



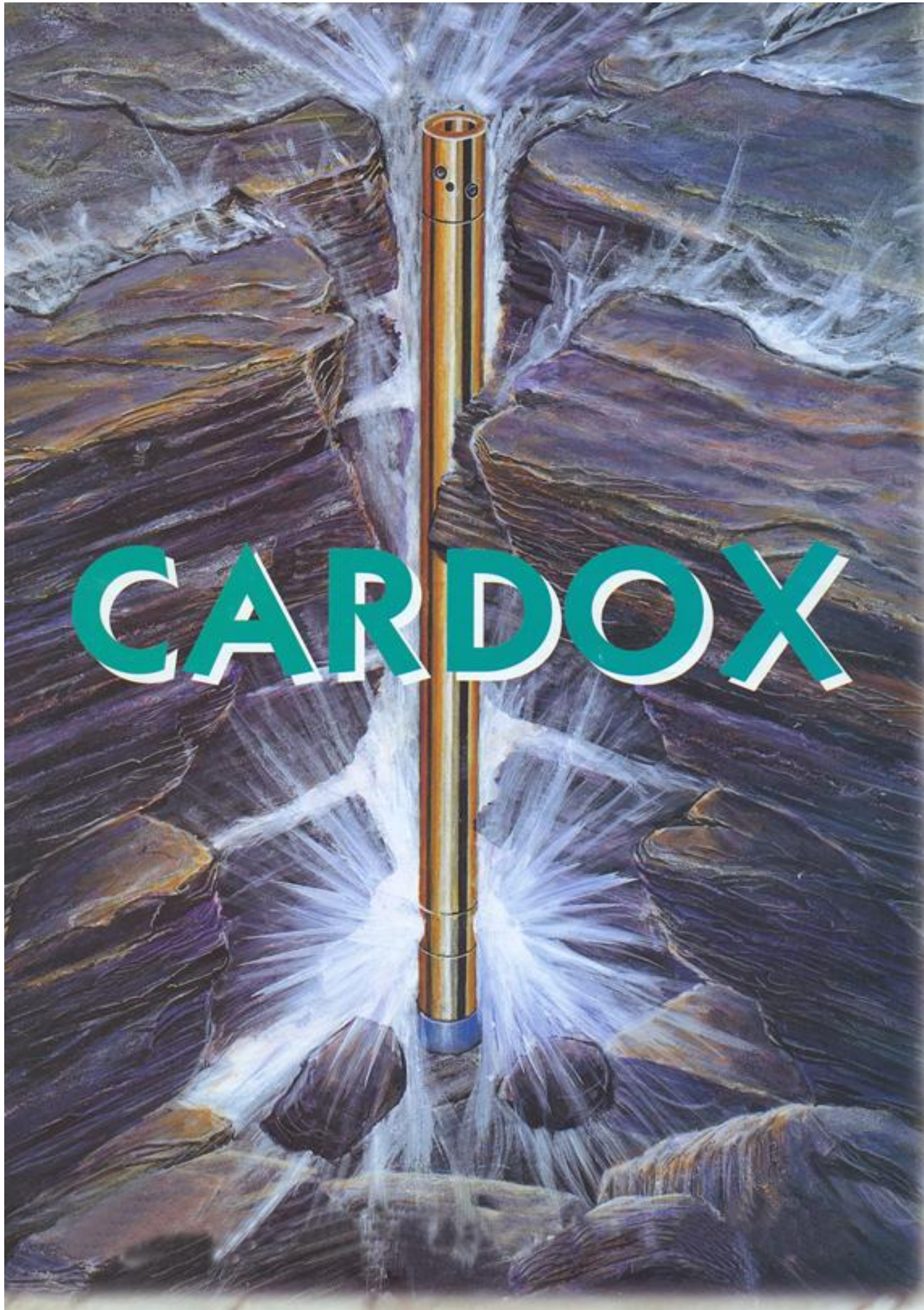
TÜRKİYE TAŞKÖMÜRÜ KURUMU GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

