{Q^{**}}{v}}$$

d_i	: Boru iç çapı	(mm)
Q^*	: Taşıma miktarı	(m ³ /h)
Q^{**}	: Taşıma miktarı	(l/sn)

6.5 Basınç Kayıpları

Aşağıda belirtilmiş olan değerler hidrolik basınç kayıplarını büyük oranda etkiler:

- Boru hattının uzunluğu • Düz hattın boru çapı • Borunun pürüzsüzlüğü • Boru bağlantıları (fittings ve armatürler)
- Akışkan yoğunluğu • Akış şekli (düzgün veya düzensiz akış)

Toplam basınç kayıpları aşağıda belirtildiği gibi ayrı ayrı basınç kayıplarının toplamından oluşur:

$$\Delta p = \sum \Delta p_i = \Delta p_R + \Delta p_F + \Delta p_A + \Delta p_V$$

Ayrı Ayrı Basınç Kayıplarının Hesaplanması

HDPE Borularda geçiş miktarı, akış hızı ve basınç düşmesi sonucu ortaya çıkan yüksek enerji kaybı (hv) için veya basınç kaybı (p) hesabı için aşağıdaki formüller kullanılır.

a) Darcy - Weisbach Formülü

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l \cdot v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-5}}{2 \cdot d_i}$$

$$h^{\Delta} = \lambda \cdot \frac{l \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot d_i}$$

- di : Boru iç çapı (mm)
 l : Boru hattının uzunluğu (mm)
 v : Ortalama sıvı akış hızı (m/s)
 ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)
 λ : Sürtünme katsayısı (0,015 yeterli) (-)
 g : Yer çekimi (9.81 m/s²)

Yüksek enerji kaybı; hatta istenen akış hızının elde edilmesi için eğimde yapılan yükseklik farklarını ifade eder. Sürtünme katsayısı aşağıdaki genel formüllerin kapsamındadır.

b) Colebrook - White Formülü

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_b}{3.71 \cdot d_i} \right)$$

- Re: Reynold sayısı = v · d/v
 ν : Suyun kinematik akıcılık viskozitesi = 1,31 m²/s
 k : Boru iç yüzeyinin hidrolik pürüzsüzlük değeri (m)

Bir önceki formül dönüştürüldüğünde:

$$v = \left(-2 \log \left[\frac{2.51 \cdot v}{d_i \sqrt{2 \cdot g \cdot J_e \cdot d}} + \frac{k_b}{3.71 \cdot d} \right] \right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot J_e \cdot d}$$

İki tip pürüzsüzlük değeri vardır; cidar pürüzsüzlüğü "kb" ve çalışma pürüzsüzlüğü (sistem pürüzsüzlüğü) "kb".

- v : Akış hızı (m/s) | g : Yerçekimi ivmesi (Nm/s²)
 Je : Enerji hattı merkezleme eğilimi (-) | ν : Kinematik sertlik (12°C'de atıksu için 1.31x10⁶) (m²/s)
 Kb : Çalışma pürüzsüzlüğü (mm.) | d : Boru iç çapı (mm.)

Tablo 6.2 Çeşitli Boru Hatları İçin Pürüzsüzlük Değerleri

Hattın Çeşidi	Pürüzsüzlük k (mm)
Çelik, yeni	0.010.1
Duktil boru, yeni	0.00011
Duktil boru, eski	0.030.2
Plastik boru (genel)	0.010.1
HDPE	0.0070.1
Beton boru, yeni	1.02.0
Seramik boru	0.11.0
Eski boru, agresif akışkanlarla çalışmış	2.0

Kb Çalışma pürüzsüzlüğünü belirleyen değerler:

- Cidar pürüzsüzlüğü
- Boru hattının düzlüğü (zemin eğimi var mı?).
- Koç darbesi
- Ek giriş hatları
- Menholler
- Giriş ve çıkış depoları

Tablo 6.3 ATV A 110 Standartının tavsiye ettiği pürüzlülük değerleri

Çalışma Şekilleri	HDPE için Tavsiye Edilen Kb	ATV A 110 Standartlarında Belirtilmiş Olan Kb
Redüksiyonel hatlar, basınçlı ve menholsüz relining yenileme	0.10 mm	0.25 mm
Menhol bağlantılı tali hatlar ATV A 241 1.1.5'e göre	0.25 mm	0.50 mm
Menhol bağlantılı kollektör hatları, ATV A 241.1.1.5'e göre	0.50 mm	0.75 mm
Ek giriş hatları ile toplama kanalları, açılı eğimler ile özel menholler	0.75 mm	1.50 mm

Ek parçalarda basınç kayıpları (Fitings) Δp_F :

$$\Delta p_F = \zeta \cdot \frac{\rho}{2 \cdot 10^2} \cdot v^2 \cdot n$$

ζ : Ek parça direnme değeri (-)
 ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)
 v : Akış hızı (m/s)
 n : Ek parça sayısı (-)

Armatürlerde basınç kayıpları Δp_A :

$$\Delta p_A = \zeta \cdot \frac{\rho}{2 \cdot 10^2} \cdot v^2 \cdot n$$

ζ : Ek parça direnme değeri (-)
 ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)
 v : Akış hızı (m/s)
 n : Ek parça sayısı (-)

Armatürlerin direnme değeri (z) 0.5 ve 5.0 arasındadır. Bu değer ne kadar olduğu armatür üreticisi tarafından bilinir.

