



TÜRKİYE TAŞKÖMÜRÜ KURUMU GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

APK DAİRE BAŞKANLIĞI

“Sürdürülebilir Bilgi Paylaşımı II”

HAVA PATLATMALI KAZI SİSTEMİNİN
MEKANİĞİ VE TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ

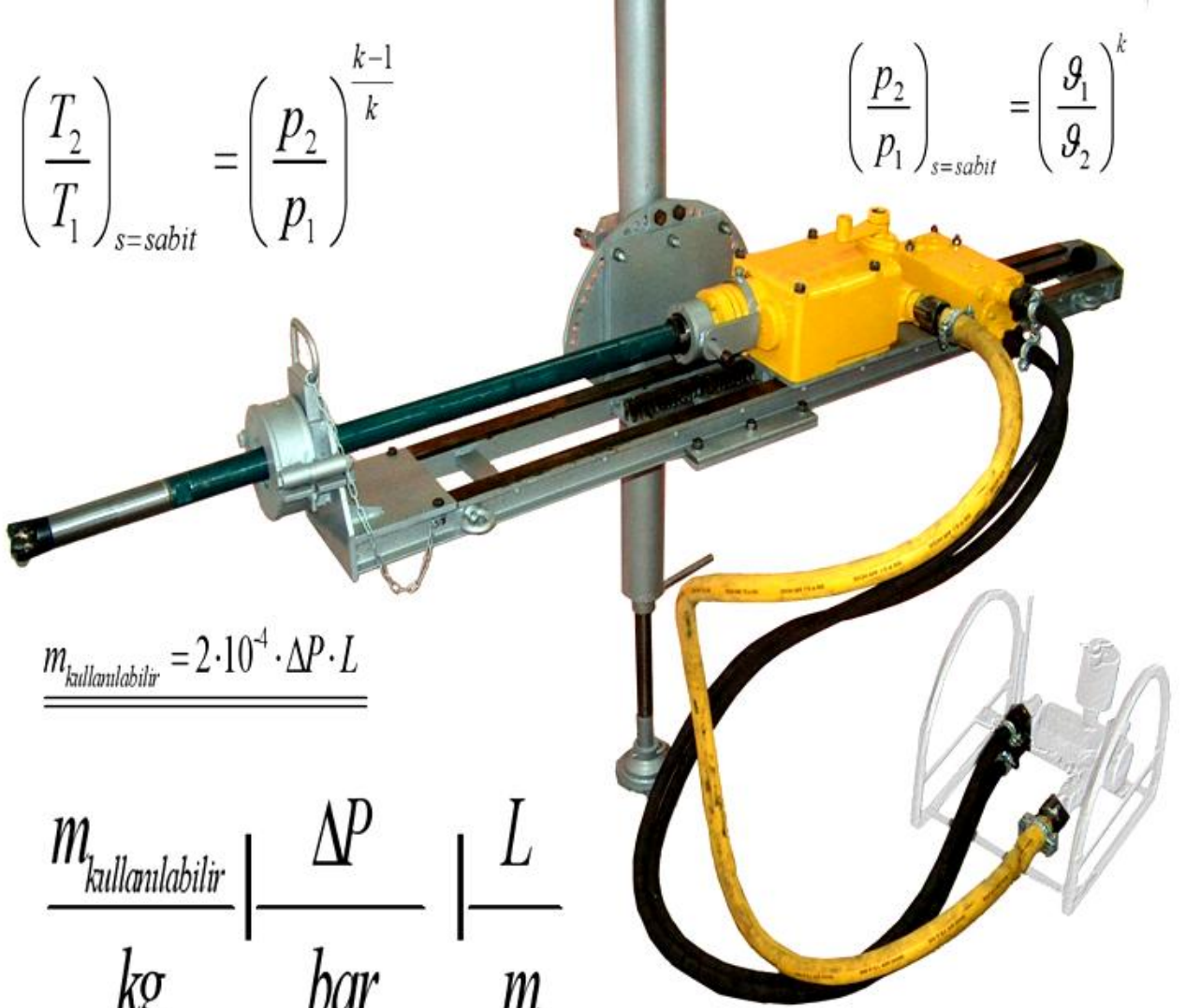
Tuncer ÖZKAN - Kadir ÇELİK

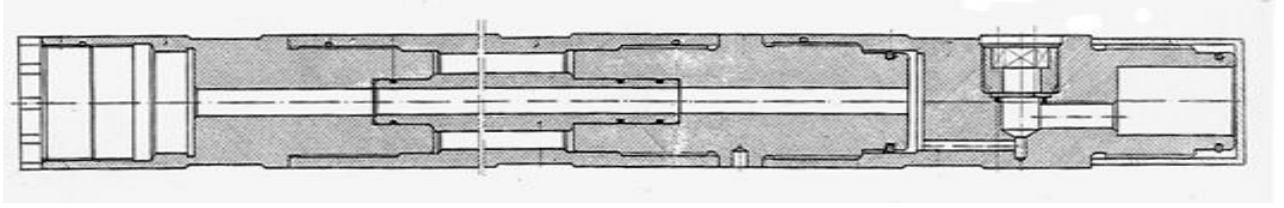
OCAK 2007

HAVA PATLAMALI KAZI SİSTEMİNİN MEKANİĞİ VE TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ

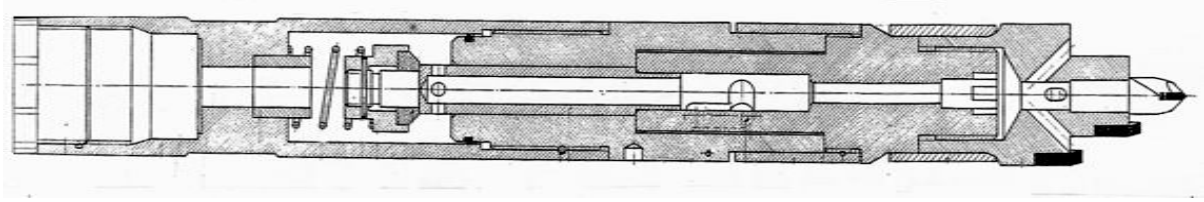
$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=\text{sabit}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{s=\text{sabit}} = \left(\frac{g_1}{g_2}\right)^k$$

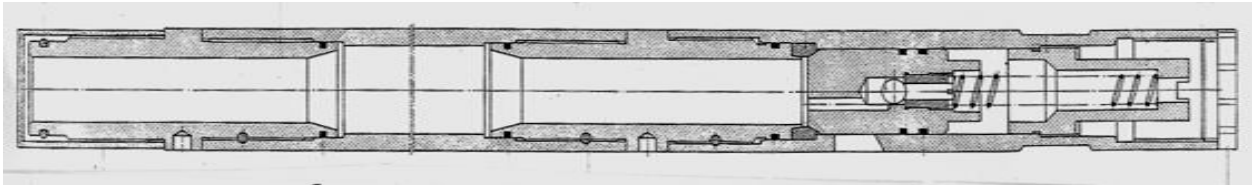




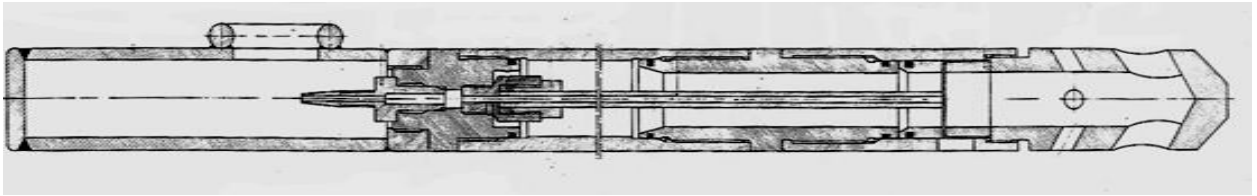
Başlatma Ünitesi



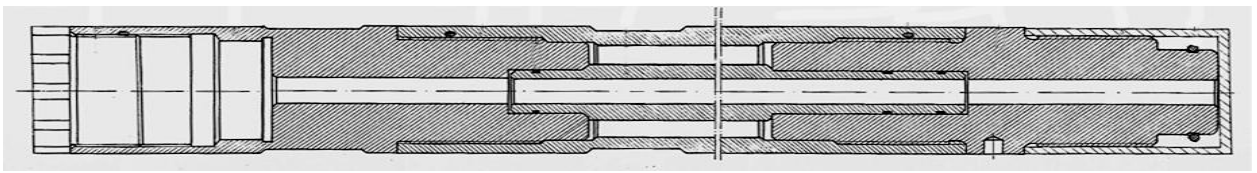
Delme Ünitesi



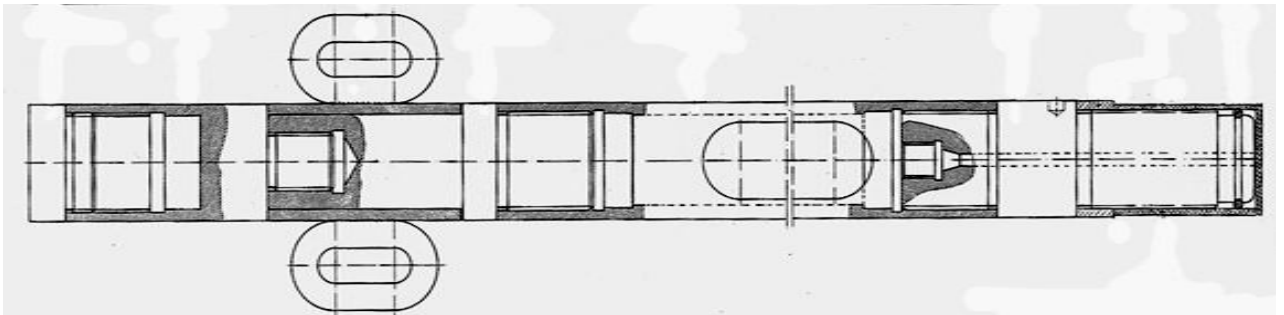
Kırma Ünitesi



Kısa Patlatma Ünitesi



Uzatma Ünitesi



Hortum Muhafaza Ünitesi

İÇİNDEKİLER

HAVA PATLAMALI KAZI SİSTEMİNİN MEKANİĞİ VE TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ	1
SİSTEMİN MEKANİK ÇÖZÜMLEMESİ	1
1. Patlatma hızı V_2;	1
a) Havanın, mükemmel gaz ve sabit yoğunlukta olması hali için ;	1
b) Havanın, mükemmel gaz ve sıkıştırılabilir olması hali için ;	4
c) Havanın, mükemmel gaz davranışından uzaklaşması (sapması) ve sıkıştırılabilir olması hali için;	7
a) Havayı mükemmel gaz kabul ederek, özgül hacim (7) numaralı mükemmel gaz hal denkleminde hesaplanabilir.	15
b) Sıkıştırılabilir diyagramından düzeltme çarpanı Z yi belirlemek için indirgenmiş basınç ve sıcaklığın hesaplanması gerekir :	15
2. Akışkan-etki kuvveti R_y ;	21
SİSTEMİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ	23
UYGULAMA 1:	32
UYGULAMA 2:	34
HAVA PATLATMALI KAZI SİSTEMİ, ŞEBEKE BORULARI ÜZERİNDE BİR İNCELEME	36
PATLAMA DİSKİ MUKAVEMET HESABI	48
NOT	51
LİTERATÜR	52

HAVA PATLAMALI KAZI SİSTEMİNİN MEKANİĞİ VE TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ

SİSTEMİN MEKANİK ÇÖZÜMLEMESİ

1. Patlatma hızı V_2 ;

Kırma ünitesi üzerinde bulunan patlatma penceresinden (Şekil 1), kayaçtaki delik içine (atmosfere) boşalan, çıkan veya fişkıran havanın V_2 patlatma hızı (Şekil 2) :

a) Havanın, mükemmel gaz ve sabit yoğunlukta olması hali için ;

Enerjinin korunumu denklemi diferansiyel biçimde,

$$-\delta\omega_r = g dP + dke + dpe \quad (1)$$

olarak yazılır ve sistemde iş etkileşiminin olmadığı düşünülürse (1) numaralı denklem ;

$$g dP + dke + dpe = 0 \quad (2)$$

veya;

$$\frac{dp}{\rho} + V \cdot dV + g \cdot dz = 0 \quad (3)$$

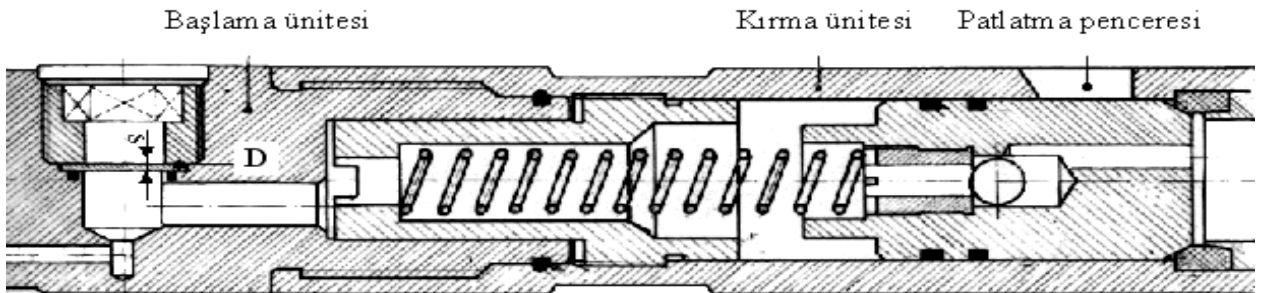
şeklini alır. (Yük kaybı ihmal edilmiştir.)

$$g - \text{Özgül hacim} \left(= \frac{1}{\rho} \right)$$

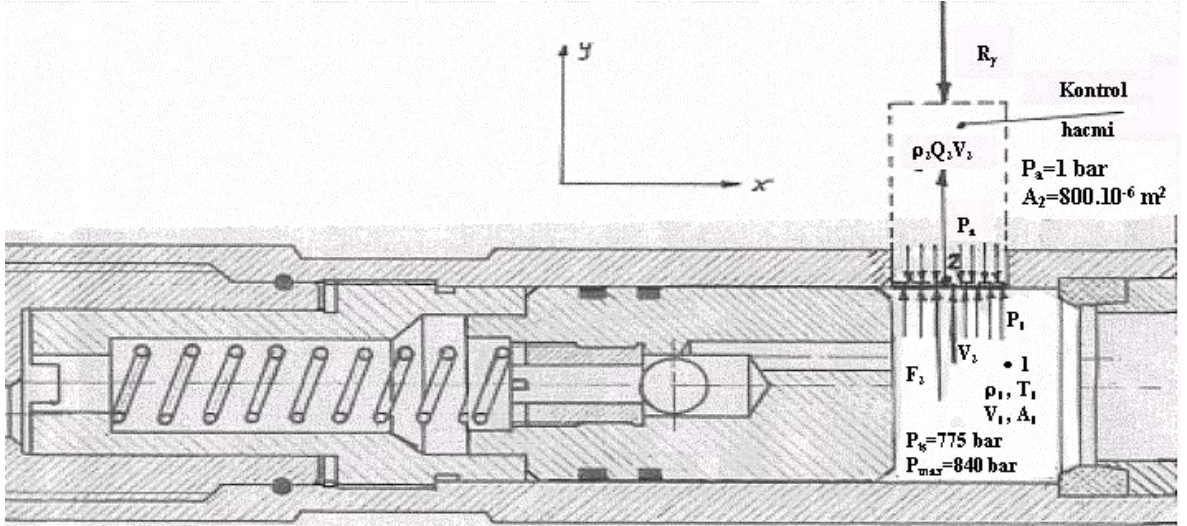
ρ - Yoğunluk

ke - Kinetik enerji (Birim kütle için)

pe - Potansiyel enerji (Birim kütle için)



Şekil - MAZ II/5-2 Sondaj makinasına ait başlatma ve kırma ünitelerinin kesiti.