APK DAİRE BAŞKANLIĞI
“Sürdürülebilir Bilgi Paylaşımı VI”

*CO*₂ GAZ PATLATMALI KAZI SİSTEMİ (CARDOX)
MEKANİĞİNİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ
VE
KONİK, SIKTIRMA MEKANİZMASI

Tuncer ÖZKAN - Kadir ÇELİK

HAZİRAN 2008



CARDOX

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	2
CO ₂ GAZ PATLATMALI KAZI SİSTEMİ (CARDOX) MEKANİĞİNİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ	1
Sistemin çalışma prensibi:	1
(1) Hali (İlk hal) :-.....	3
(1-2)Hal değişimi (prosesi) :.....	7
(2-3)Hal değişimi (prosesi) :.....	9
Sonuç :.....	33
Disk patlatma işi.....	36
Örnek : p=2360 bar basınç için,	38
σ_t ve σ_r gerilme diyagramları :.....	40
Dairesel plak analizi:.....	43
CO ₂ Gaz Patlatmalı Kazı Sistemi (CARDOX) Termodinamik Program (HP50g) Sonuçları:	49
Tüpün faydalı uzunluğu :	52
Tüpün ağırlığı :	54
Isıtıcının vermiş olduğu ısı miktarı:	57
Tüp, dış yüzeyinde ısınma kontrolü:	60
Biot Sayısı B _i :.....	60
Fourier sayısı Fo :	61
Konik, sıktırma kovani ve takozu ile ilgili inceleme;.....	72
Konik sıktırma takozu ve kovanının montajı:.....	82
LİTERATÜR	85

CO₂ GAZ PATLATMALI KAZI SİSTEMİ (CARDOX) MEKANİĞİNİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ

Sistemin çalışma prensibi:

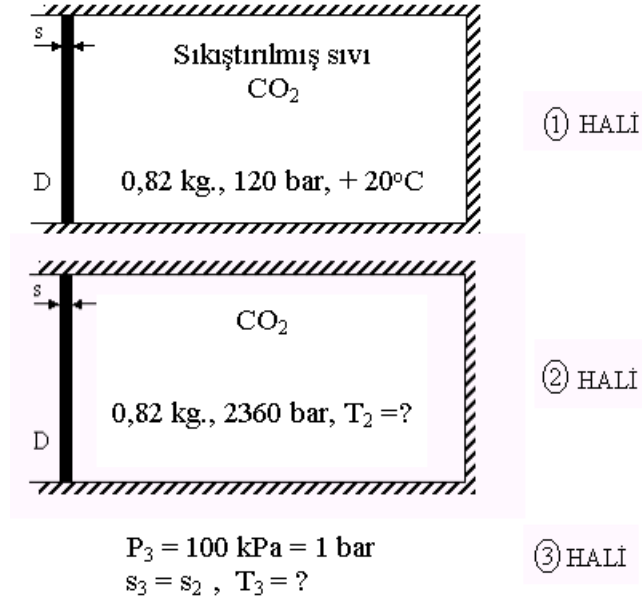
Tüp içindeki sıkıştırılmış sıvı CO₂'nin ısıtılarak gaz haline getirilmesi dolayısıyla genişletilmesi ve bu genişleme işlemi sonunda gaz tarafından yapılan işin (patlama enerjisi) kayaç (kömür, taş v.s) parçalamada kullanılması esasına dayanır.