Boru bağlantılarında basınç kayıpları Δp_v :

Çeşitli tiplerde boru birleştirme yöntemleri olmasından dolayı (kaynaklı, flanşlı vs.) tam bir kayıp değeri vermek mümkün değildir. Ancak emniyet için % 3- 5 arası ek bir basınç kaybı eklemek gereklidir.

c) Hazen - Williams Formülü

$$V = 0.85 \cdot C \cdot R^{0.63} \cdot J^{0.54}$$

V : Hız (metre/saniye)
 C : Pürüzsüzlük Katsayısı
 d : İç Çap (metre)
 L : Boru uzunluğu (metre)
 hf : Hidrolik kayıp (metre)
 J : Hidrolik Eğim

Pürüzsüzlük katsayısı "C", plastik borular için 150'dir

$$h_f = \left[\frac{1.170}{C} \right]^{1.852} \cdot \frac{L}{d^{1.167}} \cdot V^{1.852}$$

$$J = \left[\frac{3.59}{C} \right]^{1.852} \cdot \left[\frac{Q}{d^{4.87}} \right]^{1.852}$$

d) Manning Formülü

$$Q = A \cdot V$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{K} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

Q : Debi (m³/saniye)
 V : Hız (metre/saniye)
 K : Pürüzsüzlük Katsayısı
 R : Hidrolik Yarıçap (m)
 J : Hidrolik Eğim
 Pürüzsüzlük katsayısı "K", plastik borular için 0.015'dir.

Tablo 6.4 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu k=0.015 mm.

D = 75 mm. s = 4.5 mm. Di = 66 mm.			D = 90 mm. s = 5.4 mm. Di = 79.2 mm.			D = 110 mm. s = 6.6 mm. Di = 96.8 mm.			D = 125 mm. s = 7.4 mm. Di = 110.2 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.20	0.68	0.92	0.20	0.98	0.73	0.20	1.47	0.58	0.20	1.91	0.47
0.30	1.03	1.75	0.30	1.48	1.5	0.30	2.21	1.13	0.30	2.86	0.93
0.40	1.37	3.19	0.40	1.97	2.51	0.40	2.94	1.97	0.40	.381	1.61
0.50	1.71	4.51	0.50	2.46	3.47	0.50	3.68	2.87	0.50	4.77	2.45
0.60	2.05	6.03	0.60	2.95	4.87	0.60	4.41	3.92	0.60	5.72	3.34
0.70	2.39	8.37	0.70	3.45	6.49	0.70	5.15	5.3	0.70	6.67	4.35
0.80	2.74	10.35	0.80	3.94	8.32	0.80	5.88	6.66	0.80	7.63	5.62
0.90	3.08	13.28	0.90	4.43	10.35	0.90	6.62	8.39	0.90	8.58	7.04
1.00	3.42	15.71	1.00	4.92	12.8	1.00	7.36	10.05	1.00	9.53	8.44
1.10	3.76	18.32	1.10	5.42	15.02	1.10	8.09	11.85	1.10	10.49	10.13
1.20	4.10	22.08	1.20	5.91	17.65	1.20	8.83	14.08	1.20	11.44	11.77
1.30	4.45	25.12	1.30	6.40	20.48	1.30	9.56	16.17	1.30	12.39	13.53
1.40	4.79	29.46	1.40	6.89	23.51	1.40	10.30	18.73	1.40	13.35	15.62
1.50	5.13	32.92	1.50	7.39	26.07	1.50	11.03	21.11	1.50	14.30	17.62
1.60	5.47	36.56	1.60	7.88	29.45	1.60	11.77	23.62	1.60	15.25	19.97
1.70	5.81	41.69	1.70	8.37	33.02	1.70	12.50	26.62	1.70	16.21	22.2
1.80	6.16	45.75	1.80	8.86	36.78	1.80	13.24	29.46	1.80	17.16	24.82
1.90	6.50	51.44	1.90	9.36	40.73	1.90	13.98	32.82	1.90	18.11	27.29
2.00	6.84	55.91	2.00	9.85	44.87	2.00	14.71	35.91	2.00	19.07	30.17
2.10	7.18	60.56	2.10	10.34	49.2	2.10	15.45	39.12	2.10	20.02	32.87
2.20	7.52	67.03	2.20	10.83	53	2.20	16.18	42.95	2.20	20.97	36
2.30	7.86	72.09	2.30	11.33	0.72	2.30	16.92	46.44	2.30	21.93	38.94
2.40	8.21	79.10	2.40	11.82	58.43	2.40	17.65	50.59	2.40	22.88	42.33
2.50	8.55	84.56	2.50	12.31	63.32	2.50	18.39	54.36	2.50	23.83	45.85
2.60	8.89	90.20	2.60	12.80	67.37	2.60	19.12	58.25	2.60	24.79	49.14
2.70	9.23	97.98	2.70	13.29	72.6	2.70	19.86	62.86	2.70	25.74	52.92
2.80	9.57	104.03	2.80	13.79	78.02	2.80	20.60	67.04	2.80	26.69	56.44
2.90	9.92	112.36	2.90	14.28	83.63	2.90	21.33	71.96	2.90	27.65	60.06
3.00	10.26	118.78	3.00	14.77	89.42	3.00	22.07	76.41	3.00	28.60	64.21

Tablo 6.5 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu k=0.015 mm.