Şekil Hava patlatmalı kazı sisteminin mekaniği

(3) numaralı denklemden integrasyonu yapabilmek için, ρ 'nin p 'nin fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini bilmek gerekir. "Sıkıştırılmaz bir akışkan" söz konusuysa özgül hacim \mathcal{V} dolayısıyla yoğunluk ρ hal değişimi sırasında sabit kalır ve integral dışına alınabilir. Bu durumda (3) numaralı denklem ;

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \int_1^2 \mathcal{V} \cdot dV + \int_1^2 g \cdot dz = 0$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot p_2 - p_1 + \frac{1}{2} \cdot V_2^2 - V_1^2 + g \cdot z_2 - z_1 = 0$$

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + z_1 \right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 \right) \quad (4)$$

şeklindedir.

Bu denklem akışkanlar mekaniğinde "Bernoulli denklemi" diye bilinir ve sürtünme veya şok dalgalarının etkili olmadığı sıkıştırılmaz akışkanlara uygulanabilir. Potansiyel enerji değişimi $\Delta pe \cong 0$ kabul edilirse, yukarıda verilen denklem daha sade yazılabilir :

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} \right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \right) \quad (5)$$

Şimdi (5) numaralı Bernoulli denklemini (1) ve (2) noktaları arasında uygulayalım,

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}$$

$$A_1 \gg A_2 \rightarrow V_1 = 0$$

$$p_2 = P_{atm} = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

ayrıca p_1 yanında p_2 basıncı ihmal edilebilir ve yukarıdaki denklemden V_2 hızı ;

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2}$$

$$\underline{\underline{V_2 \cong \sqrt{2 \cdot \frac{p_1}{\rho_1}}}}$$

(6)

şeklinde bulunur.

Hava, mükemmel (ideal) gaz olduğuna göre, mükemmel gaz hal denklemine

$$p \cdot \mathcal{G} = R \cdot T \quad \frac{p}{\text{kPa}} \left| \frac{\mathcal{G}}{\text{m}^3 / \text{kg}} \right| \frac{R}{\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}} \left| \frac{T}{\text{K}} \right|$$

$\text{kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}$

(7)

uyar. Burada ,

R – Gaz sabiti

Hava için ,

$$R = 0,287 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K}) = 287 \text{ Nm} / (\text{kgK})$$

dır.

Havanın 1 noktasındaki yoğunluğu,

$$p_1 \cdot \mathcal{G}_1 = R \cdot T_1$$

veya,

$$p_1 \cdot \frac{1}{\rho_1} = R \cdot T_1$$

eşitliği (6) numaralı denklemde yerine konursa, V_2 hızı için,

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot R \cdot T_1}$$

(8)

değeri elde edilir. Hesaplayalım ;

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (293 \text{ K}) \cdot \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ} / \text{kg}} \right)}$$

$$\underline{\underline{V_{2\text{mükemmel},840\text{bar}} \cong 410 \text{ m} / \text{s}}}$$

Not : $1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J} = 1000 \text{ Nm} = 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$

$$1 \text{ kJ} / \text{kg} = 1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

b) Havanın, mükemmel gaz ve sıkıştırılabilir olması hali için ;

Potansiyel enerji değişimini $\Delta p_e \cong 0$ kabul ederek (3) numaralı denklemin integralini alalım ,

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \int_1^2 V dV = 0$$

Burada $\rho = f(p)$ değişimini bilmeden $\int_1^2 \frac{dp}{\rho}$ integrasyonunu yapamayız.

Havanın 1 ve 2 halleri arasındaki hal değişimini, adyabatik (ısı geçişi yok) ve içten tersinir (sistem sınırları içinde tersinmezlik yoksa) yani içten tersinir adyabatik veya izantropik hal değişimi, izantropik genişleme varsayımıyla mükemmel gazların entropi değişimlerini ifade eden bağıntılar (özellikler sabit) ,

$$s_2 - s_1 = C_g \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{g_2}{g_1} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (9)$$

ve,

$$s_2 - s_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (10)$$

sıfıra eşitlenirse (izantropik hal değişiminde $s_2 = s_1$ dir.) ,

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = - \frac{R}{C_g} \cdot \ln \frac{g_2}{g_1}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^{R/C_g}$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{s=\text{sabit}} = \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^{k-1} \quad (11)$$

bulunur, çünkü $R = C_p - C_g$ ve $k = C_p / C_g$ olduğundan $R / C_g = k - 1$ olur.

C_p - Sabit basınçta özgül ısı , $kJ/(kg \cdot K)$

C_v - Sabit hacimde özgül ısı , $kJ/(kg \cdot K)$

k - Adyabatik üs (Hava için $k = 1,4$)

(11) numaralı denklem, özgül ısılar sabit kabul edildiği zaman mükemmel gazlar için elde edilebilecek 1. izantropik bağıntıdır. 2. izantropik bağıntı (10) numaralı denklemden benzer bir yolla elde edilir ve sonuç aşağıda verilmiştir :

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=sabit} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (12)$$

3. izantropik bağıntı, (12) numaralı denklemi (11) numaralı denklemde koyup sadeleştirerek bulunur :

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{s=sabit} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^k \quad (13)$$

Bu denklemler, daha sade bir biçimde, aşağıda gösterildiği gibi de yazılabilir :

$$T \cdot \rho^{k-1} = sabit \quad (14)$$

$$T \cdot p^{\left(\frac{1-k}{k}\right)} = sabit \quad (15)$$

$$p \cdot \rho^k = sabit \quad (16)$$

Özgül ısıların oranı k , genelde sıcaklıkla değişir, bu nedenle bağıntılarda kullanılan k değeri, hal değişiminin gerçekleştiği sıcaklık aralığındaki ortalama k değeri olmalıdır.

$$\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + \int_1^2 V dV = 0$$

Denklemini yeniden ele alalım.

$$p \cdot \rho^k = p \cdot \frac{1}{\rho^k} = sabit \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = \frac{p}{\rho^k}$$

veya

$$\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^k = \frac{p}{p_1} \rightarrow \frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\rho = \rho_1 \cdot \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

bulunur. dp/ρ terimini ayrı integrale ederek,

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho_1 \cdot P/P_1^{1/k}} = \frac{P_1^{1/k}}{\rho_1} \cdot \int_1^2 \frac{dp}{P^{1/k}} = \frac{P_1^{1/k}}{\rho_1} \cdot \int_1^2 P^{-\frac{1}{k}} \cdot dp$$

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{P_1^{1/k}}{\rho_1} \cdot \frac{P^{\left(\frac{-1}{k}+1\right)}}{\left(\frac{-1}{k}+1\right)} \Bigg|_1^2 = \frac{P_1^{1/k}}{\rho_1} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(P_2^{\frac{k-1}{k}} - P_1^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{P_1^{1/k}}{\rho_1} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot P_1^{\frac{k-1}{k}} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

elde edilir. Böylece Bernoulli denklemi ,

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = 0$$

$V_1 = 0$ şartı ile

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{V_2^2}{2} \quad (17)$$

şeklini alır. Mükemmel gaz hal denklemini kullanırsak

$$\left(\frac{k}{k-1} \right) \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{V_2^2}{2} \quad (18)$$

bulunur. Hesaplayalım ,

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{1,4}{0,4} \cdot 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (293 \text{ K}) \cdot \left[1 - \left(\frac{1 \text{ bar}}{840 \text{ bar}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] \cdot \left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ}/\text{kg}} \right)$$

$$\underline{\underline{V_{2_{\text{mükemmel}, 840 \text{ bar}}} = 709 \text{ m/s}}}$$

ve

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{1,4}{0,4} \cdot 0,287 \cdot 293 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{775} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right] \cdot 1000$$

$$\underline{\underline{V_{2_{\text{mükemmel}, 775 \text{ bar}}} = 707 \text{ m/s}}}$$

bulunur.

c) Havanın, mükemmel gaz davranışından uzaklaşması (sapması) ve sıkıştırılabilir olması hali için;

Mükemmel gaz denklemi basit ve kullanışlıdır. Fakat gazlar kritik nokta ve doyma eğrisi yakınlarında mükemmel gaz davranışından önemli ölçüde uzaklaşırlar. Verilen bir sıcaklık ve basınçta mükemmel gaz davranışından sapma “sıkıştırılabilirlik çarpanı” Z adı verilen bir parametre kullanılarak giderilebilir. Bu çarpan ,

$$Z = \frac{p \cdot \mathcal{G}}{R \cdot T} \quad (19)$$

$$p \cdot \mathcal{G} = Z \cdot R \cdot T \quad (20)$$

veya

$$Z = \frac{\mathcal{G}_{\text{gerçek}}}{\mathcal{G}_{\text{mükemmel}}} \quad (21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ,

$$\mathcal{G}_{\text{mükemmel}} = R \cdot T / p$$

olmaktadır. Doğal olarak mükemmel gazlar için $Z=1$ dir. Gerçek gazlar için Z, 1’den büyük veya küçük olabilir. Z, 1 değerinden ne kadar uzaklaşırsa mükemmel gaz davranışından sapma da o kadar büyük olur.

Mükemmel gaz aslında $p \cdot \mathcal{G} = R \cdot T$ denklemini sağlayan “sanal” bir maddedir. Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu azalır ve mükemmel gaz gibi davranır. Düşük basınç ve

yüksek sıcaklıkta belirtilmek istenen sınırlar nedir ? Bir maddenin sıcaklığına veya basıncına yüksek veya düşük diyebilmek için kritik sıcaklığını ve basıncını göz önüne almak gerekir. Değişik gazlar verilen bir basınç veya sıcaklıkta birbirinden farklı davranabilirler, fakat kritik sıcaklık ve basınçlarına göre indirgenmiş sıcaklık ve basınçlarda, davranışları birbirine benzer. “İndirgenmiş sıcaklık” T_R ve “İndirgenmiş basınç” p_R aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$p_R = \frac{p}{p_{kr}} \quad ve \quad T_R = \frac{T}{T_{kr}} \quad (22)$$

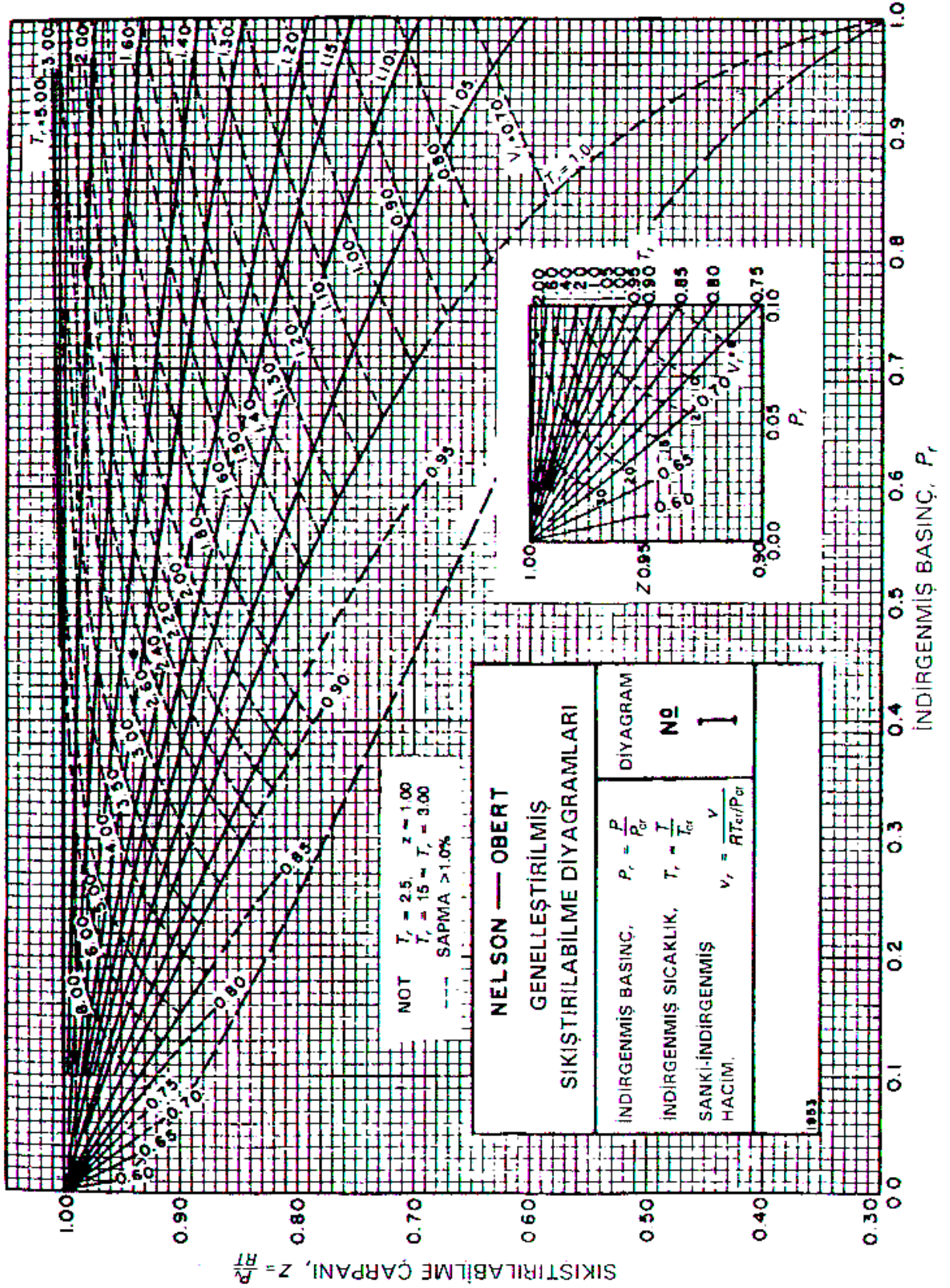
p_{kr} - Kritik basınç , kPa
 T_{kr} - Kritik sıcaklık, K } (Tablo1)

Sıkıştırılabilirlik çarpanı Z, aynı indirgenmiş sıcaklık ve basınçta tüm gazlar için yaklaşık olarak aynı değere sahiptir. Ölçüm sonuçları ve bunlara dayanarak derlenmiş bilgiler bir araya toplanarak tüm gazlar için geçerli olan “Genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik diyagramı” elde edilmiştir. Bu diyagramlar, daha hassas okuma yapabilmek için her biri farklı indirgenmiş basınç aralıklarını kapsayan üç bölüm halinde verilmiştir (Şekil;3,4,5). Sıkıştırılabilirlik diyagramını kullanabilmek için kritik – nokta değerlerinin bilinmesine gerek vardır. Bu diyagramdan elde edilen sonuçlar en çok yüzde 1-2 oranında hatalıdır.

Genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik diyagramından aşağıdaki gözlemler yapılabilir :

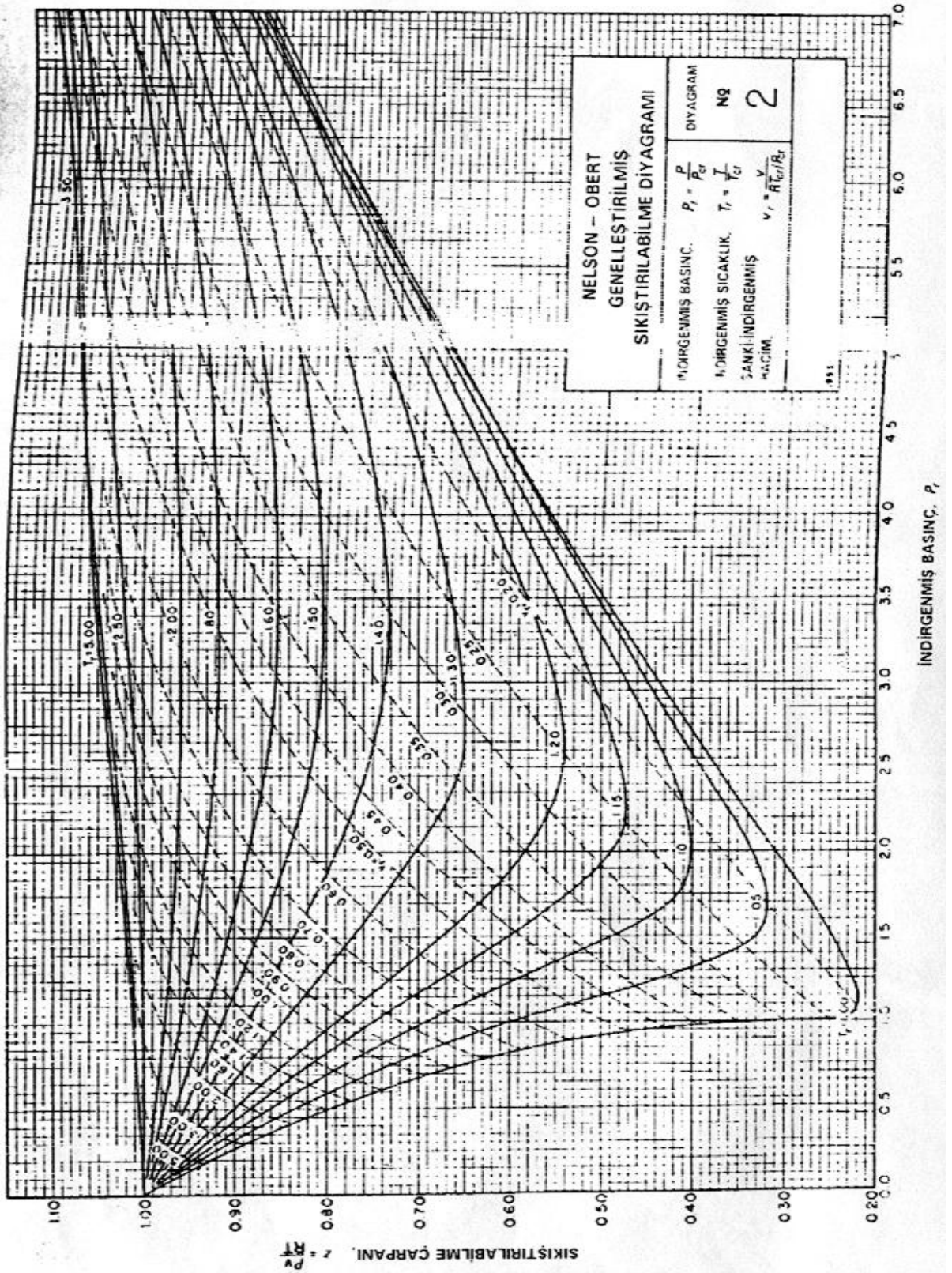
- ✓ Çok düşük basınçlarda ($p_R \ll 1$) gazlar sıcaklık ne olursa olsun mükemmel gaz gibi davranırlar.
- ✓ Yüksek sıcaklıklarda ($T_R > 2$), basınç çok yüksek ($p_R \gg 1$) olmadığı sürece gazlar mükemmel gaz gibi davranırlar
- ✓ Mükemmel gaz davranışından uzaklaşma en çok kritik nokta yakınlarında olur

(a) $0 < P_r < 1,0$

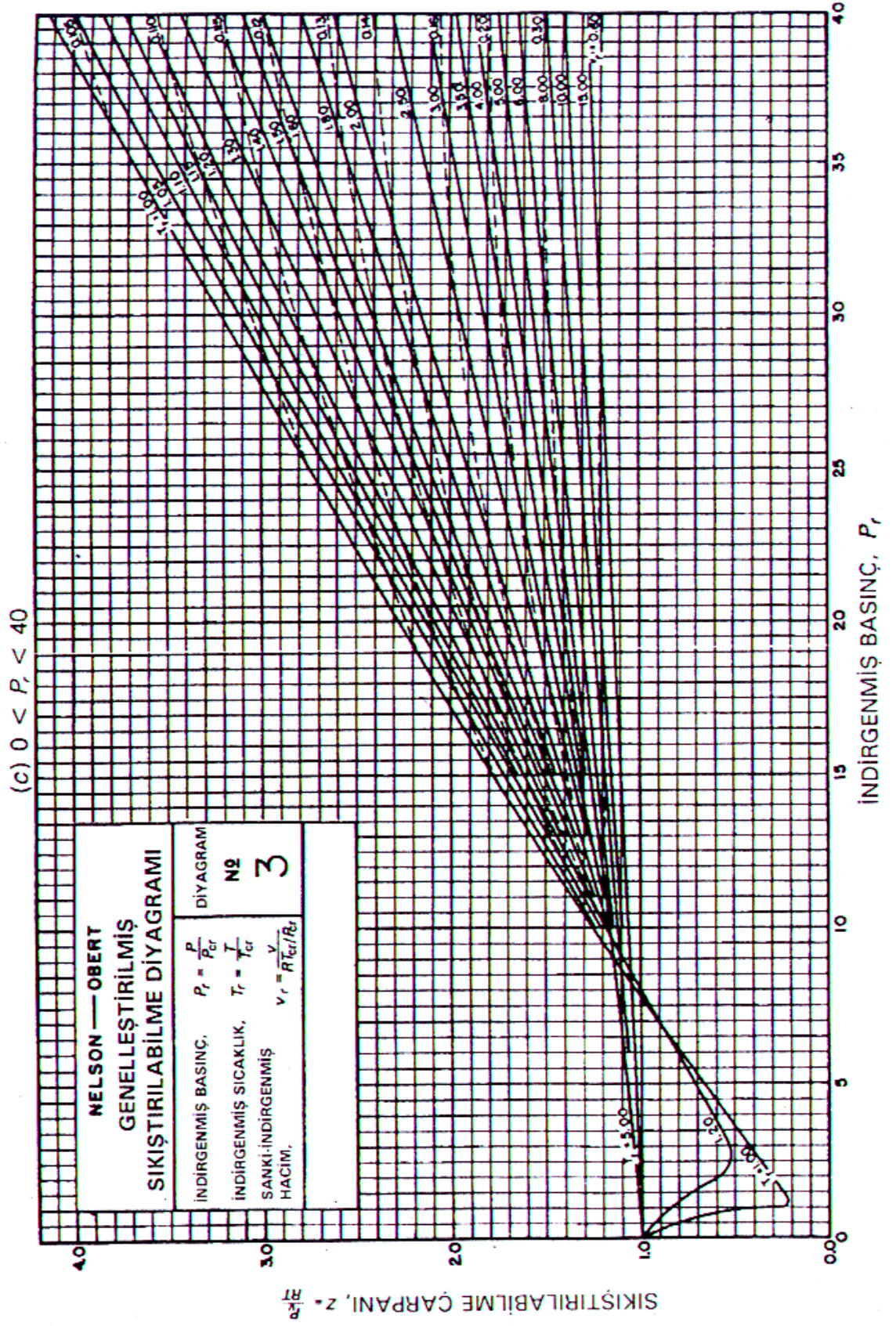


Şekil - Nelson-Obert'in düşük basınçlar için genelleştirilmiş sıkıştırılabilme diyagramı (Winsconsin Üniversitesinden Dr. Edward E. Obert'in izniyle kullanılmıştır),

(b) $0 < P_r < 7$



Şekil Nelson-Obert'in orta basınçlar için genelleştirilmiş sıkıştırılabilme diyagramı (Winsconsin Üniversitesinden Dr. Edward E.Obert'in izniyle kullanılmıştır).



Şekil – Nelson-Obert’in yüksek basınçlar için genelleştirilmiş sıkıştırılabilme diyagramı (Winsconsin üniversitesinden Dr.Edward E. Obert’in izniyle kullanılmıştır).

Diğer hal denklemleri ;

Mükemmel gaz hal denklemi basit olmakla birlikte kullanım alanı sınırlıdır. Bir maddenin P - 9 - T davranışı daha karmaşık fakat hassas hal denklemleriyle ifade edilebilir. Bu denklemlerden en çok bilinen üçü şunlardır :

TABLO 1 – Mol kütlesi, gaz sabiti ve kritik nokta özellikleri

Madde	Kimyasal formülü	Mol kütlesi kg/kmol	R kJ/(kg · K)*	Sıcaklık K	Basınç MPa	Hacim m ³ /kmol
Amonyak	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Bromür	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
Karbon dioksit	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Karbon monoksit	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Klor	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Deuteryum	D ₂	4.00	2.0785	38.4	1.66	—
Helyum	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
Hidrojen	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Kripton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Azot	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Azot oksit	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oksijen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Kükürt dioksit	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Su	H ₂ O	18.015	0.4615	647.3	22.09	0.0568
Zenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186
Benzen	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
n-Bütan	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Karbon tetraklorür	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Kloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Diklordiflormetan (SA-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diklorflormetan	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Etan	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.88	0.1480
Etil alkol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Etilen	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
n-Heksan	C ₆ H ₁₄	86.178	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Metan	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Metil alkol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Metil klorür	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Propan	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propen	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Propin	C ₃ H ₄	40.065	0.2075	401	5.35	—
Triklorflormetan	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Hava	—	28.97	0.2870	—	—	—

* kJ/(kg · K) birimi kPa · m³/(kg · K) birimiyle eşdeğerdir. Gaz sabiti $R = R_u/M$ bağıntısından hesaplanmış olup $R_u = 8.314$ kJ/(kmol · K) ve M , mol kütlesidir. R_u - *Universal gaz sabiti*.

Kaynak: Gordon J. Van Wylene ve Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, İngilizce/SI 3. düzenleme, Wiley, New York, 1986, s. 685, Tablo A.6SI. İlk yayımlandığı kaynak: K. A. Kobe ve R. E. Lynn Jr., *Chemical Review*, cilt 52, s. 117-236, 1953.

▪ **Van der Waals hal denklemi :**

İki sabiti olan Van der Waals denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\left(p + \frac{a}{g^2} \right) \cdot g - b = R \cdot T \quad (23)$$

Burada,

$$a = \frac{27 \cdot R^2 \cdot T_{kr}^2}{64 \cdot p_{kr}} \text{ ve } b = \frac{R \cdot T_{kr}}{8 \cdot p_{kr}} \quad (24)$$

olmaktadır. Kritik – nokta bilgileri Tablo 1 den elde edilebilir.

▪ **Beattie – Bridgeman hal denklemi :**

Deneysel olarak saptanan beş sabite dayalı bir denklemdir :

$$p = \frac{R_u \cdot T}{g^2} \cdot \left(1 - \frac{c}{g \cdot T^3} \right) \cdot \bar{g} + B - \frac{A}{g^2} \quad (25)$$

Burada ,

$$A = A_0 \cdot \left(1 - \frac{a}{g} \right) \text{ ve } B = B_0 \cdot \left(1 - \frac{b}{g} \right) \quad (26)$$

olmaktadır. Yukarıdaki denklemde yer alan sabitlerin değişik maddeler için değerleri Tablo 2a de verilmiştir. Beattie-Bridgeman denklemi $0,8 \cdot \rho_{kr}$ ' ye kadar olan yoğunluklar için oldukça hassas sonuçlar verir. ρ_{kr} maddenin kritik noktadaki yoğunluğudur.

▪ **Benedict – Webb – Rubin hal denklemi :**

Benedict, Webb ve Rubin, Beattie – Bridgeman denklemini sabit sayısını sekize çıkararak geliştirdiler. Bu denklem aşağıda verilmiştir :

$$p = \frac{R_u \cdot T}{g} + \left(B_0 \cdot R_u \cdot T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{g^2} + \frac{b \cdot R_u \cdot T - a}{g^3} + \frac{a \cdot \alpha}{g^6} + \frac{c}{g^3 \cdot T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{g^2} \right) \cdot e^{-\gamma/g^2} \quad (27)$$

Bu denklemde yer alan sabitlerin değerleri Tablo 2b de verilmiştir. Bu denklem yoğunluğu $2,5 \cdot \rho_{kr}$ 'ye kadar olan maddelere uygulanabilir.

Tablo 2 – Beattie-Bridgeman ve Benedict-Webb-Rubin hal denklemlerinde yer alan sabitler

(a) Beattie-Bridgeman hal denklemi şöyledir:

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \quad \text{burada} \quad A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) \quad \text{ve} \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}} \right)$$

P , kPa; \bar{v} , m³/kmol; T , K ve $R_u = 8.314$ kPa · m³/(kmol · K) olarak verildiği zaman, Beattie-Bridgeman denklemindeki beş sabit aşağıda belirtildiği gibidir:

Gaz	A_0	a	B_0	b	c
Hava	131.8441	0.019 31	0.046 11	-0.001 101	4.34×10^4
Argon, Ar	130.7802	0.023 28	0.039 31	0.0	5.99×10^4
Karbon dioksit, CO ₂	507.2836	0.071 32	0.104 76	0.072 35	6.60×10^5
Helyum, He	2.1886	0.059 84	0.014 00	0.0	40
Hidrojen, H ₂	20.0117	-0.005 06	0.020 96	-0.043 59	504
Azot, N ₂	136.2315	0.026 17	0.050 46	-0.006 91	4.20×10^4
Oksijen, O ₂	151.0857	0.025 62	0.046 24	0.004 208	4.80×10^4

Kaynak: Gordon J. Van Wylen ve Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, İngilizce/SI 3. düzenleme, Wiley, New York, 1986, s. 46, Tablo 3.3.

(b) Benedict-Webb-Rubin hal denklemi şöyledir:

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b R_u T - a}{\bar{v}^3} + \frac{a \alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right) e^{-\gamma/\bar{v}^2}$$

P , kPa; \bar{v} , m³/kmol; T , K ve $R_u = 8.314$ kPa · m³/(kmol · K) olarak verildiği zaman, Benedict-Webb-Rubin denklemindeki sekiz sabit aşağıda belirtildiği gibidir:

Gaz	a	A_0	b	B_0	c	C_0	α	γ
<i>n</i> -Bütan, C ₄ H ₁₀	190.68	1021.6	0.039 998	0.124 36	3.205×10^7	1.006×10^8	1.101×10^{-3}	0.0340
Karbon dioksit, CO ₂	13.86	277.30	0.007 210	0.049 91	1.511×10^6	1.404×10^7	8.470×10^{-5}	0.00539
Karbon monoksit, CO	3.71	135.87	0.002 632	0.054 54	1.054×10^5	8.673×10^5	1.350×10^{-4}	0.0060
Metan, CH ₄	5.00	187.91	0.003 380	0.042 60	2.578×10^5	2.286×10^6	1.244×10^{-4}	0.0060
Azot, N ₂	2.54	106.73	0.002 328	0.040 74	7.379×10^4	8.164×10^5	1.272×10^{-4}	0.0053

Kaynak: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4. düzenleme, McGraw-Hill, New York, 1983, s. 815, Tablo A-21M. İlk olarak H. W. Cooper ve J. C. Goldfrank, *Hydrocarbon Processing*, cilt 46, s. 141, 1967'de yer almıştır.

Şimdi, 84 MPa (=840 bar) basınç ve 20°C sıcaklıktaki havanın özgül hacmini dolayısıyla yoğunluğunu ;

a) Mükemmel gaz hal denklemini ;

b) Genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik diyagramını kullanarak hesaplayalım.