CARDOX tüpünün özellikleri ;

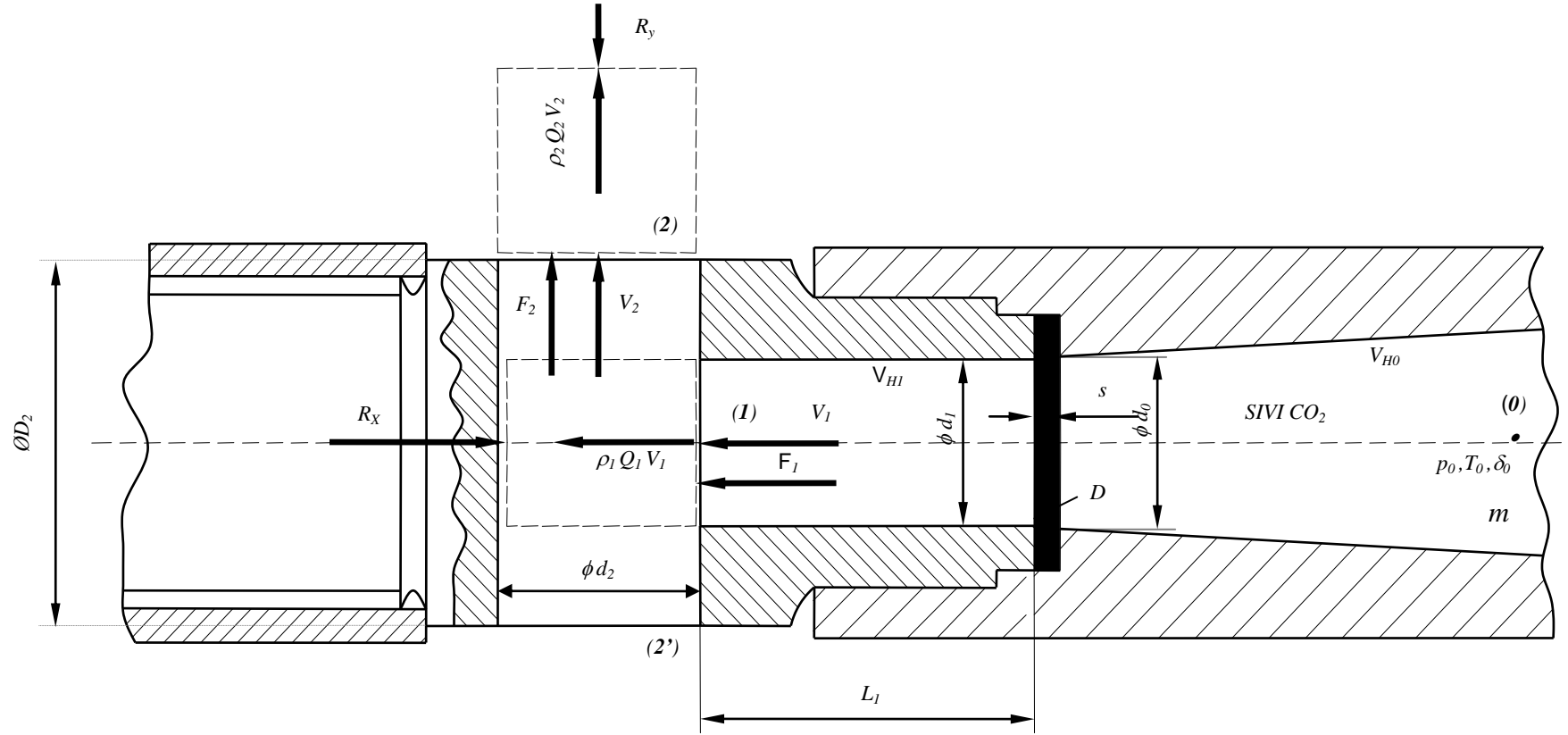
Tüpün tipi	:F57
Nominal çap	:51 mm.
Uzunluk	:1245 mm.
Ağırlık	:12,73 kg.
CO ₂ şarjı	:0,82 kg.