D = 140 mm. s = 8.3 mm. Di = 66 mm.			D = 160 mm. s = 9.5 mm. Di = 141 mm.			D = 180 mm. s = 10.7 mm. Di = 158.6 mm.			D = 200 mm. s = 11.9 mm. Di = 176.2 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.20	2.39	0.41	0.20	3.12	0.34	0.20	3.95	0.31	0.20	4.87	0.27
0.30	3.59	0.85	0.30	4.68	0.72	0.30	5.92	0.62	0.30	7.31	0.54
0.40	4.78	1.42	0.40	6.24	1.18	0.40	7.90	1.04	0.40	9.75	0.92
0.50	5.98	2.12	0.50	7.80	1.79	0.50	9.87	1.56	0.50	12.19	1.37
0.60	7.17	2.95	0.60	9.36	2.51	0.60	11.85	2.17	0.60	14.62	1.89
0.70	8.37	3.9	0.70	10.92	3.28	0.70	13.82	2.88	0.70	17.06	2.52
0.80	9.56	4.96	0.80	12.49	4.2	0.80	15.80	3.64	0.80	19.50	3.2
0.90	10.76	6.15	0.90	14.05	5.16	0.90	17.77	4.52	0.90	21.93	3.99
1.00	11.95	7.45	1.00	15.61	6.29	1.00	19.75	5.49	1.00	24.37	4.82
1.10	13.15	8.87	1.10	17.17	7.52	1.10	21.72	6.55	1.10	26.81	5.73
1.20	14.34	10.4	1.20	18.73	8.77	1.20	23.70	7.69	1.20	29.25	6.71
1.30	15.54	12.05	1.30	20.29	10.19	1.30	25.67	8.86	1.30	31.68	7.8
1.40	16.74	13.81	1.40	21.85	11.62	1.40	27.64	10.17	1.40	34.12	8.97
1.50	17.93	15.68	1.50	23.41	13.24	1.50	29.62	11.56	1.50	36.56	10.16
1.60	19.13	17.66	1.60	24.97	14.96	1.60	31.59	13.04	1.60	38.99	11.42
1.70	20.32	19.75	1.70	26.53	16.66	1.70	33.57	14.6	1.70	41.43	12.82
1.80	21.52	21.95	1.80	28.09	18.57	1.80	35.54	16.16	1.80	43.87	14.22
1.90	22.71	24.26	1.90	29.65	20.45	1.90	37.52	17.89	1.90	46.31	15.76
2.00	23.91	26.68	2.00	31.21	22.55	2.00	39.49	19.69	2.00	48.74	17.31
2.10	25.10	29.21	2.10	32.77	24.74	2.10	41.47	21.58	2.10	51.18	18.93
2.20	26.30	31.85	2.20	34.33	26.89	2.20	43.44	23.55	2.20	53.62	20.68
2.30	27.49	34.59	2.30	35.90	29.27	2.30	45.42	25.5	2.30	56.05	22.44
2.40	28.69	37.45	2.40	37.46	31.59	2.40	47.39	27.63	2.40	58.49	24.34
2.50	29.88	40.41	2.50	39.02	34.16	2.50	49.36	29.84	2.50	60.93	26.23
2.60	31.08	43.48	2.60	40.58	36.82	2.60	51.34	32.13	2.60	63.37	28.2
2.70	32.27	46.66	2.70	42.14	39.4	2.70	53.31	34.51	2.70	65.80	30.31
2.80	33.47	49.94	2.80	43.70	42.25	2.80	55.29	36.84	2.80	68.24	32.41
2.90	34.67	53.33	2.90	45.26	45.01	2.90	57.26	39.37	2.90	70.68	34.67
3.00	35.86	56.83	3.00	46.82	48.04	3.00	59.24	41.98	3.00	73.11	36.91

Tablo 6.6 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu k=0.015 mm.

D = 225 mm. s = 13.4 mm. Di = 198.2 mm.			D = 250 mm. s = 14.8 mm. Di = 220.4 mm.			D = 280 mm. s = 16.6 mm. Di = 246.8 mm.			D = 315 mm. s = 18.7 mm. Di = 277.6 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.20	6.17	0.23	0.20	7.63	0.20	0.20	9.56	0.18	0.20	12.10	0.15
0.30	9.25	0.48	0.30	11.44	0.42	0.30	14.34	0.36	0.30	18.15	0.31
0.40	12.33	0.80	0.40	15.25	0.70	0.40	19.13	0.60	0.40	24.20	0.53
0.50	15.42	1.19	0.50	19.07	1.04	0.50	23.91	0.91	0.50	30.25	0.78
0.60	18.50	1.65	0.60	22.88	1.45	0.60	28.69	1.26	0.60	36.30	1.10
0.70	21.59	2.17	0.70	26.69	1.92	0.70	33.47	1.67	0.70	42.35	1.45
0.80	24.67	2.78	0.80	30.51	2.46	0.80	38.25	2.13	0.80	48.39	1.85
0.90	27.75	3.45	0.90	34.32	3.04	0.90	43.03	2.64	0.90	54.44	2.30
1.00	30.84	4.19	1.00	38.13	3.69	1.00	47.81	3.20	1.00	60.49	2.79
1.10	33.92	4.99	1.10	41.95	4.39	1.10	52.60	3.82	1.10	66.54	3.32
1.20	37.00	5.86	1.20	45.76	5.15	1.20	57.38	4.49	1.20	72.59	3.90
1.30	40.09	6.80	1.30	49.57	5.98	1.30	62.16	5.19	1.30	78.64	4.52
1.40	43.17	7.79	1.40	53.39	6.85	1.40	66.94	5.95	1.40	84.69	5.18
1.50	46.26	8.85	1.50	57.20	7.78	1.50	71.72	6.77	1.50	90.74	5.89
1.60	49.34	9.94	1.60	61.01	8.76	1.60	76.50	7.63	1.60	96.79	6.63
1.70	52.42	11.13	1.70	64.82	9.80	1.70	81.28	8.54	1.70	102.84	7.42
1.80	55.51	12.38	1.80	68.64	10.92	1.80	86.07	9.48	1.80	108.89	8.26
1.90	58.59	13.69	1.90	72.45	12.06	1.90	90.85	10.49	1.90	114.94	9.12
2.00	61.67	15.06	2.00	76.26	13.26	2.00	95.63	11.54	2.00	120.99	10.04
2.10	64.76	16.50	2.10	80.08	14.52	2.10	100.41	12.65	2.10	127.04	10.99
2.20	67.84	18.00	2.20	83.89	15.82	2.20	105.19	13.80	2.20	133.09	12.00
2.30	70.93	19.56	2.30	87.70	17.22	2.30	109.97	14.97	2.30	139.14	13.03
2.40	74.01	21.18	2.40	91.52	18.64	2.40	114.75	16.22	2.40	145.18	14.11
2.50	77.09	22.81	2.50	95.33	20.11	2.50	119.54	17.51	2.50	151.23	15.23
2.60	80.18	24.55	2.60	99.14	21.63	2.60	124.32	18.85	2.60	157.28	16.40
2.70	83.26	26.35	2.70	102.96	23.21	2.70	129.10	20.23	2.70	163.33	17.59
2.80	86.34	28.22	2.80	106.77	24.88	2.80	133.88	21.64	2.80	169.38	18.84
2.90	89.43	30.14	2.90	110.58	26.56	2.90	138.66	23.12	2.90	175.43	20.11
3.00	92.51	32.13	3.00	114.40	28.30	3.00	143.44	24.64	3.00	181.48	21.45