Havanın ana bileşeni azotun, kritik sıcaklığı ve kritik basıncı Tablo 1 den elde edilir.

$$R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T_{kr} = 126,2 \text{ K}$$

$$P_{kr} = 3,39 \text{ MPa} = 3390 \text{ kPa}$$

a) Havayı mükemmel gaz kabul ederek, özgül hacim (7) numaralı mükemmel gaz hal denkleminde hesaplanabilir.

$$g_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{[0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})] \cdot (293 \text{ K})}{84000 \text{ kPa}}$$

$$\underline{\underline{g_1 \cong 0,001 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

Yoğunluk ise ,

$$\rho_1 = \frac{1}{g_1} \cong \frac{1}{0,001}$$

$$\underline{\underline{\rho_{\text{mükemmel},840\text{bar}} \cong 1000 \text{ kg} / \text{m}^3}}$$

bulunur.

b) Sıkıştırılabilirlik diyagramından düzeltme çarpanı Z yi belirlemek için indirgenmiş basınç ve sıcaklığın hesaplanması gerekir :

$$p_R = \frac{p}{p_{kr}} \quad , \quad T_R = \frac{T}{T_{kr}} \quad (\text{Eşitlik 22})$$

$$\underline{\underline{p_R = \frac{84 \text{ MPa}}{3,39 \text{ MPa}} \cong 24,8}}$$

$$\underline{\underline{T_R = \frac{293 \text{ K}}{126,2 \text{ K}} \cong 2,32}}$$

Bu değerlerle Şekil 5 den,

$$\underline{\underline{Z_{84\text{MPa},293\text{K}} = 1,8}}$$

bulunur. Böylece ,

$$g_{\text{gerçek}} = Z \cdot g_{\text{mükemmel}} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

$$\underline{\underline{g_{\text{gerçek}} = 1,8 \cdot 0,001 = 0,0018 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

$$\underline{\underline{\rho_{1,gerçek,840bar} = \frac{1}{0,0018} = 555,6 \text{ kg} / \text{m}^3}}$$

olur.

Havayı mükemmel gaz kabul ederek hesaplanan özgül hacimdeki hata,

$$\rho_{gerçek} - \rho_{mükemmel} / \rho_{gerçek} = \frac{0,0018 - 0,001}{0,0018} \cong 0,45$$

veya %45 dir.

Yoğunluktaki hata,

$$\rho_{mükemmel} - \rho_{gerçek} / \rho_{mükemmel} = \frac{1000 - 555,6}{1000} \cong 0,45$$

yani %45 olarak bulunur.

Diğer hal denklemlerini kullanalım :

▪ **Van der Waals hal denklemi ;**

$$\left(p + \frac{a}{\rho^2} \right) \cdot \rho - b = R \cdot T \quad (\text{Eşitlik 23})$$

$$a = \frac{27 \cdot R^2 \cdot T_{kr}^2}{64 \cdot p_{kr}} \quad , \quad b = \frac{R \cdot T_{kr}}{8 \cdot p_{kr}} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$a = \frac{27 \cdot [0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})]^2 \cdot (126,2 \text{ K})^2}{64 \cdot (3390 \text{ kPa})}$$

$$\underline{\underline{a = 0,163 \text{ m}^6 \text{ kPa} / \text{kg}^2}}$$

$$b = \frac{[0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})] \cdot (126,2 \text{ K})}{8 \cdot (3390 \text{ kPa})}$$

$$\underline{\underline{b = 0,00135 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

$$\left(84000 + \frac{0,163}{\rho^2} \right) \cdot \rho - 0,00135 = 0,287 \cdot 293$$

$$84000 \cdot \rho^2 + 0,163 \cdot \rho - 0,00135 = 84,091 \cdot \rho^2$$

$$84000 \cdot \rho^3 - 113,4 \cdot \rho^2 + 0,163 \cdot \rho - 0,00022 = 84,091 \cdot \rho^2$$

$$8400 \cdot \rho^3 - 197,491 \cdot \rho^2 + 0,163 \cdot \rho - 0,00022 = 0$$

$$\rho^3 - 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \rho^2 + 1,94 \cdot 10^{-6} \cdot \rho - 2,62 \cdot 10^{-9} = 0$$

HEWLETT PACKARD HP49G kompütürde denklem çözülrse,

$$x = 2,03010247616 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{\mathcal{G}_{gerçek} \cong 0,002 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

$$\underline{\underline{\rho_{1 \text{ gerçek,840bar}} = \frac{1}{0,002} = 500 \text{ kg} / \text{m}^3}}}$$

bulunur.

- **Beattie – Bridgeman hal denklemi ;**

$$p = \frac{R_u \cdot T}{\bar{g}^2} \cdot \left(1 - \frac{c}{\bar{g} \cdot T^3}\right) \cdot \bar{g} + B - \frac{A}{\bar{g}^2} \quad (\text{Eşitlik 25})$$

$$A = A_0 \cdot \left(1 - \frac{a}{\bar{g}}\right) \quad , \quad B = B_0 \cdot \left(1 - \frac{b}{\bar{g}}\right) \quad (\text{Eşitlik 26})$$

Hava için Beattie – Bridgeman hal denkleminin sabitleri Tablo 2a dan bulunur :

$$A_0 = 131,8441$$

$$a = 0,01931$$

$$B_0 = 0,04611$$

$$b = -0,001101$$

$$c = 4,34 \cdot 10^4$$

$$A = 131,8441 \cdot \left(1 - \frac{0,01931}{\bar{g}}\right) = \frac{131,841 \cdot \bar{g} - 2,546}{\bar{g}}$$

$$B = 0,04611 \cdot \left(1 + \frac{0,001101}{\bar{g}}\right) = \frac{0,04611 \cdot \bar{g} + 0,000050767}{\bar{g}}$$

$$84000 \text{ kPa} = \frac{[8,314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})] \cdot 293 \text{ K}}{\bar{g}^2} \cdot \left[1 - \frac{4,34 \cdot 10^4}{\bar{g} \cdot (293 \text{ K})^3}\right] \cdot \left[\bar{g} + \frac{0,04611 \cdot \bar{g} + 0,000050767}{\bar{g}}\right] - \left(\frac{131,8441 \bar{g} - 2,546}{\bar{g}}\right) / \bar{g}^2$$

$$84000 = \frac{2436,002}{\bar{g}^2} \cdot \left(\frac{25153757 \cdot \bar{g} - 4,34 \cdot 10^4}{25153757 \cdot \bar{g}} \right) \cdot \left(\frac{\bar{g}^2 + 0,04611 \cdot \bar{g} + 0,000050767}{\bar{g}} \right) - \left(\frac{131,8441 \cdot \bar{g} - 2,546}{\bar{g}^3} \right)$$

$$84000 = \frac{9,6845 \cdot 10^{-5}}{\bar{g}^4} \cdot [25153757 \cdot \bar{g}^3 + 1116439,73527 \cdot \bar{g}^2 - 724,19322 \cdot \bar{g} - 2,2032878] - \left(\frac{131,8441 \cdot \bar{g} - 2,546}{\bar{g}^3} \right)$$

$$84000 \cdot \bar{g}^4 = 2436,0156 \cdot \bar{g}^3 + 108,1216 \cdot \bar{g}^2 - 7 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{g} - 2,1338 \cdot 10^{-4} - 1318441 \cdot \bar{g}^2 + 2,546 \cdot \bar{g}$$

$$84000 \cdot \bar{g}^4 - 2436,0156 \cdot \bar{g}^3 + 23,7225 \cdot \bar{g}^2 - 2,476 \cdot \bar{g} + 2,13378 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$\bar{g}^4 - 2,9 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{g}^3 + 2,824 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{g}^2 - 2,9476 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{g} + 2,54 \cdot 10^{-9} = 0$$

HEWLETT PACKARD 48SX ile denklem çözümlerse ;

$$\underline{\underline{\bar{g}_1 \cong 8,624 \cdot 10^{-5}}}$$

$$\underline{\underline{\bar{g}_2 = 0,040186}}$$

Ayrıca ,

$$\bar{g} = M \cdot g \quad \frac{\bar{g}}{m^3/kmol} \quad \left| \quad \frac{M}{kg/kmol} \quad \right| \quad \frac{g}{m^3/kg} \quad (28)$$

M – Mol kütlesi (Moleküler ağırlık)

Hava için ,

$$M = 28,97 \text{ kg / kmol} \quad (\text{Tablo 1})$$

$$g_{gerçek} = \frac{\bar{g}}{M} = \frac{0,040186}{28,97}$$

$$\underline{\underline{g_{gerçek} = 1,38716 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

$$\underline{\underline{\rho_{1,gerçek,840bar} = 720 \text{ kg / m}^3}}$$

▪ **Benedict – Webb – Rubin hal denklemi ;**

Denklemin sabitleri Tablo 2b den havanın ana bileşeni azot için ,

$$\begin{aligned} a &= 2,54 & c &= 7,379.104 \\ A_0 &= 106,73 & C_0 &= 8,164.105 \\ b &= 0,002328 & \alpha &= 1,272.10^{-4} \\ B_0 &= 0,04074 & \gamma &= 0,0053 \end{aligned}$$

elde edilir. Bu değerler (27) numaralı denklemde yerine konursa :

$$\begin{aligned} 84000 &= \frac{8,314 \cdot 293}{\bar{g}} + \left[0,04074 \cdot 8,314 \cdot 293 - 106,73 - \frac{8,164 \cdot 10^5}{293^2} \right] \cdot \frac{1}{\bar{g}^2} \\ &+ \frac{0,00233 \cdot 8,314 \cdot 293 - 2,54}{\bar{g}^3} + \frac{2,54 \cdot 1 \cdot 272.10^{-4}}{\bar{g}^6} + \frac{7,379 \cdot 10^4}{\bar{g}^3 \cdot 293^2} \cdot \left[1 + \frac{0,0053}{\bar{g}^2} \right] \cdot e^{-\left(\frac{0,0053}{\bar{g}^2}\right)} \\ 84000 &= \frac{2436,002}{\bar{g}} - \frac{7,52}{\bar{g}^2} + \frac{3,13}{\bar{g}^3} + \frac{0,000323}{\bar{g}^6} + \frac{0,86}{\bar{g}^3} \left(\frac{\bar{g}^2 + 0,0053}{\bar{g}^2} \right) \cdot e^{-\left(\frac{0,0053}{\bar{g}^2}\right)} \end{aligned}$$

Denklemi deneme – yanılma metodu ile çözelim.

$$\bar{g} = 0,05 \rightarrow 94000$$

$$\bar{g} = 0,055 \rightarrow 74753$$

$$\bar{g} = 0,053 \rightarrow 81409$$

$$\bar{g} = 0,0525 \rightarrow 83267$$

$$\underline{\underline{\bar{g} \cong 0,0525}}$$

$$g_{gerçek} = \frac{\bar{g}}{M} = \frac{0,0525}{28,97}$$

$$\underline{\underline{g_{gerçek} = 1,81222 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

$$\rho_{gerçek} = \frac{1}{1,81222 \cdot 10^{-3}}$$

$$\underline{\underline{\rho_{1gerçek,840bar} = 552 \text{ kg} / \text{m}^3}}$$

Sonuçları özetleyelim (840 bar = 84MPa basınç için) :

✓ Düzeltme çarpanı Z ye göre ;

$$\rho_{1gerçek} = 555,6 \text{ kg} / \text{m}^3$$

✓ Van der Waals hal denklemine göre ;

$$\rho_{1gerçek} = 500 \text{ kg} / \text{m}^3$$

✓ Beattie – Bridgeman hal denklemine göre ;

$$\rho_{1gerçek} = 720 \text{ kg} / \text{m}^3$$

✓ Benedict – Webb – Rubin hal denklemine göre ;

$$\rho_{1gerçek} = 552 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Düzeltilme çarpanı Z ye göre olan hesabı esas alalım. İzentropik hal değişimi (izantropik genişleme) kabulü ile ,

$$\frac{V_2^2}{2} = \left(\frac{k}{k-1} \right) \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)} \right] \quad (\text{Eşitlik 17})$$

denklemini yazılabilir. Burada,

$$p \cdot g = Z \cdot R \cdot T \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$p_1 \cdot \frac{1}{\rho_1} = Z \cdot R \cdot T_1$$

olduğundan

$$\frac{V_2^2}{2} = \left(\frac{k}{k-1} \right) \cdot Z \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)} \right] \quad (29)$$

bulunur.

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{1,4}{0,4} \cdot 1,8 \cdot 0,287 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (293 \text{ K}) \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{840} \right)^{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)} \right] \cdot \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ} / \text{kg}} \right)$$

$$\underline{\underline{V_{2gerçek, 840 \text{ bar}} = 951 \text{ m} / \text{s}}}$$

ve,

Şekil 5 deki diyagramdan $Z_{775\text{bar},293\text{K}}$ değeri okunarak 775 bar basınca karşılık gelen çıkış hızını hesaplamakta mümkündür.

2. Akışkan-etki kuvveti R_y ;

Ağızdan fışkıran akışkanın etki ettirdiği kuvveti bulmak için, kontrol hacmine hareket miktarı teoremini uygulayalım (Şekil 2).

y – ekseni boyunca ;

$$\begin{aligned}\sum Fy &= \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{cy} - \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{gy} \\ -R_y + F_2 &= 0 - \rho_2 \cdot Q_2 \cdot V_2 \\ R_y &= F_2 + \rho_2 \cdot Q_2 \cdot V_2 \\ R_y &= p_i \cdot A_2 + \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2 \cdot V_2 = p_i \cdot A_2 + \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2^2 \\ R_y &= A_2 \cdot (p_i + \rho_2 \cdot V_2^2) \quad \frac{R_y}{N} \left| \frac{A_2}{m^2} \right| \frac{p_i}{N/m^2} \left| \frac{\rho_2}{kg/m^3} \right| \frac{V_2}{m/s}\end{aligned} \quad (30)$$

bağıntısı elde edilir. Hesaplayalım.

▪ Havanın, mükemmel gaz ve sabit yoğunlukta olması hali için ;

$$V_{2_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 410 \text{ m/s} \quad (\text{Sayfa : 4})$$

$$\rho_{1_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = \rho_{2_{\text{mükemmel}}} \cong 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Sayfa : 15})$$

(6) numaralı denklem (30) numaralı denklemde yerine konursa,

$$R_y = A_2 \cdot \left(p_i + \rho_2 \cdot 2 \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \right)$$

$$\rho_1 = \rho_2 \quad \text{ve} \quad p_i = p_1$$

dolayısıyla;

$$R_y = 3 \cdot A_2 \cdot p_1 \quad \frac{R_y}{N} \left| \frac{A_2}{m^2} \right| \frac{p_1}{N/m^2} \quad (31)$$

ve

$$R_{y_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 3 \cdot 800 \cdot 10^{-6} \cdot 840 \cdot 10^5$$

$$\underline{\underline{R_{y_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 201680 \text{ N}}}$$

bulunur.