Patlatma basıncı (kg/cm ²)	2360	2760
Disk kalınlığı (mm)	4,4	5,2
Isıtıcı (Kimyasal enerji kaynağı)	D100	D115

Delme matkabının – Jakbit çapı 57 mm



“CARDOX” deşarj kafası ,şekil 1 de gösterilmiştir.



$$d_2 = \phi 25 \text{ mm} \quad d_1 = \phi 23,5 \text{ mm}$$

$$D_2 = \phi 50 \text{ mm} \quad L_1 = 42,5 \text{ mm}$$

$$V_{H1} = 1,8434 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m = 0,82 \text{ kg. sivi } CO_2$$

$$p_0 = 2360 \text{ bar.}$$

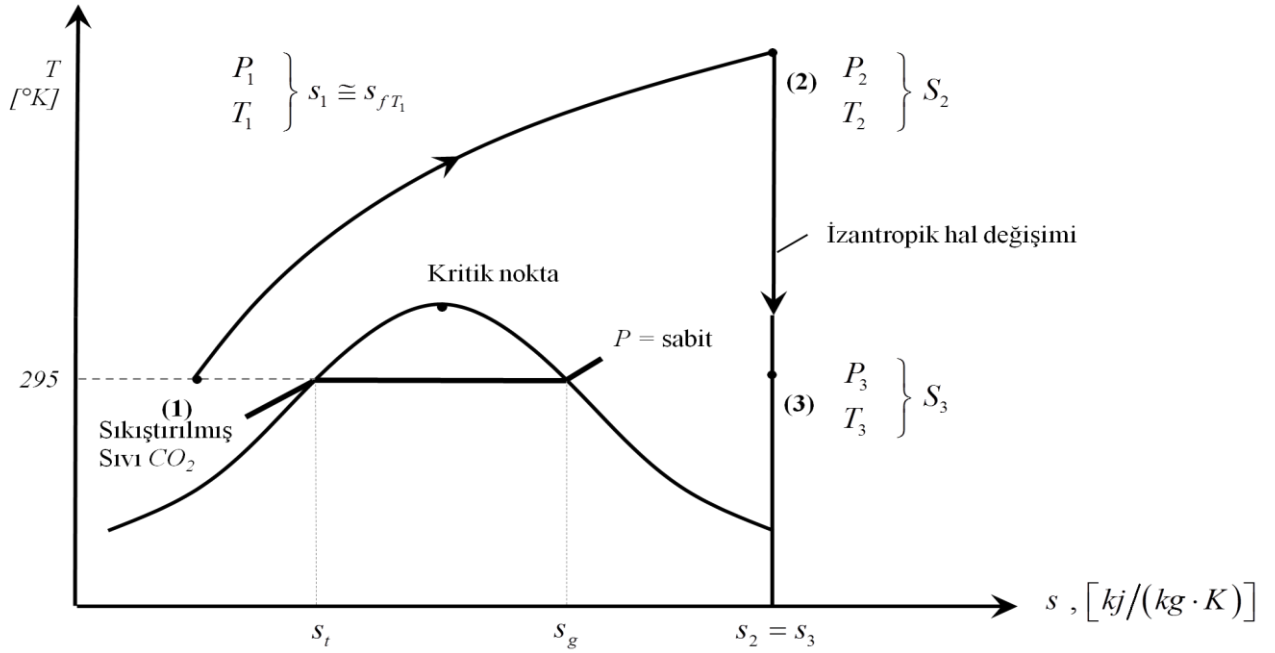
$$d_0 = \phi 23,5 \text{ mm}$$

$$V_{H0} = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$s = 4,4 \text{ mm}$$

Şekil 1. : "CARDOX" deşarj kafası

Problemin T-s diyagramında gösterimi (Şekil 2);



Şekil 2. :T-s diyagramı (şematik)

(1) Hali (İlk hal) :-

Tüp içine $-20^{\circ}C$ sıcaklık ve 120 bar basınçta $m= 0,82 \text{ kg.}$ sıvı CO_2 doldurulur (Dolum tesisinde). Daha sonra bu sıcaklık, çevre ortam sıcaklığına ($+20^{\circ}C$) yükselir.

Tüp içindeki CO_2 başlangıçta sıkıştırılmış sıvıdır, çünkü basıncı verilen sıcaklıktaki doyma basıncından daha yüksektir.