Tablo 6.7 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu k=0.015 mm.

D = 355 mm. s = 21.1 mm. Di = 312.8 mm.			D = 400 mm. s = 23.7 mm. Di = 352.6 mm.			D = 450 mm. s = 26.7 mm. Di = 396.6 mm.			D = 500 mm. s = 29.7 mm. Di = 440.6 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.20	15.36	0.13	0.20	19.52	0.11	0.20	24.69	0.10	0.20	30.48	0.09
0.30	23.04	0.27	0.30	29.28	0.23	0.30	37.04	0.20	0.30	45.72	0.18
0.40	30.72	0.45	0.40	39.04	0.39	0.40	49.39	0.34	0.40	60.96	0.30
0.50	38.40	0.68	0.50	48.80	0.59	0.50	61.74	0.51	0.50	76.20	0.45
0.60	46.08	0.95	0.60	58.56	0.83	0.60	74.08	0.71	0.60	91.43	0.63
0.70	53.77	1.26	0.70	68.32	1.09	0.70	86.43	0.95	0.70	106.67	0.84
0.80	61.45	1.60	0.80	78.08	1.39	0.80	98.78	1.21	0.80	121.91	1.07
0.90	69.13	1.99	0.90	87.84	1.72	0.90	111.13	1.50	0.90	137.15	1.32
1.00	76.81	2.42	1.00	97.60	2.10	1.00	123.47	1.82	1.00	152.39	1.61
1.10	84.49	2.88	1.10	107.36	2.50	1.10	135.82	2.17	1.10	167.63	1.92
1.20	92.17	3.38	1.20	117.12	2.93	1.20	148.17	2.55	1.20	182.87	2.25
1.30	99.85	3.91	1.30	126.88	3.40	1.30	160.52	2.96	1.30	198.11	2.61
1.40	107.53	4.49	1.40	136.64	3.90	1.40	172.86	3.29	1.40	216.35	3.00
1.50	115.21	5.11	1.50	146.39	4.43	1.50	185.21	3.85	1.50	228.59	3.41
1.60	122.89	5.76	1.60	156.15	4.99	1.60	197.56	4.34	1.60	243.83	3.84
1.70	130.57	6.44	1.70	165.91	5.59	1.70	209.91	4.86	1.70	259.06	4.29
1.80	138.25	7.16	1.80	175.67	6.21	1.80	222.25	5.41	1.80	274.30	4.78
1.90	145.93	7.92	1.90	185.43	6.87	1.90	234.60	5.98	1.90	289.54	5.29
2.00	153.61	8.71	2.00	195.19	7.56	2.00	246.95	6.58	2.00	304.78	5.81
2.10	161.30	9.54	2.10	204.95	8.28	2.10	259.30	7.21	2.10	320.02	6.37
2.20	168.98	10.41	2.20	214.71	9.03	2.20	271.64	7.86	2.20	335.26	6.95
2.30	176.66	11.30	2.30	224.47	9.82	2.30	283.99	8.54	2.30	350.50	7.55
2.40	184.34	12.24	2.40	234.23	10.62	2.40	296.34	9.25	2.40	365.74	8.18
2.50	192.02	13.22	2.50	243.99	11.47	2.50	308.68	9.99	2.50	380.98	8.83
2.60	199.70	14.23	2.60	253.75	12.35	2.60	321.03	10.75	2.60	396.22	9.50
2.70	207.38	15.28	2.70	263.51	13.25	2.70	333.38	11.54	2.70	411.46	10.20
2.80	215.06	16.34	2.80	273.27	14.19	2.80	345.73	12.35	2.80	426.69	10.92
2.90	222.74	17.46	2.90	283.03	15.15	2.90	358.07	13.19	2.90	441.93	11.66
3.00	230.42	18.61	3.00	292.79	16.16	3.00	370.42	14.06	3.00	457.17	12.44

Tablo 6.8 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu k=0.015 mm.