- **Havanın, mükemmel gaz ve sıkıştırılabilir olması hali için ;**

$$\underline{\underline{V_{2_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 709 \text{ m/s}}} \quad (\text{Sayfa : 7})$$

İzantropik genişleme varsayımıyla,

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{s=\text{sabit}} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k \quad (\text{Eşitlik 13})$$

veya ,

$$p_2 \cdot \rho_1^k = p_1 \cdot \rho_2^k$$

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\rho_{2_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 1000 \cdot \left(\frac{1}{840} \right)^{\frac{1}{1,4}}$$

$$\rho_{2_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 8,15 \text{ kg / m}^3$$

$$R_y = 800 \cdot 10^{-6} \cdot (840 \cdot 105 + 8,15 \cdot 7092)$$

$$\underline{\underline{R_{y_{\text{mükemmel, 840 bar}}} = 70477,5 \text{ N}}}$$

- **Havanın, mükemmel gaz davranışından uzaklaşması (sapması) ve sıkıştırılabilir olması hali için ;**

$$V_{2_{\text{gerçek, 840 bar}}} = 951 \text{ m/s} \quad (\text{Sayfa : 20})$$

$$\rho_{1_{\text{gerçek, 840 bar}}} = 555,6 \text{ kg / m}^3 \quad (\text{Sayfa : 15})$$

izantropik genişleme varsayımıyla,

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 555,6 \cdot \left(\frac{1}{840} \right)^{\frac{1}{1,4}}$$

$$\underline{\underline{\rho_{2_{\text{gerçek, 840 bar}}} = 4,53 \text{ kg / m}^3}}$$

$$R_y = 800 \cdot 10^{-6} \cdot (840 \cdot 105 + 4,53 \cdot 9512)$$

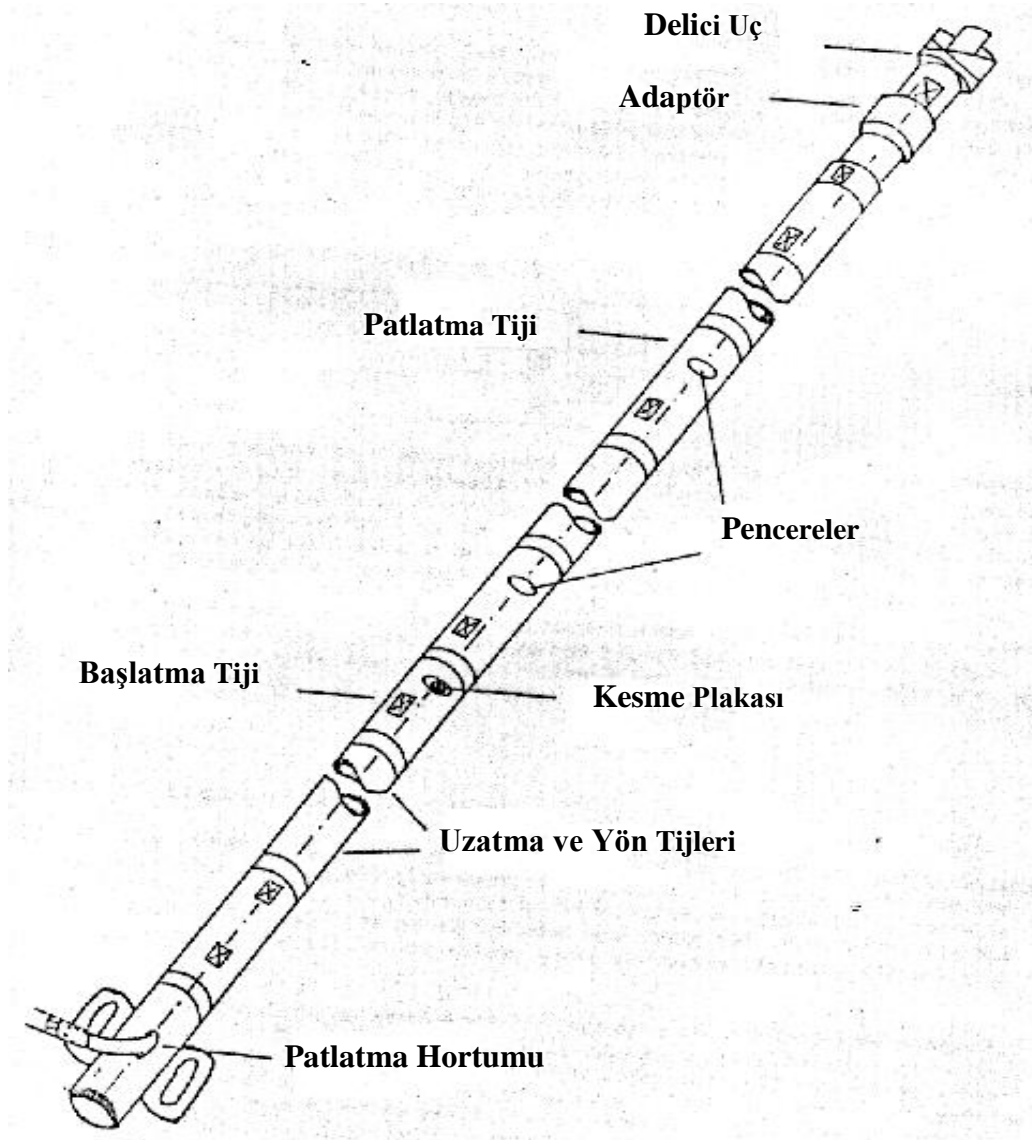
$$\underline{\underline{R_{y_{\text{gerçek, 840 bar}}} = 70477,5 \text{ N}}}$$

bulunur.

SİSTEMİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ

▪ Çalışma prensibi

Bu sistem, yüksek basınçlı hava ile kömür parçalama esasına dayanmaktadır. Hem delik delme ve hem de patlatma işleminde kullanılan özel tijler (Şekil 6) içinde depolanan yüksek basınçlı hava yine yüksek bir hızla kömür damarına verilir.

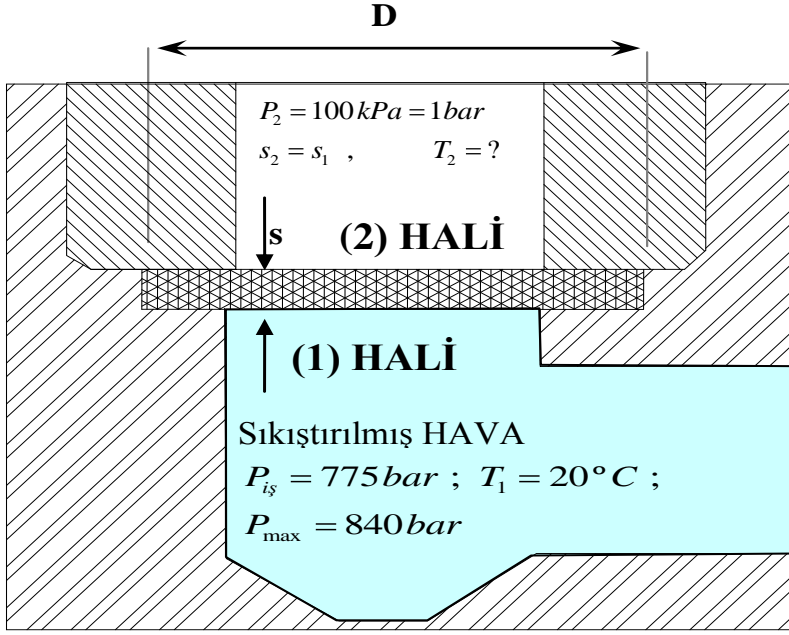


Şekil - Patlatma Üniteleri

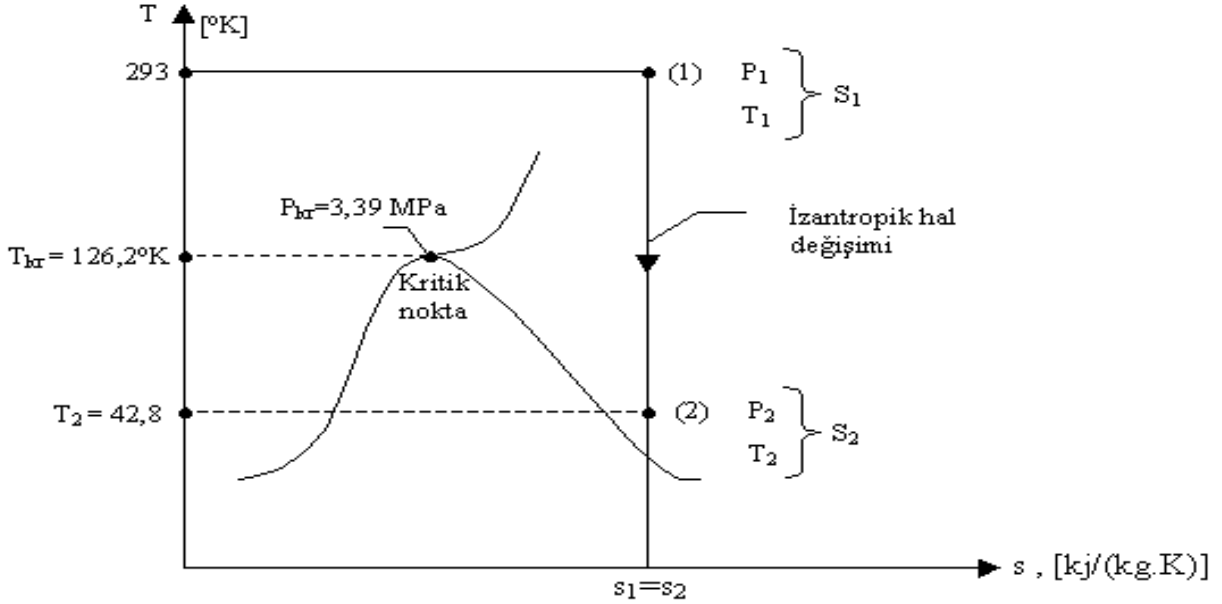
Kömür damarında oluşan çatlaklar ve basınçlı havanın bu çatlaklar boyunca serbest yüzeye doğru ilerlemesiyle kazılacak kömürün parçalanması (gevşemesi) sağlanır.

Yüksek basınçlı hava ile doldurulan sistemde önce, başlatma ünitesinde bulunan “s” kalınlığındaki D diski patlar (Şekil 1) ve bu üniteye basınç düşüşü ile kırma ünitesindeki piston, patlatma penceresini açacak şekilde hareket ederek kömür içine yüksek bir hızla havanın boşalmasını veya fişkırmasını sağlar (Şekil 2).

▪ **Patlama enerjisi (KIRMA ÜNİTESİNDE)**



Problemi T-s diyagramında gösterelim (Şekil 7)



Şekil – Azotun (N_2) T-s diyagramı (Şematik)

(1-2) Hal değişimi :

$P_1=840$ bar basınç ve $T_1=293^\circ$ K sıcaklıktaki hava, s kalınlığındaki D diskini (Patlatma diski) patlatıp genişler. Geniřleyen gaz yüksek bir hızla kayaç (kömür, taş, v.s) içine fişkırır.

$$P_2 = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

Geniřlemenin (1 – 2 hal değişimi) izantropik (sabit entropili) olduęunu kabul edelim.

$$s_1 = s_2$$

olur.

Sistem olarak kırma üniteleri ve boru şebekesi içindeki hava seçilsin. Sistem, sınırlarından kütle geçişi olmadığı için, kapalı sistem veya kontrol kütlesidir. Sistem ayrıca hareketsizdir, bu nedenle potansiyel ve kinetik enerji değişimleri sıfırdır. Dolayısıyla birinci yasa sadeleştirilerek

$$Q_{12} - W_{12} = (\Delta U)_{12} \quad \text{kJ} \quad (32)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$Q_{12} = 0 \quad (\text{Kısa süreli, adyabatik})$$

Yerine konursa, (1 – 2) izantropik genişleme iři ;

$$W_{12} = m.(u_1 - u_2) \quad \text{kJ} \quad (33)$$

veya, mkemmел bir gazın iç enerjisi

$$du = C_g.(T).dT \quad (34)$$

kullanılarak,

$$W_{12} = m.C_g.(T_1 - T_2) \quad (35)$$

denkleminden hesaplanabilir.

Mkemmел gazların entropi değişimlerini sabit özgül ısı varsayımıyla ifade eden bağıntılardan

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (36)$$

ile, genişleme iři veya patlama enerjisi ;

$$W_{12} = m \cdot C_{g_0} \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (kj/kg) \quad (37)$$

eşitliğinden de bulunabilir.

C_{g_0} – Sabit hacminde mükemmel-gaz özgül ısısı

Patlama enerjisini birim kütle için yazalım.

$$W_{12} = C_{g_0} \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (kj/kg) \quad (38)$$

ve irdeleyelim :

$$C_{g_0} = 0,718 \text{ kj} / \text{ kg} \cdot \text{K}$$

olduğuna göre ;

- **$P_1 = 700 \text{ bar}$, $T_1 = 20^\circ \text{ C}$ için,**

$$W_{12} = 0,718 \cdot 293 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{700} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]$$

$$\underline{\underline{W_{12} = 178 \text{ kj} / \text{kg}}}$$

- **$P_1 = 775 \text{ bar}$, $T_1 = 20^\circ \text{ C}$ için,**

$$W_{12} = 0,718 \cdot 293 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{775} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]$$

$$\underline{\underline{W_{12} \cong 179 \text{ kj} / \text{kg}}}$$

- $P_1 = 840 \text{ bar}$, $T_1 = 20^\circ \text{ C}$ için,

$$W_{12} = 0,718.293. \left[1 - \left(\frac{1}{840} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]$$

$$\underline{\underline{W_{12} \cong 180 \text{ kJ / kg}}}$$

Burada önemli bir sonuç ortaya çıkmaktadır :

$T_1 = 293^\circ \text{ K}$ ve $P = 700 \dots 840 \text{ bar}$ için patlama enerjisi ;

$$\underline{\underline{W_{12} \cong 180 \text{ kJ / kg}}}$$

olarak alınabilir.

Kullanılabilir basınçlı hava ağırlığı ise,

$$m_{\text{kullanılabilir}} = m_{\text{patlamadan önce}} - m_{\text{patlamadan sonra}}$$

şeklinde yazılır.

$$m_{\text{patlamadan önce}} = \rho_{\text{patlamadan önce}} \cdot V_H$$

V_H – Boru şebekesinin hacmi

$$m_{\text{patlamadan önce}} = \frac{P_{\text{patlamadan önce}}}{R \cdot T_1} \cdot V_H$$

$$m_{\text{patlamadan sonra}} = \frac{P_{\text{patlamadan sonra}}}{R \cdot T_1} \cdot V_H$$

$$m_{\text{kullanılabilir}} = P_{\text{patlamadan önce}} - P_{\text{patlamadan sonra}} \cdot \frac{V_H}{R \cdot T_1}$$

$$m_{\text{kullanılabilir}} = \frac{\Delta P}{R \cdot T_1} \cdot V_H$$

$$m_{\text{kullanılabilir}} \text{ (kg)} = \frac{\Delta P \text{ (bar)} \cdot \left(100 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{bar}} \right)}{R \cdot \left[\text{kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K}) \right] \cdot T_1 \text{ (K)}} \cdot V_H \text{ (m}^3\text{)}$$

(39)

Kullanılan boru şebekesinde,

$$d_i = 14,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

olduğuna göre,

$$m_{kullanilabilir} = \frac{100 \cdot \Delta P}{0,287 \cdot 293} \cdot \frac{\pi \cdot 14,55 \cdot 10^{-3}^2}{4} \cdot L$$

$$\underline{\underline{m_{kullanilabilir} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L}} \quad \frac{m_{kullanilabilir}}{kg} \left| \frac{\Delta P}{bar} \right| \left| \frac{L}{m} \right. \quad (40)$$

elde edilir

L – Boru şebekesinin uzunluğu

Patlama enerjisi ,

$$W_{12} = 180 \cdot m_{kullanilabilir} = 180 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L$$

$$\underline{\underline{W_{12} = 0,036 \cdot \Delta P \cdot L}} \quad \frac{W_{12}}{kj} \left| \frac{\Delta P}{bar} \right| \left| \frac{L}{m} \right. \quad (41)$$

olarak bulunur.

$T_1 = 293^\circ K$ ve $P = 700 \dots 840 \text{ bar}$ basınç için, kırma ünitelerinden kayaç (kömür, taş, v.s.) içine fişkıran havanın hızını hesaplayalım :

- **Bir kırma ünitesinde, üniteden çıkan havanın kinetik enerjisi (Aynı zamanda patlama enerjisidir.) ;**

$$E_{k1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot V_{2ünite}^2 \quad (42)$$

$$W_{12} = \frac{1}{2} \cdot m_{kullanilabilir} \cdot V_{2ünite}^2$$

$$0,036 \cdot \Delta P \cdot L (kj) \cdot (1000 \text{ kg} \cdot \frac{m^2}{s^2}) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L (kg) \cdot V_{2ünite}^2$$

$$V_{2ünite}^2 = 36 \cdot 10^4$$

$$\underline{\underline{V_{2ünite} = 600 \text{ m / s}}} \quad (\text{Şekil 2})$$

Yapılan kabuller çerçevesinde elde edilen hız değeridir.