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 12 \text{ Mpa} \\ T_1 = 295^{\circ}K \end{array} \right\} (1 \text{ Hali})$$

CO_2 , Karbon dioksit'in doyma basıncı,

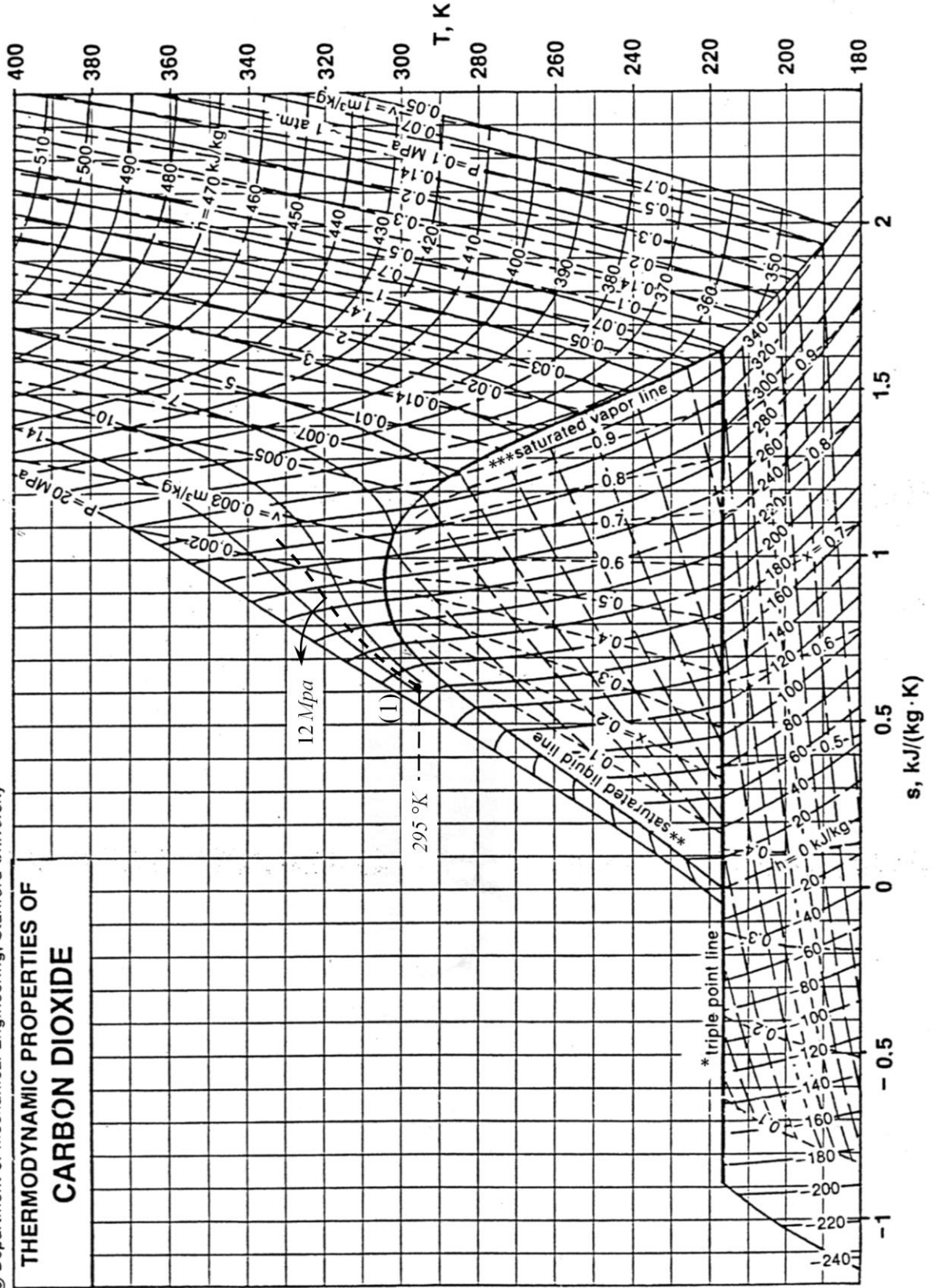
$295 \text{ }^{\circ}K$ için ,

$$\underline{\underline{P_{doyma} = 5,977 \text{ MPa}}} \quad (\text{Tablo 1 ; Şekil 3})$$