D = 560 mm. s = 33.2 mm. Di = 493.6 mm.			D = 630 mm. s = 37.4 mm. Di = 555.2 mm.			D = 710 mm. s = 42.1 mm. Di = 625.8 mm.			D = 800 mm. s = 47.4 mm. Di = 705.2 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.20	38.25	0.08	0.20	48.39	0.07	0.20	61.49	0.06	0.20	78.08	-----
0.30	57.38	0.16	0.30	72.59	0.14	0.30	92.23	0.12	0.30	117.12	0.10
0.40	76.50	0.26	0.40	96.79	0.23	0.40	122.97	0.20	0.40	156.15	0.17
0.50	95.63	0.39	0.50	120.99	0.34	0.50	153.71	0.30	0.50	195.19	0.26
0.60	114.75	0.55	0.60	145.18	0.48	0.60	184.46	0.42	0.60	234.23	0.36
0.70	133.88	0.73	0.70	169.38	0.63	0.70	215.20	0.55	0.70	273.27	0.48
0.80	153.01	0.93	0.80	193.58	0.81	0.80	245.94	0.70	0.80	312.31	0.61
0.90	172.13	1.16	0.90	217.78	1.01	0.90	276.68	0.87	0.90	351.35	0.76
1.00	191.26	1.41	1.00	241.97	1.22	1.00	307.43	1.06	1.00	390.39	0.92
1.10	210.38	1.68	1.10	266.17	1.46	1.10	338.17	1.27	1.10	429.42	1.10
1.20	229.51	1.97	1.20	290.37	1.71	1.20	368.91	1.49	1.20	468.46	1.29
1.30	248.64	2.28	1.30	314.57	1.99	1.30	399.65	1.72	1.30	408.50	1.50
1.40	267.76	2.62	1.40	338.76	2.28	1.40	430.40	1.98	1.40	546.54	1.72
1.50	286.89	2.98	1.50	362.96	2.59	1.50	461.14	2.25	1.50	585.58	1.95
1.60	306.01	3.35	1.60	387.16	2.92	1.60	491.88	2.54	1.60	624.62	2.20
1.70	325.14	3.76	1.70	411.36	3.27	1.70	522.62	2.84	1.70	663.66	2.47
1.80	344.26	4.18	1.80	435.55	3.64	1.80	553.37	3.16	1.80	702.69	2.74
1.90	363.39	4.62	1.90	459.75	4.02	1.90	584.11	3.49	1.90	741.73	3.03
2.00	382.52	5.09	2.00	483.95	4.43	2.00	614.85	3.84	2.00	780.77	3.34
2.10	401.64	5.57	2.10	508.15	4.85	2.10	645.59	4.21	2.10	819.81	3.66
2.20	420.77	6.08	2.20	532.34	5.29	2.20	676.34	4.59	2.20	858.85	3.99
2.30	439.89	6.60	2.30	556.54	5.75	2.30	707.08	4.99	2.30	897.89	4.34
2.40	459.02	7.15	2.40	580.74	6.22	2.40	737.82	5.41	2.40	936.93	4.70
2.50	478.15	7.72	2.50	604.93	6.72	2.50	768.57	5.85	2.50	975.97	5.07
2.60	497.25	8.31	2.60	629.13	7.24	2.60	799.31	6.29	2.60	1015.00	5.46
2.70	516.40	8.92	2.70	653.33	7.77	2.70	830.05	6.75	2.70	1054.04	5.86
2.80	535.52	9.55	2.80	677.53	8.32	2.80	860.79	7.23	2.80	1093.08	6.28
2.90	554.65	10.21	2.90	701.72	8.88	2.90	891.54	7.72	2.90	1132.12	6.71
3.00	573.77	10.88	3.00	725.92	9.47	3.00	922.28	8.23	3.00	1171.16	7.15

Tablo 6.9 Colebrook-White Formülüne Bağlı Olarak, PE 100, PN10 Borulara Ait Basınç Kayıpları Tablosu $k=0.015$ mm.

D = 900 mm. s = 53.3 mm. Di = 793.4 mm.			D = 1000 mm. s = 593 mm. Di = 881.4 mm.			D = 1200 mm. s = 706 mm. Di = 1058.8 mm.		
Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m	Hız m/sn	Debi l/sn	J m/1000m
0.40	197.66	0.15	0.40	243.94	0.13	0.40	352.01	0.11
0.50	247.07	0.22	0.50	304.92	0.20	0.50	440.02	0.16
0.60	296.49	0.31	0.60	365.90	0.28	0.60	528.02	0.22
0.70	345.90	0.42	0.70	426.89	0.37	0.70	616.02	0.30
0.80	395.32	0.53	0.80	487.87	0.47	0.80	704.02	0.38
0.90	444.73	0.66	0.90	548.86	0.58	0.90	792.03	0.47
1.00	494.14	0.80	1.00	609.84	0.71	1.00	880.03	0.57
1.10	543.56	0.96	1.10	670.82	0.84	1.10	968.03	0.68
1.20	592.97	1.12	1.20	731.81	0.99	1.20	1056.04	0.80
1.30	642.39	1.30	1.30	792.79	1.15	1.30	1144.04	0.93
1.40	691.80	1.50	1.40	853.78	1.32	1.40	1232.04	1.07
1.50	741.22	1.70	1.50	914.76	1.50	1.50	1320.05	1.21
1.60	790.63	1.92	1.60	975.74	1.69	1.60	1408.05	1.37
1.70	840.05	2.15	1.70	1036.73	1.90	1.70	1496.05	1.53
1.80	889.46	2.39	1.80	1097.71	2.11	1.80	1584.05	1.70
1.90	938.87	2.64	1.90	1158.70	2.34	1.90	1672.06	1.88
2.00	988.29	2.91	2.00	1219.68	2.57	2.00	1760.06	2.07
2.10	1037.70	3.19	2.10	1280.66	2.82	2.10	1848.06	2.27
2.20	1087.12	3.48	2.20	1341.65	3.07	2.20	1936.07	2.48
2.30	1136.53	3.78	2.30	1402.63	3.34	2.30	2024.07	2.70
2.40	1185.95	4.09	2.40	1463.62	3.62	2.40	2112.07	2.92
2.50	1235.36	4.42	2.50	1524.60	3.91	2.50	2200.08	3.15
2.60	1284.78	4.76	2.60	1585.58	4.21	2.60	2288.08	3.40
2.70	1134.19	5.11	2.70	1646.57	4.52	2.70	2376.08	3.65
2.80	1383.60	5.47	2.80	1707.55	4.84	2.80	2464.08	3.90
2.90	1433.02	5.84	2.90	1768.54	5.17	2.90	2552.09	4.17
3.00	1482.43	6.23	3.00	1829.52	5.51	3.00	2640.09	4.45