- **Bir kırma ünitesinde, üniteden çıkan havanın hacimsel debisi ;**

$$A_{2_{ünite}} = 800 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (\text{Şekil 2})$$

olduğuna göre,

$$Q_{2_{ünite}} = V_{2_{ünite}} \cdot A_{2_{ünite}}$$

$T_1 = 293^\circ \text{K}$ ve $P = 700 \dots 800 \text{ bar}$ basınç için,

$$Q_{2_{ünite}} = 600 \cdot 800 \cdot 10^{-6}$$

$$\underline{\underline{Q_{2_{ünite}} = 0,48 \text{ m}^3 / \text{s}}}$$

veya

Havanın kütle debisi ;

$$\dot{m}_{2_{ünite}} = \rho_2 \cdot Q_{2_{ünite}} \quad \left| \frac{\dot{m}_{2_{ünite}}}{\text{kg/s}} \right| \left| \frac{\rho_2}{\text{kg/m}^3} \right| \left| \frac{Q_{2_{ünite}}}{\text{m}^3/\text{s}} \right| \quad (43)$$

Havanın mükemmel gaz varsayımıyla

$$\rho_{2_{mükemmel}} = \rho_{1_{mükemmel, P_1}} \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (44)$$

$$\rho_{1_{mükemmel, P_1}} = \frac{P_1 \cdot (\text{kPa})}{R \cdot T_1}$$

$$\rho_{2_{mükemmel}} = \frac{100 \cdot P_1 (\text{bar})}{0,287 \cdot 293} \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$P_2 = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$\rho_{2_{mükemmel}} \cong 1,19 \cdot P_1^{\frac{k-1}{k}} \quad \left| \frac{\rho_{2_{mükemmel}}}{\text{kg/m}^3} \right| \left| \frac{P_1}{\text{bar}} \right| \quad (45)$$

Dolayısıyla,

$$\dot{m}_{2\text{ünite}} = 1,19 \cdot P_1^{\frac{k-1}{k}} \cdot 0,48$$

$$\dot{m}_{2\text{ünite}} = 0,57 \cdot P_1^{\frac{k-1}{k}} \quad \left| \frac{kg/sn}{bar} \right. \quad \left. \frac{P_1}{bar} \right. \quad (46)$$

elde edilir.

- **Bir kırma ünitesinde, havanın deşarj süresi ;**

$$t_{\text{ünite}} = \frac{m_{\text{kullanılabilir}} \cdot (kg)}{\dot{m}_{2\text{ünite}} \cdot (kg/s)}$$

$$t_{\text{ünite}} = \frac{m_{\text{kullanılabilir}} / n}{\dot{m}_{2\text{ünite}}}$$

(47)

n – Kırma ünite sayısı

$$t_{\text{ünite}} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L}{0,57 \cdot P_1^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{1}{n} \quad (48)$$

$$\underline{\underline{t_{\text{ünite}} = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L \cdot P_1^{\left(\frac{1-k}{k}\right)} / n}} \quad \left| \frac{t_{\text{ünite}}}{sn.} \right| \left| \frac{\Delta P}{bar} \right| \left| \frac{L}{m} \right| \left| \frac{P_1}{bar} \right. \quad (49)$$

bulunur.

- **Boru şebekesini yüksek basınçlı hava ile doldurma süresi ;**

dt zaman aralığında boru şebekesine giren havanın ağırlığı dm ise,

$$Q \cdot \rho \cdot dt = dm \quad (50)$$

denklemi yazılabilir. İntegralini alırsak,

$$\int Q \cdot \rho \cdot dt = \Delta m \quad (51)$$

elde edilir. Süreklilik denklemine göre,

$$Q_1 \cdot \rho_1 = Q_2 \cdot \rho_2 = \dots = Q \cdot \rho = \text{Sabit} \quad (52)$$

yazılırsa (51) denkleminde,

$$\Delta m = Q_1 \cdot \rho_1 \cdot \int dt = Q_1 \cdot \rho_1 \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta t}{\frac{\Delta m}{Q_1 \cdot \rho_1}} = \frac{\Delta t}{dak.} \left| \frac{\Delta m}{kg} \right| \left| \frac{Q_1}{m^3 / dak.} \right| \left| \frac{\rho_1}{kg / m^3} \right| \quad (53)$$

bulunur.

$$\Delta m = m_{kullanilabilir} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L \quad (Eşitlik 40)$$

Q_1 – Kompresörün normal şartlardaki debisi

ρ_1 – Havanın normal şartlardaki yoğunluğu $\cong 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$

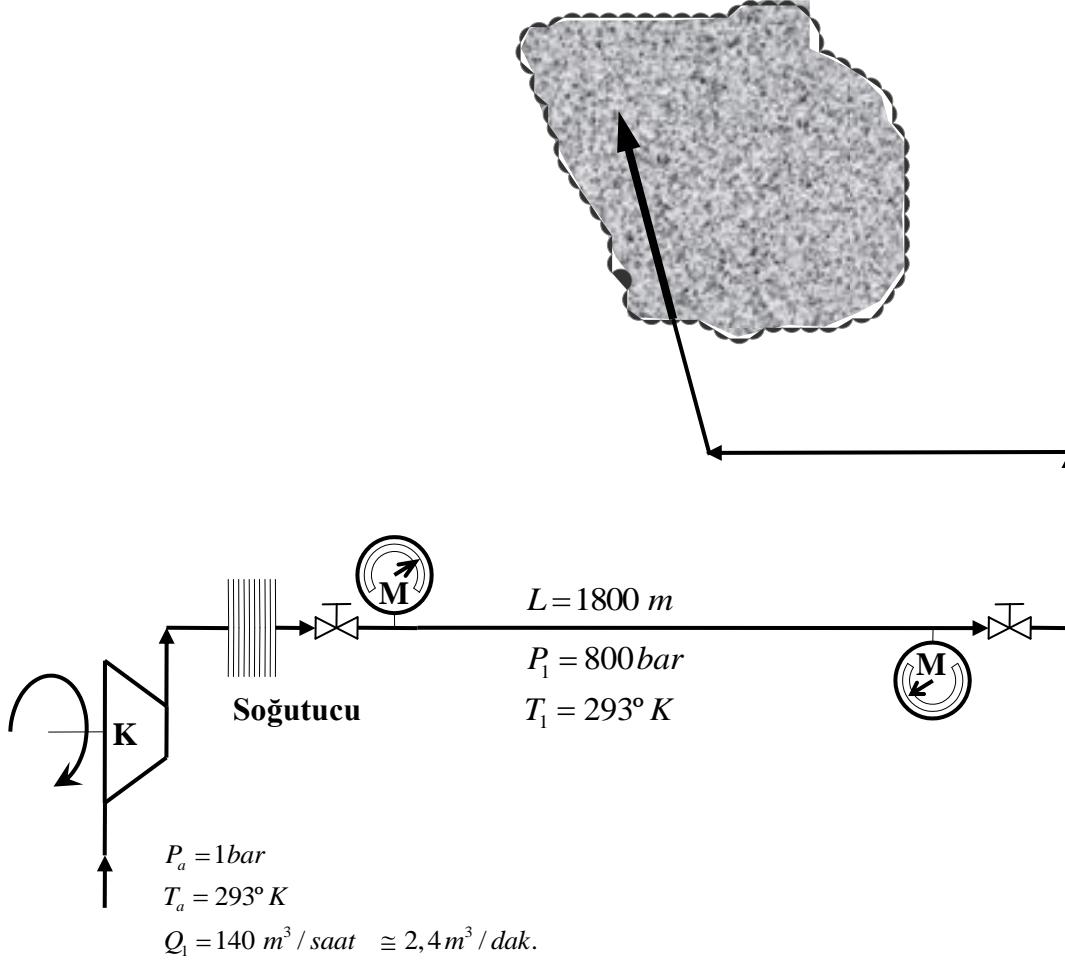
$$\Delta t = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L}{Q_1 \cdot 1,2}$$

$$\Delta t = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L / Q_1 \quad \frac{\Delta t}{dak.} \left| \frac{\Delta P}{bar} \right| \left| \frac{L}{m} \right| \left| \frac{Q_1}{m^3 / dak.} \right| \quad (54)$$

şeklinde teorik olarak yazılabilir.

Uygulama 1:

Üzülmez Müessesesinde kısa patlatma ;



Kırma ünitesi	: 1 Adet
Boru şebekesi	: $L = 1800 \text{ m}$.
Patlamadan önce	: $P = 800 \text{ bar}$
Patlamadan sonra	: $P = 760 \text{ bar}$
Basınç düşüşü	: $\Delta P = 40 \text{ bar}$

- **Kullanılabilir basınçlı hava ağırlığı,**

$$m_{\text{kullanılabilir}, 800, 760 \text{ bar}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 1800 \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\underline{\underline{m_{\text{kullanılabilir}, 800, 760 \text{ bar}} = 14,4 \text{ kg}}}$$

▪ **Patlama enerjisi**

$$W_{12_{\text{patlama,800,760 bar}}} = 0,036 \cdot \Delta P \cdot L = 0,036 \cdot 40 \cdot 1800 \quad (\text{Eşitlik 41})$$

$$\underline{\underline{W_{12_{\text{patlama,800,760 bar}}} = 2592 \text{ kJ}}}$$

▪ **Havanın kütle debisi**

$$\dot{m}_{2_{\text{ünite}}} = 0,57 \cdot P_1^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} = 0,57 \cdot 800^{\left(\frac{1,4-1}{1,4}\right)} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{2_{\text{ünite}}} \cong 3,85 \text{ kg/s}}}$$

▪ **Havanın kırma ünitesinden deşarj süresi ,**

$$t_{\text{ünite}} = \frac{m_{\text{kullanılabilir}}/n}{\dot{m}_{2_{\text{ünite}}}} = \frac{14,4/1}{3,85} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

$$\underline{\underline{t_{\text{ünite}} = 3,74 \text{ s}}}$$

veya

$$t_{\text{ünite}} = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot P_1^{\left(\frac{1-k}{k}\right)} \cdot \Delta P \cdot L/n \quad (\text{Eşitlik 49})$$

$$t_{\text{ünite}} = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 800^{\left(\frac{1-1,4}{1,4}\right)} \cdot 40 \cdot 1800/1$$

$$\underline{\underline{t_{\text{ünite}} = 3,73 \text{ s}}}$$

bulunur.

Kontrol : Bir kırma ünitesinde, üniteden çıkan havanın birim zamandaki kinetik enerjisi ;

$$E_{k2_{\text{ünite}}} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_{2_{\text{ünite}}} \cdot V_{2_{\text{ünite}}}^2 \quad (55)$$

$$E_{k2_{\text{ünite}}} = \frac{1}{2} \cdot 0,57 \cdot P_1^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \cdot V_{2_{\text{ünite}}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,57 \cdot 800^{\left(\frac{1,4-1}{1,4}\right)} \cdot 600^2$$

$$\underline{\underline{E_{k2_{\text{ünite}}} = 692790 \text{ j/s} \cong 693 \text{ kJ/s}}}$$

▪ **Patlama enerjisi ;**

$$W_{12_{patlama,800,760bar}} = E_{k2_{ünite}} \cdot t_{ünite} = 693 \cdot 3,74$$

$$W_{12_{patlama,800,760bar}} \cong 2592 \text{ kj}$$

Aynı sonuç çıkar.

▪ **Boru şebekesini yüksek basınçlı hava ile doldurma süresi;**

$$\Delta t_{teo.} = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L / Q_1 \quad (\text{Eşitlik 54})$$

$$\Delta t_{teo.} = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 1800 / 2,4$$

$$\Delta t_{teo.} = 5 \text{ dak.}$$

Uygulama 2:

Üzülmez Müessesesinde uzun patlatma ;

Başlatma ünitesi : 1 Adet

Kırma ünitesi : 5 Adet

Boru şebekesi : L = 2100m.

Patlamadan önce : P = 780 bar

Patlamadan sonra : P = 700 bar

Basınç düşüşü : $\Delta P = 80 \text{ bar}$

$$\checkmark m_{kullanılabilir,780,700 \text{ bar}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 2100 \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\underline{\underline{m_{kullanılabilir,780,700 \text{ bar}} = 33,6 \text{ kg}}}$$

$$\checkmark W_{12_{patlama,780,700bar}} = 0,036 \cdot \Delta P \cdot L = 0,036 \cdot 800 \cdot 2100 \quad (\text{Eşitlik 41})$$

$$\underline{\underline{W_{12_{patlama,780,700bar}} = 6048 \text{ kj}}}$$

$$\checkmark \dot{m}_{2_{ünite,780bar}} = 0,57 \cdot P_1^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} = 0,57 \cdot 780^{\left(\frac{1,4-1}{1,4}\right)} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{2_{ünite,780bar}} = 3,82 \text{ kg / s}}}$$

$$\checkmark t_{ünite} = \frac{m_{kullanılabilir,780,700bar}}{\dot{m}_{2_{ünite,780bar}}} / n = \frac{33,6/6}{3,82} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

$$\underline{\underline{t_{ünite} = 1,46 \text{ s}}}$$

veya,

$$\checkmark t_{\text{ünite}} = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot P_1^{\left(\frac{1-k}{k}\right)} \cdot \Delta P \cdot L/n = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 780^{\left(\frac{1-1,4}{1,4}\right)} \cdot 80 \cdot 2100/6 \quad (\text{Eşitlik 49})$$

$$\underline{\underline{t_{\text{ünite}} = 1,46 \text{ s}}}$$

Kontrol : Bir kırma ünitesinden çıkan havanın birim zamandaki kinetik enerjisi ;

$$E_{K2_{\text{ünite}}} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_{2_{\text{ünite}}} \cdot V_{2_{\text{ünite}}}^2$$

olduğuna göre, $T_1 = 293^\circ K$ ve $P = 700 \dots 800 \text{ bar}$ basınç için, amprik bir sonuç daha çıkarabiliriz,

$$E_{k2_{\text{ünite}}} = \frac{1}{2} \cdot 0,57 \cdot P_1^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \cdot 600^2 = 102600 \text{ Nm/s} \quad j/s$$

$$\underline{\underline{E_{k2_{\text{ünite}}} \cong 103 \cdot P_1^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}}} \quad \left| \frac{E_{k2_{\text{ünite}}}}{kj/s} \right| \frac{P_1}{bar} \quad (56)$$

şeklinde elde edilir.

Hesaplayalım ,

$$E_{k2_{\text{ünite}}} = 103 \cdot 780^{\left(\frac{1,4-1}{1,4}\right)}$$

$$\underline{\underline{E_{k2_{\text{ünite}}} = 690,5 \text{ kj/s}}}$$

$$W_{12_{\text{patlama,780,700bar ünite}}} = E_{k2_{\text{ünite}}} \cdot t_{\text{ünite}} = 690,5 \cdot 1,46$$

$$\underline{\underline{W_{12_{\text{patlama,780,700bar ünite}}} \cong 1008 \text{ kj/ünite}}}$$

$n = 6$, dolayısıyla

$$W_{12_{\text{patlama,780,700bar}}} = 6 \cdot 1008$$

$$\underline{\underline{W_{12_{\text{patlama,780,700bar}}} = 6048 \text{ kj}}}$$

aynı sonuç çıkar.

- **Boru şebekesini yüksek basınçlı hava ile doldurma süresi;**

$$\Delta t_{\text{teo.}} = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P \cdot L / Q_1 \quad (\text{Eşitlik 54})$$

$$\Delta t_{\text{teo.}} = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 2100 / 2,4$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{\text{teo.}} \cong 12 \text{ dak.}}}$$

HAVA PATLATMALI KAZI SİSTEMİ, ŞEBEKE BORULARI ÜZERİNDE BİR İNCELEME

1 - Boruların mekanik özellikleri;

“ THE UNIVERSAL STEEL TUBE COMPANY” tarafından yapılan mekanik test sonuçları :

Tarih : 25/07/1995
Sertifika No : 15472
Büyükük : 25mm. dış çap X 5mm. cidar (et) kalınlığı X 6m. boy
Özellik : DIN 2391 St52 NBK
*DIN 2391 : Dikişsiz ve soğuk çekilmiş hassas borular.
NBK : Koruyucu atmosfer altında normalize edilmiş. Parlak tav işlemine tabi tutulmuş.*

Kimyasal analiz (Döküm potası :

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Sn
0,08	0,19	0,44	0,005	0,016	0,16	0,04	0,16	0,14	0,04	0,01

Boru dış çapı : 25,03 mm.