$$\underline{\underline{P_1 (=12 \text{ MPa})}} > \underline{\underline{P_{doyma,295 \text{ K}} (=5,977 \text{ MPa})}}$$

olduğu görülür.

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CARBON DIOXIDE



Şekil 3. Karbondioksit' in termodinamik özellikleri (CO_2 'nin T-s diyagramı)
* Üçlü nokta doğrusu (üçlü doğru)
** Doymuş sıvı eğrisi
***Doymuş buhar eğrisi

Tablo 1. Karbondioksit'in özellikleri. v_f – Doymuş sıvı CO_2 'nin özgül hacmi. v_g – Doymuş CO_2 buharının özgül hacmi. h_f – Doymuş sıvı CO_2 'nin özgül entalpisi. h_g – Doymuş CO_2 buharının özgül entalpisi. s_f – Doymuş sıvı CO_2 'nin özgül entropisi. s_g – Doymuş CO_2 buharının özgül entropisi.**DOYMUŞ KARBONDİYOKSİT'İN ÖZELLİKLERİ**

T K	P MPa	ÖZGÜL HACİM, m^3/kg		h_f	ENTALPI, kJ/kg			ENTROPI, kJ/(kg·K)		
		v_f	v_g		h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
216.54	0.5173	0.000847	0.07278	0.0	351.87	351.87	0.0	1.6250	1.6250	
220	0.6000	0.000857	0.06314	7.00	346.12	353.12	0.0318	1.5732	1.6050	
225	0.7366	0.000871	0.05181	17.52	337.21	354.73	0.0785	1.4987	1.5772	
230	0.8949	0.000885	0.04287	28.07	328.02	356.09	0.1243	1.4262	1.5505	
235	1.077	0.000901	0.03573	38.52	318.67	357.19	0.1685	1.3561	1.5246	
240	1.285	0.000918	0.02997	48.90	309.10	358.00	0.2114	1.2879	1.4993	
245	1.521	0.000936	0.02527	59.32	299.16	358.48	0.2535	1.2210	1.4745	
250	1.788	0.000956	0.02140	69.85	288.74	358.59	0.2950	1.1550	1.4500	
255	2.087	0.000977	0.01820	80.57	277.72	358.29	0.3363	1.0891	1.4254	
260	2.421	0.001001	0.01552	91.49	266.04	357.53	0.3774	1.0233	1.4007	
265	2.792	0.001027	0.01325	102.66	253.57	356.23	0.4186	0.9568	1.3754	
270	3.204	0.001056	0.01133	114.16	240.13	354.29	0.4600	0.8893	1.3493	
275	3.659	0.001090	0.009675	126.12	225.45	351.57	0.5020	0.8199	1.3219	
280	4.160	0.001129	0.008242	138.72	209.16	347.88	0.5455	0.7470	1.2925	
285	4.711	0.001177	0.006982	152.21	190.69	342.90	0.5910	0.6691	1.2601	
290	5.314	0.001239	0.005854	166.95	169.14	336.09	0.6397	0.5832	1.2229	
295	5.977	0.001324	0.004808	183.67	142.61	326.28	0.6939	0.4835	1.1774	
300	6.706	0.001471	0.003749	205.06	104.89	309.95	0.7624	0.3496	1.1120	
304.21	7.383	0.002155	0.002155	257.31	0.0	257.31	0.9312	0.0	0.9312	