6.6 Basınç Darbesi (Koç Darbesi)

Vana veya pompanın açılıp kapanması sırasında, hatta koç darbesi oluşabilir. Bunun için teorik olarak büyük p_s :

$$p_s = \frac{a \cdot \Delta v}{\rho}$$

a : Baskı dalgasının yayılma hızı (m/s)
v : Akışkanın akma hızı (m/s)
 ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m³)

Pratikte p_s değeri negatif veya pozitif olabilir:

Pozitif : Armatürlerin kapatılması ve pompanın açılması sırasında.

Negatif: Pompanın kapanması veya hidrolik özelliğın ani olarak değışmesi (Ör: akış hızının azalması).

Baskı dalgası yayılma hızı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_m}{\rho}}{1 + \frac{E_m}{E_r} \cdot \frac{d_m}{e}}}$$

E_m : Akışkanın elastisite modülü (Esu)
 ρ : Akışkanın yoğunluğu ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$)
 E_r : Malzemenin (borunun) elastisite modülü (N/m²)
 D_m : Boru orta çapı (m)
e : Boru et kalınlığı (m)



Bu formülde kısa süreli elastisite modülü kullanılmalıdır. ($E_r=800..1200 \text{ N/mm}^2$).

Kısa süreli basınç değışiklikleri ve koç darbesi etkisi HDPE borularda hasar oluşumuna neden olmaz. Ağıdaki örnek tabloda çeşitli emniyet faktörleri için 20°C ısıda kısa süreli koç darbesi ile oluşacak yeni basınç değerin, nominal basınca oranla ne kadar artabileceğini ifade eder. Bu değerler içerisinde oluşacak basınç artışları boruya zarar vermez.

Tablo 6.10 PE Borularda Emniyet Faktörü - Koç Darbesi İlişkisi

Toplam Çalışma Katsayısı C (Emniyet Faktörü)	Kısa Süreli Koç Darbesi Etkisi ile Basınç Artışının Nominal Basıncına Oranı
1.25	50 %
1.6	100 %

6.7 Genleşme (Isı Değişkenliği ile Boyca Uzama)

HDPE (PE- 80, PE- 100) boruların döşenmesi sırasında ısı değişkenliğine bağlı boyca uzama oranı dikkate alınmalıdır.

Isının yükselmesi durumunda boyda uzama, ısıda azalma sonucunda ise kısalma olacaktır.

PE borununun 1 m'sinde her "K" miktarı kadar ısı değişimi için (1K=1°C), 0,18 mm uzama veya kısalma olacaktır.

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (\Delta L = m \cdot K \cdot mm/m.K^{-1})$$

Tablo 6.11 Çeşitli Plastik Malzeme için Boyca Uzama Katsayıları

Madde	α Katsayı mm/m.K
HDPE	0.18
PP	0.15
PVDF	0.14
PB	0.12
PVC	0.07
GFK	0.02

Örneğin PE boru ile yapılmış bir hatta ısıya bağlı olarak boyda oluşabilecek uzama veya kısalma durumunda boru sabit noktasından değil, dönüş noktasından kayma yapacaktır. 12 m'lik bir boru için normal çalışma ısısı $T_v = 20^\circ C$, maksimum çalışma ısısı $T_1 = 65^\circ C$ ve minimum çalışma ısısı $T_2 = 10^\circ C$ olsun. Buna göre ısıya bağlı boy değişiklikleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

Isı yükselmesine bağlı uzama : $+\Delta L = L \cdot \Delta T_1 \cdot \alpha = 12 \cdot 45 \cdot 0,18 = 97,2$ mm

Isı düşmesine bağlı kısalma : $-\Delta L = L \cdot \Delta T_2 \cdot \alpha = 12 \cdot 10 \cdot 0,18 = 21,60$ mm

$$L_s = k \cdot \sqrt{d \cdot \Delta L}$$

L_s : Sabitleme Mesafesi (mm)

d : Boru dış çapı (mm)

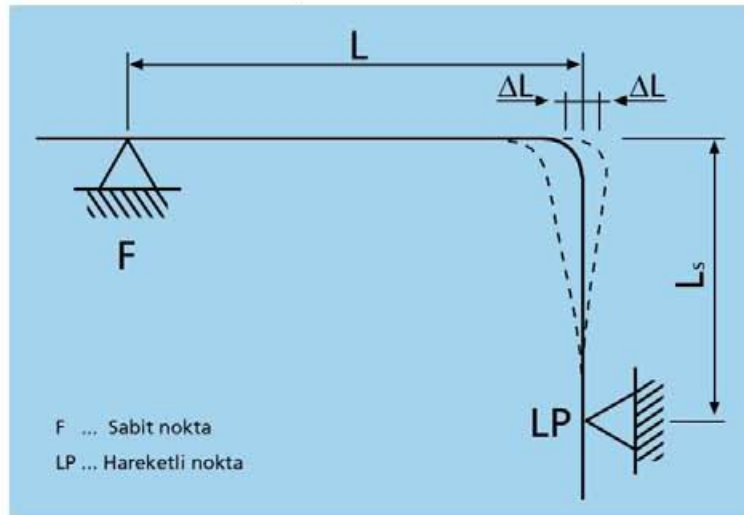
k : Faktör

(mm)