Boru cidar (et) kalınlığı : 5,21

Test parça alanı : $324 \text{ mm}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot [25,03^2 - 25,03 - 2 \cdot 5,21^2]$

Kopma Mukavemeti : 564 N / mm^2
Akma sınırı : 436 N / mm^2 } $R_t = 0,5 \mu\text{m.de}$

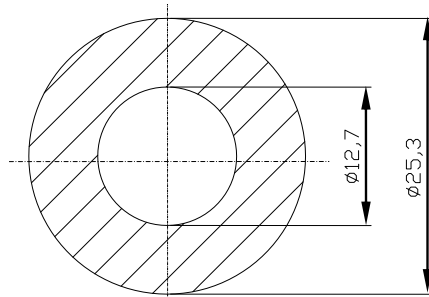
R_t - Elde edilebilir yüzey pürüzlülüğü μm

Kopma Uzaması : %38

Ayrıca, boruların “Erdemir”de yaptırılan spektral analiz sonuçlarında Tablo 3 de verilmiştir.

2 - Cidar (et) kalınlığı hesabı ;

Çelik borunun kesit resmi şekil 8 de gösterilmiştir. Buna göre;



26-Jan-96 11:21:06 Sample: MAVI VIDA (**Eski Borular**)

Program : FEALSOL Task:FEALSOL

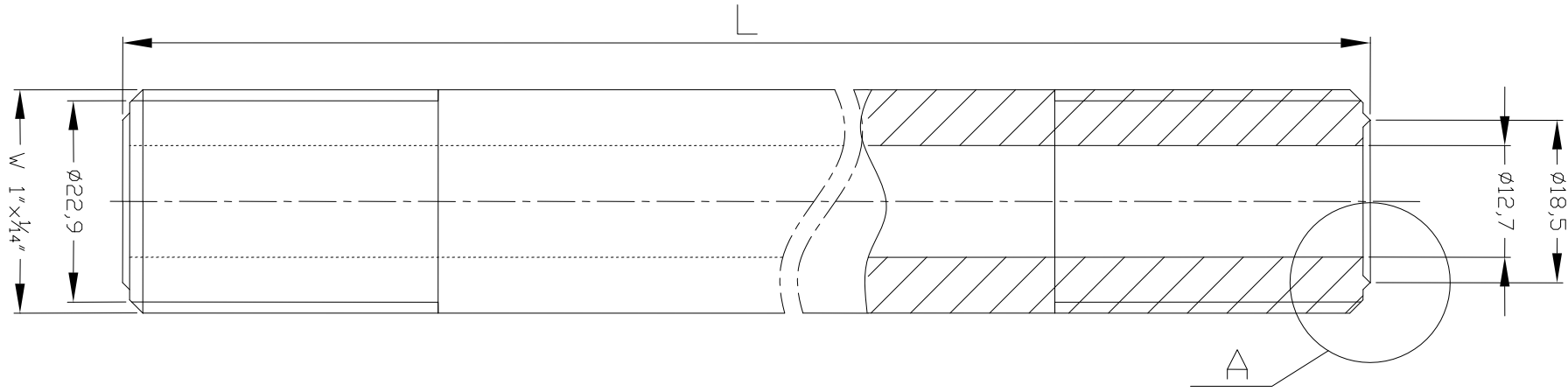
Run	C	Mn2	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Al
AVG	0,1950	1,5487	0,0203	0,0061	0,2867	0,0227	0,0358	0,5180	0,0074	0,0016	0,0420
	As	Alsol	Aline	N	Ca	Nb	Ti	Ta	V	W	
AVG	0,0034	0,0390	0,0030	0,00875	0,00168	0,0344	0,0041	0,0037	0,1383	0,0046	
	Co	Pb	B	Zr	Zn	f	FE				
AVG	0,0054	-0,0005	0,0002	0,0012	0,0019	0,9290	94,29				

26-Jan-96 11:25:22 Sample: SIYAH VIDA (**Yeni Gelen Borular**)

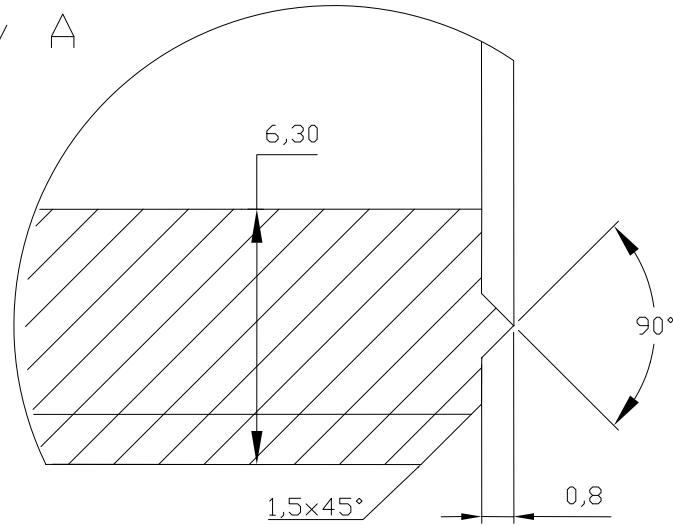
Program : FEALSOL Task:FEALSOL

Run	C	Mn2	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Al
AVG	0,1682	1,3880	0,0084	0,0094	0,2046	0,1297	0,1617	0,1560	0,0324	0,0087	0,0276
	As	Alsol	Aline	N	Ca	Nb	Ti	Ta	V	W	
AVG	0,0069	0,0259	0,0018	0,01012	0,00113	0,0031	0,0010	0,0040	0,0451	0,0055	
	Co	Pb	B	Zr	Zn	f	FE				
AVG	0,0087	-0,0003	0,0002	0,0009	0,0010	0,9363	95,50				

Tablo 3 - Boruların “ERDEMİR” de yaptırılan kimyasal analiz sonuçları



Detay A



Şekil – Çelik Şebeke Borusu

a) İnce cidarlı içi boş silindirler (Kazan konstrüksiyonları);

Niemann'a göre :

$$s = 0,1 \cdot \frac{D \cdot p}{2 \cdot \frac{K}{S} \cdot g_k - \frac{p}{10}} + 1 \quad \frac{s}{mm} \left| \frac{D}{mm} \right| \frac{p}{bar} \left| \frac{K}{N/mm^2} \right| \quad (57)$$

s - Cidar (et) kalınlığı (Kazan sacı kalınlığı)

D - İç çap (Kazan iç çapı)

p - İşletme basıncı ($1bar \cong 0,1 N/mm^2$)

K - Mukavemet sınırı

S - Emniyet katsayısı

$$S = 1,5$$

Prof.Dr.Mustafa AKKURT – Prof.Dr.Mustafa SAVCI ya göre iç basınca çalışan borularda, kullanılan malzemenin DIN 50049'a göre tesellüm sertifikası,

$$\left. \begin{array}{l} Var ise \rightarrow S = 1,5 \\ Yok ise \rightarrow S = 1,8 \end{array} \right\} \text{ alınır.}$$

$$\sigma_{em} = \frac{K}{S} \quad (58)$$

σ_{em} - Emniyet gerilmesi

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_{AK}}{S} \quad (59)$$

alınabilir.

σ_{AK} - Akma sınırı

g_k - Kaynak dikiş faktörü

$$g_k = 0,8 \dots 1,0 \text{ 'a kadar} \quad (60)$$

Borumuz dikişsiz olduğundan

$$\underline{\underline{g_k = 1,0}}$$

alınmıştır.

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_{AK}}{S} = \frac{436}{1,5}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{em} \cong 290 \text{ N/mm}^2}}$$

Boru test basıncı,

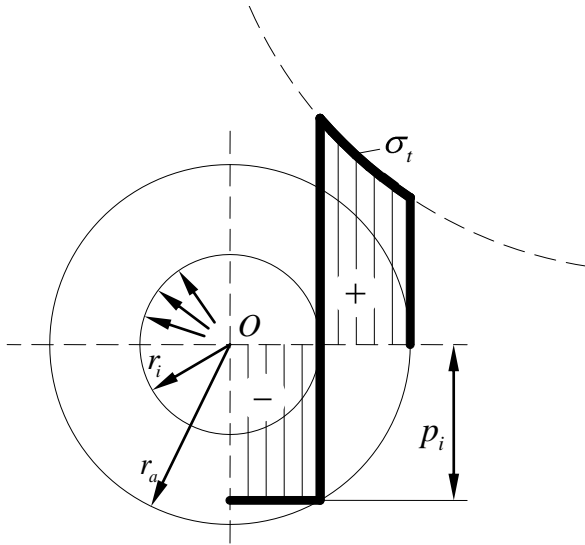
$$p = 140 \text{ MPa} = 1400 \text{ bar}$$

$$s = 0,1 \cdot \frac{12,7 \cdot 1400}{2 \cdot 290 \cdot 1 - \frac{1400}{10}} + 1$$

$$\underline{\underline{s = 5 \text{ mm}}}$$

b) Yalnız iç basınca çalışan kalın cidarlı borular ,

M.ten Bosch'a göre



Şekil – İç basınca çalışan kalın cidarlı borularda gerilme yayılışı

— Teğetsel gerilme :

$$\sigma_t = p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_a^2}{r^2} \right)$$

(61)

Teğetsel gerilme daima pozitifdir.

— Radyal gerilme :

$$\sigma_r = p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_a^2}{r^2} \right) \quad (62)$$

ifadesiyle verilir ve daima negatiftir.

$r = r_i$ ve $r_a/r_i = a$ dönüşümü ile

$$\sigma_{t \text{ max.}} = p_i \cdot \frac{r_i^2 + r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \quad (63)$$

$$\underline{\underline{\sigma_{t \text{ max.}} = p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1}}} \quad (64)$$

değeri hesaplanır.

En büyük çekme gerilmesi $\sigma_{t \text{ max.}}$, silindirin iç yüzeyinde ve teğetsel doğrultudadır.

$r = r_i$ için ise,

$$\underline{\underline{\sigma_r = -p_i}} \quad (65)$$

dır.

b 1) Maksimum uzama hipotezi :

✓ Silindir açık ;

$$\sigma_{red.} = \sigma_t - \sigma_r / m \quad (66)$$

$\sigma_{red.}$ - İndirgenmiş gerilme

İndirgenmiş gerilme $\sigma_{red.}$, sınır değeri k yı geçmemelidir. (63) ve (65) eşitlikleri. (66) formülünde yerine konursa ($r_a/r_i = a$ olmak üzere), silindirin iç yüzeyi için:

$$p_i \cdot \frac{r_i^2 + r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} + \frac{p_i}{m} = \sigma_{em} = k$$

$$p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} + p_i \cdot \frac{1}{m} = k$$

$$p_i \cdot a^2 + p_i = k \cdot a^2 - k - \frac{p_i}{m} \cdot a^2 + \frac{p_i}{m}$$

$$a^2 \left(p_i - k + \frac{p_i}{m} \right) = \frac{p_i}{m} - k - p_i$$

$$a^2 \left(-k + \frac{m+1}{m} \cdot p_i \right) = p_i \frac{1-m}{m} - k$$

$$a^2 \left(k - \frac{m+1}{m} \cdot p_i \right) = k + \frac{m-1}{m} \cdot p_i$$

$$\frac{r_a}{r_i} = a = \sqrt{\frac{k + \frac{m-1}{m} \cdot p_i}{\left(k - \frac{m+1}{m} \cdot p_i \right)}} \quad (67)$$

m – Poisson sayısı

$$m = \frac{10}{3} \text{ (çelik için, oda sıcaklığında)}$$

değeri ile

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k + 0,7 \cdot p_i}{k - 1,3 \cdot p_i}} \quad (68)$$

bulunur. Bu, literatürde “Grashof” denklemleri olarak tanımlanmıştır.

✓ Silindir kapalı ;

“Hüttele”, kalın cidarlı boş silindirlerin hesabı için yıllardan beri başka bir formül vermiştir, ki bunda da kırılma tehlikesinde maksimum uzama esas alınmıştır. Yalnız burada aksiyel kuvvetlerin de tesir ettiği kabul edilmiştir, ki bu hal kapalı kaplarda (oksijen tüplerinde) veya çift tesirli pistonlu makinalarda vardır.

Kapalı silindirlerde aksiyel doğrultudaki asal gerilme

$$\sigma_a = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot s} = \frac{\pi \cdot D \cdot p}{4 \cdot s} \quad (69)$$

şeklinde idi. Bu denkleme göre;

$$\sigma_z = \frac{\pi \cdot r_i^2}{\pi \cdot r_a^2 - r_i^2} \cdot p_i \neq 0$$

$$\sigma_z = p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \neq 0 \quad (70)$$

ve indirgenmiş gerilme;

$$\sigma_{red.} = \sigma_t - \frac{\sigma_z + \sigma_r}{m} \quad olur. \quad (71)$$

Silindirin aksenal kuvvetler altında zorlanması, teğetsel uzamada bir azalmaya neden olmaktadır; böylece kırılma tehlikesi bu halde azalmış olur. Gerilme değerleri; (71) eşitliğinde yerlerine konursa ;

$$k = p_i \cdot \frac{r_i^2 + r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - p_i}{m}$$

$$k = p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} - \frac{p_i}{m} \cdot \left(\frac{2 \cdot r_i^2 - r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \right)$$

$$k = p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} + \frac{p_i}{m} \cdot \left(\frac{r_a^2 - 2 \cdot r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \right)$$

$$k = p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} + \frac{p_i}{m} \cdot (a^2 - 2)$$

$$k = \frac{p_i}{a^2 - 1} \cdot \left[a^2 + 1 + \frac{a^2 - 2}{m} \right] = \frac{p_i}{a^2 - 1} \cdot \left[\frac{a^2 \cdot m + 1 + m - 2}{m} \right]$$

$$k \cdot m \cdot a^2 - 1 = p_i \cdot [a^2 \cdot m + 1 + m - 2]$$

$$a^2 \cdot \left(k - \frac{m+1}{m} \cdot p_i \right) = k + \frac{m-2}{m} \cdot p_i$$

$$a = \sqrt{\frac{k + \frac{m-2}{m} \cdot p_i}{k - \frac{m+1}{m} \cdot p_i}}$$

ve $m = 10/3$ için;

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k + 0,4 \cdot p_i}{k - 1,3 \cdot p_i}} \quad (72)$$

sonucuna varılır..

Boru kapalı veya yalnız iç basınca çalıştığına göre,

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k + 0,4 \cdot p_i}{k - 1,3 \cdot p_i}} \quad (\text{Eşitlik } 72)$$

$$k = \sigma_{em} = 290 \text{ N / mm}^2 = 2900 \text{ kg / cm}^2$$

$$p_i = 1400 \text{ kg / cm}^2$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{2900 + 0,4 \cdot 1400}{2900 - 1,3 \cdot 1400}}$$

$$\underline{\underline{a = \frac{r_a}{r_i} = 1,79}}$$

$$D_a = 12,7 \cdot 1,79$$

$$\underline{\underline{D_a = \phi 22,7 \text{ mm.} < \phi 25,3 \text{ mm.}}} \quad \text{(UYGUN)}$$

b 2) Maksimum asal gerilme hipotezi :

✓ Silindir açık ve kapalı ;

Fransız ve kısmen de İngiliz literatüründe kullanılmaktadır :

$$\sigma_{i \text{ max.}} = p_i \cdot \frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} = \sigma_{em} = k \quad (\text{Eşitlik 63})$$

$$k = p_i \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} \rightarrow k \cdot a^2 - k = p_i a^2 + p_i$$

$$a^2 k - p_i = k + p_i$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k + p_i}{k - p_i}} \quad (\text{Lame veya Rankine Denklemi})$$

(73)

Bu denkleme göre,

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{2900 + 1400}{2900 - 1400}}$$

$$\underline{\underline{a = \frac{r_a}{r_i} = 1,7}}$$

$$D_a = 12,7 \cdot 1,7$$

$$\underline{\underline{D_a = \phi 21,6 \text{ mm.} < \phi 25,3 \text{ mm.}}} \quad \text{(UYGUN)}$$

b 3) Mohr kırılma hipotezi :

✓ Silindir açık ve kapalı ;

Mohr hipotezine göre, cebirsel bakımdan orta asal gerilme olan σ_z in hiçbir rolü yoktur. Böylece maksimum kayma gerilmesi,

$$\tau_{\max.} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_t - \sigma_r = \frac{p_i}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_a^2 + r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \right) = \frac{\sigma_{em}}{2} = \frac{k}{2} \quad (74)$$

$$\frac{p_i}{2} \cdot \left(1 + \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} \right) = \tau_{\max.}$$

$$\frac{p_i}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot a^2}{a^2 - 1} \right) = \tau_{\max.}$$

$$p_i \cdot \frac{a^2}{a^2 - 1} = \tau_{\max.} \rightarrow p_i \cdot a^2 = \tau_{\max.} \cdot a^2 - \tau_{\max.}$$

$$a^2 \tau_{\max.} - p_i = \tau_{\max.}$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{\tau_{\max.}}{\tau_{\max.} - p_i}}$$

(75)

bulunur.