HDPE için 26, PP için 30, PVC için 33.5

Örnek $\varnothing 63$ mm çaplı bir PE boru için $\Delta L=97.2$ mm ise faktör 26'dır ve kelepçe mesafesi aşağıdaki gibidir.

$$a = 26 \cdot \sqrt{63 \cdot 97,2} = 2034,5 \text{ mm}$$



Şekil 6.1 Genleşme Noktaları

6.8 Esneklik

PE borular için maksimum bükme yarı çapı:

$$R = \frac{E \cdot D_m}{2 \cdot \sigma}$$

R : Bükme yarı çapı (mm)
 D_m : Ortalama boru çapı (mm)
 E : Boru elastisite modülü (N/mm²)
 σ : Gerilme (N/mm²)

Tablo 6.12 PE Boruların Çevre Gerilmesi

HDPE Sınıfı	Çevre Gerilmesi N/mm ²
PE 63	5
PE 80	6.3
PE 100	8

Kabul edilebilir küçük bükme yarı çapı için aşağıdaki tabloda verilmiş olan değerlerin altına inilmemelidir.

Tablo 6.13 PE Borular İçin Bükme Yarı Çapı

Boru Hammaddesi	Düşme Isısı	Kabul Edilebilir Küçük Bükme Yarı Çapı	
		SDR 17	SDR 11
PE 80 ve PE 100	20 °C	30 x da	20 x da
	10 °C	50 x da	35 x da
	0 °C	75 x da	50 x da

da : Boru dış çapı

İnce etli borular için bükme çapı hesaplanırken kırılma ihtimali kritik noktayı oluşturur. Kalın etli borularda ise bükme işlemi için çap hesaplanırken gerilme-büzülme sınırı kritik noktayı oluşturur.

İnce etli borularda kabul edilebilir bükme yarı çapı hesaplanırken (Kırılma dikkate alınarak) aşağıdaki formül kullanılır:

$$R_k = \frac{r_m^2}{0.28 \cdot s} \text{ [mm]}$$

r_m : Ortalama boru yarı çapı (mm)
 s : Et kalınlığı (mm)

Kalın etli borularda kabul edilebilir bükme yarı çapı hesaplanırken (gerilme-büzülme dikkate alınarak) aşağıdaki formül kullanılır:

$$R = \frac{r_a \cdot 100}{\epsilon} \text{ [mm]}$$

r_a : Boru dış yarı çapı (mm)
 ε : Gerilme-Büzülme (%)

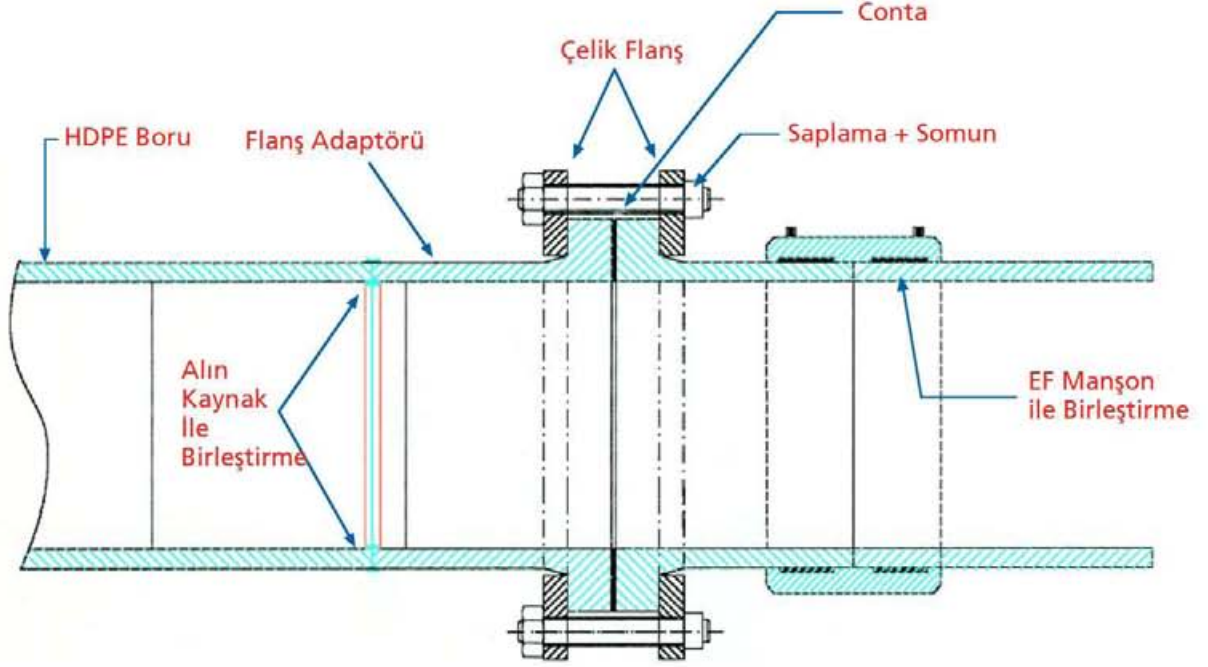
* Gerilme-Büzülme oranı %2,5' i geçmemelidir.

Tablo 6.14 PE Boruların SDR'ye Göre Bükülme Yarı Çapı

Boru Sırası	SDR	Kabul Edilebilir Bükme Yarı Çapı R d=Boru Dış Çapı
1	41	50 d
2	33	40 d
3	26	30 d
4	17.6	20 d
5	11	20 d
6	7.4	20 d

0°C altındaki çalışma ısılarında kabul edilebilir bükme yarı çapı için yukarıdaki tabloda belirtilmiş olan değerlere 2.5 eklenmelidir. 0°-20°C arasındaki çalışma ısılarında kabul edilebilir bükme yarı çapı, ara değer bulma (oran) yöntemi ile bulunur.

8.2 Flanşlı Birleştirme Yöntemi

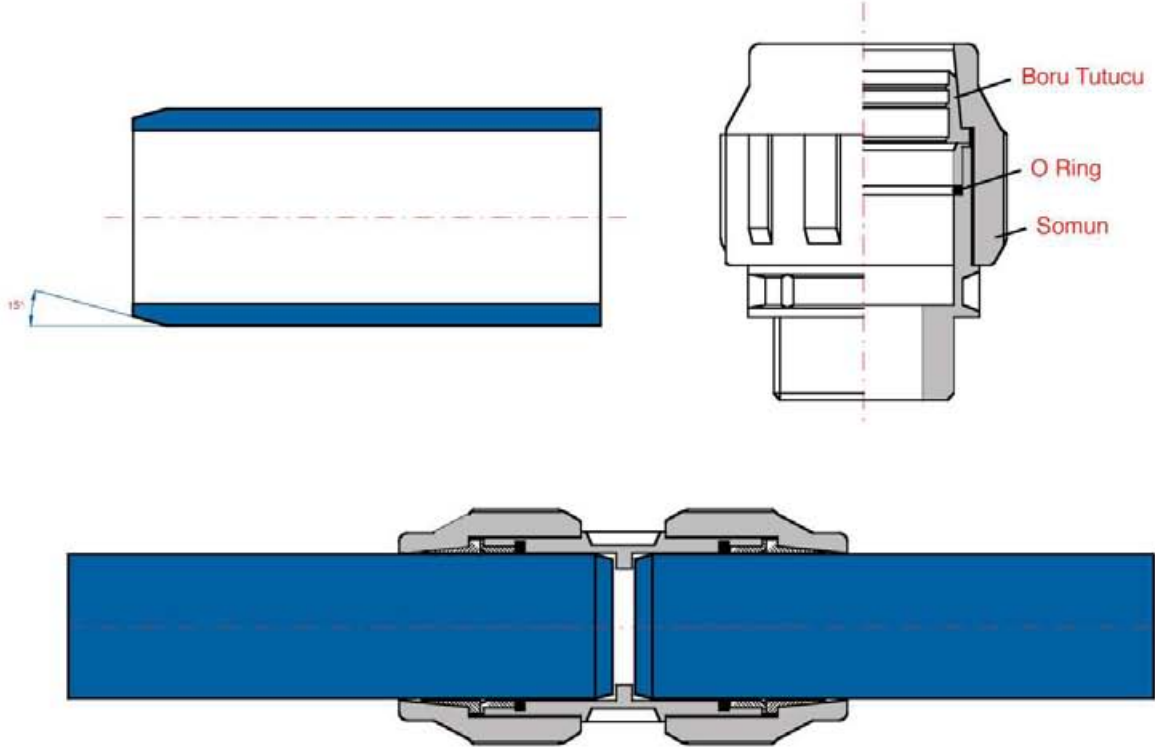


Şekil 8.7 Flanşlı Birleştirme Yöntemi

Flanşlı birleştirme yöntemi, PE boruların çelik boru, vana, pompa, kompensatör gibi ekipmanlarla birleştirilmesi gerektiğinde, veya boru hattının ileriki dönemlerde belli noktalarda demonte edilmesi gerektiği durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Flanş olarak adlandırılan çelik bir çember PE boru hattının üzerine geçirildikten sonra, boru hattının ucuna "flanş adaptörü" olarak adlandırılan ve uç kısmında çelik çemberi tutacak şekilde bir yakası bulunan PE parça, alın kaynağı ile kaynatılır. Flanş ile birleştirilecek olan iki boru hattı karşı karşıya getirilir ve iki yaka arasına conta yerleştirildikten sonra, civata ve somun ile flanşların bağlantısı yapılır. Dikkat edilmesi gereken husus, civataları dairesel sıra ile değil, karşılıklı sıra ile sıkmaktır. Civataları sıkarken, boru hatlarını çektirmemek, aşırı yüklenmeleri önlemek açısından önemli bir husustur.



8.3 Kaplin Adaptörlü Birleştirme Yöntemi



Şekil 8.8 Kaplin Adaptörlü Birleştirme Yöntemi



Kaplin adaptör ile birbirine bağlanacak olan borular, eksenlerine dik olarak kesildikten sonra, uçları yaklaşık 15°'lik bir açı ile konikleştirilir ve boru çevrilerek kaplinin iç kısmındaki çıkıntıya kadar itilir. Her iki boru da iyice yerleştirildikten sonra somunlar elle sıkılarak bağlantı tamamlanmış olur. Eğer boru çapı 40 mm veya üzerinde ise, somunun el ile değil de, özel anahtar ile sıkılması daha doğru olacaktır. Kaplin adaptörler 20 Atmosfer basınca dayanıklıdır, ancak çapı 110 mm'yi geçen boruların bağlantısı için tavsiye edilmemektedir.