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{2900/2}{2900/2 - 1400}}$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = 5,4$$

$$D_a = 12,7 \cdot 5,4$$

$$\underline{\underline{D_a = \phi 68,6 \text{ mm.} > \phi 25,3 \text{ mm.}}} \quad (\text{UYGUN DEĞİL})$$

b 4) Biçim değiştirme enerjisi hipotezi :

✓ Silindir kapalı ;

$$\sigma_{red} = p_i \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot a^2}{a^2 - 1}$$

$$p_i \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot a^2}{a^2 - 1} = k \rightarrow p_i \cdot \sqrt{3} \cdot a^2 = k \cdot a^2 - k$$

$$a^2 \cdot k - \sqrt{3} \cdot p_i = k$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k}{k - \sqrt{3} \cdot p_i}}$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{k}{k - 1,73 \cdot p_i}} \quad \left(p_i < \frac{\sigma_{em}}{1,73} \right) \quad (76)$$

formülü elde edilir.

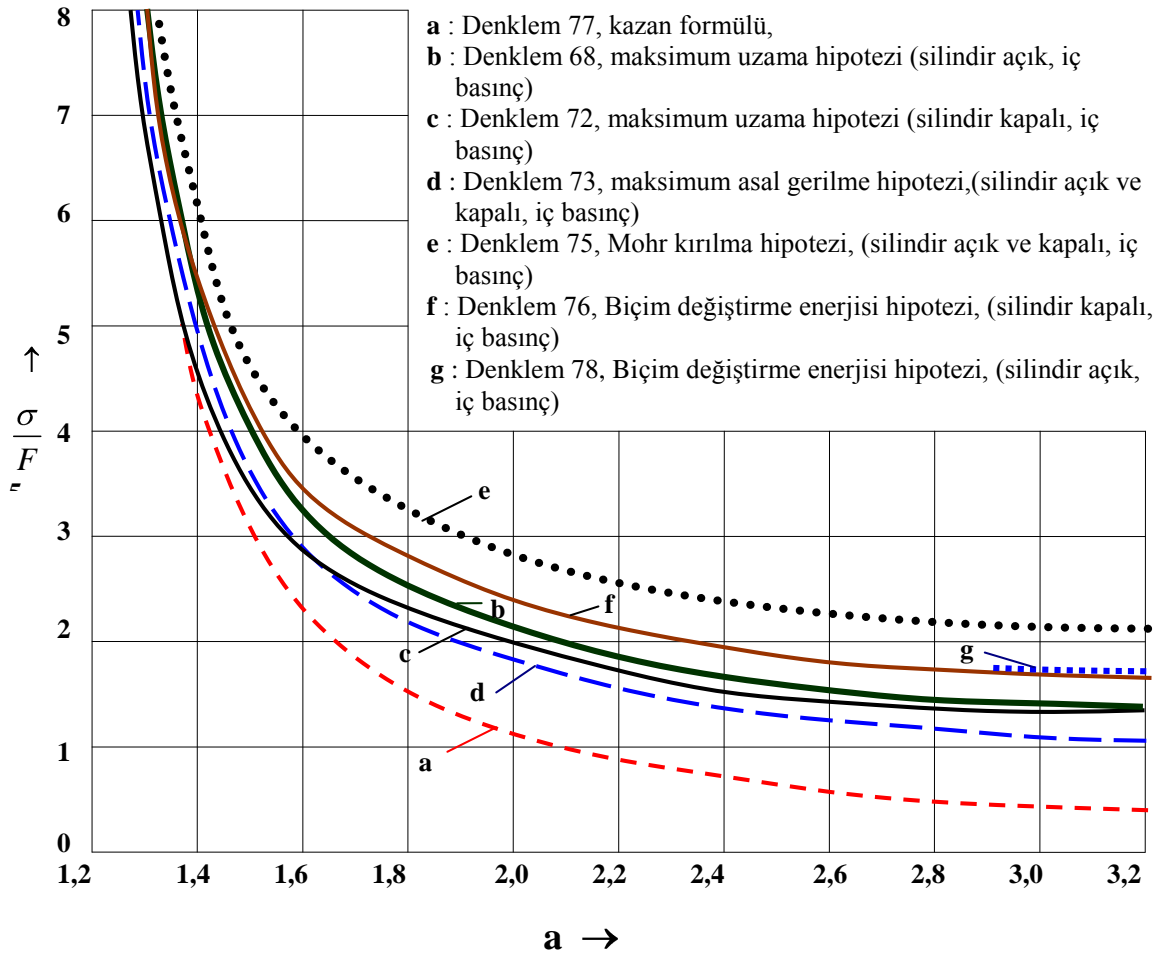
$$a = \frac{r_a}{r_i} = \sqrt{\frac{2900}{2900 - 1,73 \cdot 1400}}$$

$$a = \frac{r_a}{r_i} = 2,46$$

$$D_a = 12,7 \cdot 2,46$$

$$D_a = \phi 31,24 \text{ mm} > \phi 25,3 \text{ mm} \quad (\text{UYGUN DEĞİL})$$

İç basınca çalışan boş bir silindirin hesabı için çıkartılmış olan bu formüllerin karşılaştırması (Şekil 10) kırılma hipotezinin cidar kalınlığı üzerinde oynadığı rolün önemini göstermektedir.



Şekil – Kalın cidarlı içi boş silindirlerin, çeşitli kırılma hipotezlerine göre zorlanmaları.

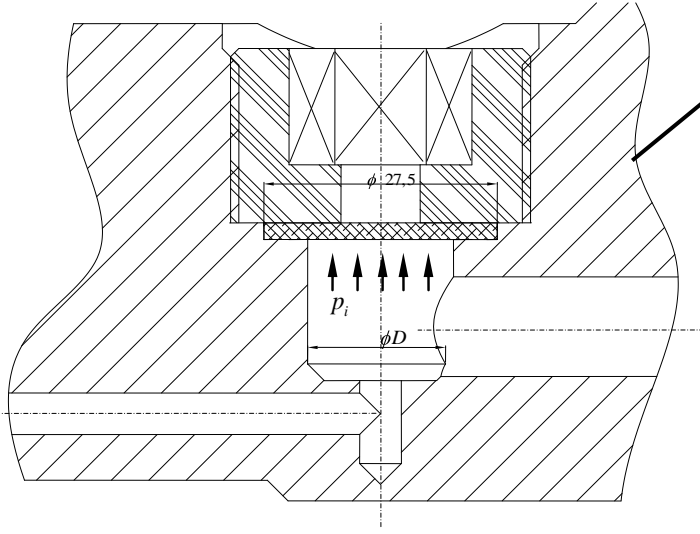
Şekil 10 daki

$$\checkmark \text{ Denklem 77} \quad \rightarrow \quad s = \frac{p_i \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{em}} + 0,1 \text{ cm.}$$

$$\checkmark \text{ Denklem 78} \quad \rightarrow \quad \frac{k}{p_i} = \frac{\sqrt{1+3 \cdot a^4}}{a^2 - 1}$$

şeklindedir.

PATLAMA DİSKİ MUKAVEMET HESABI



MAZ II/2-5

Boşaltma Ünitesi

Res.No:F-797-3

$D = \phi 17,5 \text{ mm.}$

$s = 1,2 - 1,3 - 1,4 \text{ mm.}$

Şekil – Patlatma diskini veya patlatma disk'i (Başlatma ünitesinde)

Patlatma diskini, çevresi boyunca ankastre mesnetli dairesel plak olarak düşünelim.

M.ten Bosch'a göre :

- ✓ En büyük gerilme, patlatma diskinin $r = r_a$ daki σ_r gerilmesidir.

$$\sigma_{\max.} = \sigma_r \quad r_a = \mp 0,75 \cdot p \cdot \frac{r_a^2}{h^2} \quad (79)$$

- ✓ En küçük gerilme, patlatma diskinin $r = r_a$ daki dış yüzeyinde ve teğetsel doğrultudadır (Patlatma diskini çevresi boyunca kopar)

$$\sigma_{\min.} = \sigma_t \quad r_a = \mp 0,225 \cdot p \cdot \frac{r_a^2}{h^2} \quad (80)$$

Disk ile ilgili katalog (OF THE KNOW-HOW AND TECHNICAL DOCUMENTATION) değerleri ;

$$\left. \begin{array}{l} h(=s) = 1 \text{ mm.} \quad \rightarrow \quad p = 700 \text{ bar} \\ h(=s) = 0,75 \text{ mm.} \quad \rightarrow \quad p = 560 \text{ bar} \end{array} \right\} \quad (81)$$

şeklindedir.

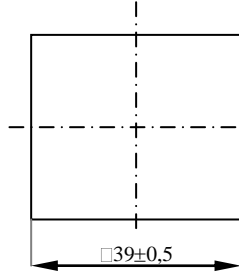
Diskini patlaması istendiğine göre,

$$\sigma_t(r_a) > \sigma_K \quad (82)$$

şartı doğrultusunda disk kalınlıkları basınca bağlı olarak tespit edilir.

▪ **Malzeme seçimi ;**

✓ Kısa patlatma plakası için :



Firma kataloğunda S3HMSZ23 malzemesi (Çekme mukavemeti $R_m = 270...410 N/mm^2$) önerilmiştir.

Yapılan kimyasal analizde :

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,10	0,20	0,15	-	-	-

elde edilmiş olup bu ise St34.2 (Malzeme No:1.0032) karşılığıdır. “Stahlschlüssel’e göre;

St34.2 :

$$C \leq 0,15 \quad Si \leq 0,30 \quad Mn : 0,20 - 0,50 \quad P : 0,050 \quad S : 0,050$$

ve

St33 (Malzeme No:1.0035), $s < 3mm$: Çekme mukavemeti $R_m = 310...540 N/mm^2$ dir.

✓ Uzun patlatma plakası için :

St34-2 malzemesi ve bu malzemede St33 çekme mukavemeti $\sigma_K = R_m = 310...540 N/mm^2$ değerini kullanalım. Şu halde ;

✓ $p = 700bar = 70 N/mm^2$

$$\sigma_i(r_a) > \sigma_K \quad (\text{Eşitlik 82})$$

$$0,225 \cdot 70 N/mm^2 \cdot \frac{17,5/2 mm^2}{h^2} > 310...540 N/mm^2$$

$$\underline{\underline{h < 1,5...1,97 mm.}} \quad \text{Katalokta : 1mm.}$$

✓ $p = 560bar = 56 N/mm^2$

$$0,225 \cdot 56 N/mm^2 \cdot \frac{17,5/2 mm^2}{h^2} > 310...540 N/mm^2$$

$$\underline{\underline{h < 1,3...1,76 mm.}} \quad \text{Katalokta : 0,75mm.}$$

➤ $h = 1,4 \text{ mm}$ kullansak

$$0,225 \cdot p \cdot \frac{17,5/2^2}{1,4^2} > 310 \dots 540$$

$$\underline{\underline{p > 35 \dots 61 \text{ N/mm}^2}}$$

➤ $h = 2 \text{ mm}$ kullansak

$$0,225 \cdot p \cdot \frac{17,5/2^2}{2^2} > 310 \dots 540$$

$$\underline{\underline{p > 72 \dots 125 \text{ N/mm}^2}}$$

➤ Disk malzemesi St 52 ise 700 bar basınçta ,

$$0,225 \cdot 70 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{17,5/2 \text{ mm}^2}{h^2} > 520$$

$$h < 1,5 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \underline{\underline{h = 1,4 \text{ mm.}}}$$

patlatma diskini yeniden ele alalım, Kopma olabilmesi için

$$\sigma_K \leq \sigma_{em}$$

(83)

olmalıdır.

$$\sigma_K = \frac{p}{A} = \frac{\pi \cdot D^2 / 4 \cdot p}{\pi \cdot D \cdot h} = \frac{D \cdot p}{4 \cdot h} \quad (\text{Eşitlik 69})$$

✓ $p = 700 \text{ bar} = 70 \text{ N/mm}^2$ için;

$$310 \dots 540 \text{ N/mm}^2 \leq \frac{17,5 \cdot 70}{4 \cdot h}$$

$$\underline{\underline{h \leq 0,56 \dots 1 \text{ mm.}}} \quad \text{Katalokta : } 1 \text{ mm.}$$

✓ $p = 560 \text{ bar} = 56 \text{ N/mm}^2$ için;

$$310 \dots 540 \text{ N/mm}^2 \leq \frac{17,5 \cdot 56}{4 \cdot h}$$

$$\underline{\underline{h \leq 0,45 \dots 79 \text{ mm.}}} \quad \text{Katalokta : } 1 \text{ mm.}$$

NOT

Hava patlatmalı kazı sisteminin :

- ✓ Mekaniği ve Termodinamik çözümlemesi,
- ✓ Şebeke boruları üzerinde bir inceleme,
- ✓ Patlatma disk'i mukavemet hesabı

ile ilgili çalışmalarımız, gözlemlerle birlikte ürettiğimiz kapsamlı varsayımlar üzerine kurulmuştur.

Haklı olma yerine, yanlışlıktan kurtulmayı ve gerçeği öğrenmeyi istediğimizden, varsayımlarımızı en açık şekilde konuya ilgi duyanların eleştirilerine sunuyoruz. Eleştiriler için şimdiden teşekkürler (0-542-525 42 87).

LİTERATÜR

- ✓ Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL – Prof. Dr. Taner DERBENTLİ
“Termodinamik” McGraw - Hill. Literatür Yayıncılık 1996
- ✓ Prof. Dr. Ahmet Rasim BÜYÜKTÜR “Termodinamik” Uludağ Üniversitesi
1985
- ✓ Prof. Dr. Cahit ÖZGÜR “Deneysel Hidromekanik” İ.T.Ü. Kütüphanesi 1966
- ✓ Prof. Dr. Nuri A. AKÇİN – Mak. Y. Müh. Tuncer ÖZKAN “Hava
Patlamalı Kazı Sisteminin Mekanığı” 3. Delme ve Patlatma Sempozyumu
Bildiriler Kitabı 1998
- ✓ Prof. Dr. Nuri A. AKÇİN – Mak. Y. Müh. Tuncer ÖZKAN “Yüksek
Basıncılı Hava İle Kömür Kazısı” 1.Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve
Sergisi Bildiriler Kitabı 1999
- ✓ M.ten BOSCH – Hilmi İLERİ “Makina Elemanları Hesabı” İ.T.Ü.
Kütüphanesi
Sayı : 721,748
- ✓ DUBBEL “Taschenbuch für den Maschnenbau” Springer-Verlag Berlin
Heidelberg Newyork 1970,1981
- ✓ J.P.DEN HARTOG - Oktay İZMİRLİ “İleri Mukavemet” Arı Kitapevi
Matbaası – 1969
- ✓ Mustafa SAVCI “İleri Mukavemet” İ.T.Ü. Mad.Fak.1984