GAZ KARBONDİYOKSİT'İN ÖZELLİKLERİ

P, MPa (T_{DOYMA}, K)		T, K								
		DOYMA	300	400	500	600	700	800	900	1000
1.0 (233.0)	$v, m^3/kg$	0.03844	0.05379	0.07418	0.09376	0.1130	0.1322	0.1513	0.1703	0.1893
	$h, kJ/kg$	356.78	419.95	513.65	613.22	718.90	829.90	945.34	1064.46	1186.61
	$s, kJ/(kg·K)$	1.5350	1.7737	2.0430	2.2649	2.4574	2.6284	2.7825	2.9228	3.0515
2.0 (253.6)	$v, m^3/kg$	0.01903	0.02535	0.03640	0.04654	0.05638	0.06608	0.07571	0.08529	0.09484
	$h, kJ/kg$	358.42	409.41	508.45	610.01	716.73	828.37	944.25	1063.68	1186.07
	$s, kJ/(kg·K)$	1.4323	1.6174	1.9025	2.1289	2.3233	2.4954	2.6500	2.7907	2.9196
5.0 (287.5)	$v, m^3/kg$	0.00641	0.00779	0.01374	0.01824	0.02241	0.02643	0.03039	0.03429	0.03817
	$h, kJ/kg$	339.84	366.98	492.26	600.43	710.37	823.93	941.10	1061.45	1184.53
	$s, kJ/(kg·K)$	1.2426	1.3351	1.6993	1.9407	2.1410	2.3160	2.4724	2.6141	2.7438
10. (304.2)	$v, m^3/kg$			0.00620	0.00885	0.01112	0.01325	0.01530	0.01731	0.01929
	$h, kJ/kg$			463.19	584.73	700.24	816.97	936.20	1058.02	1182.21
	$s, kJ/(kg·K)$			1.5127	1.7846	1.9952	2.1751	2.3343	2.4777	2.6086
20. (304.2)	$v, m^3/kg$			0.00262	0.00426	0.00554	0.00670	0.00779	0.00885	0.00988
	$h, kJ/kg$			403.03	555.30	681.94	804.67	927.73	1052.23	1178.42
	$s, kJ/(kg·K)$			1.2634	1.6054	1.8366	2.0258	2.1901	2.3367	2.4697

SIVI KARBONDİYOKSİT'İN ÖZELLİKLERİ

P MPa (P_{DOYMA}, MPa)		T, K								
		220	230	240	250	260	270	280	290	300
DOYMA	$\rho, kg/m^3$	1167.5	1129.5	1089.2	1046.2	999.36	946.94	885.60	807.37	680.04
	$h, kJ/kg$	7.00	28.07	48.90	69.85	91.49	114.16	138.72	166.95	205.06
	$s, kJ/(kg·K)$	0.0318	0.1243	0.2114	0.2950	0.3774	0.4600	0.5455	0.6397	0.7624
2.0	$\rho, kg/m^3$	1170.7	1132.4	1091.6	1047.1					
	$h, kJ/kg$	7.36	28.25	48.93	69.83					
	$s, kJ/(kg·K)$	0.0279	0.1208	0.2088	0.2941					
5.0	$\rho, kg/m^3$	1177.1	1140.1	1101.0	1059.1	1012.9	960.20	895.48		
	$h, kJ/kg$	8.15	28.81	49.18	69.64	90.67	112.85	137.37		
	$s, kJ/(kg·K)$	0.0199	0.1118	0.1984	0.2820	0.3644	0.4481	0.5373		
10.	$\rho, kg/m^3$	1187.2	1152.0	1115.3	1076.7	1035.2	989.97	939.00	878.96	802.05
	$h, kJ/kg$	9.59	29.94	49.88	69.75	89.87	110.59	132.36	155.97	183.07
	$s, kJ/(kg·K)$	0.0073	0.0977	0.1826	0.2637	0.3426	0.4208	0.4999	0.5827	0.6746

- Akışkana ait özellikler ;

Özgül hacim \mathcal{G}_1 ,

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 12MPa \\ T_1 = 20^{\circ}C \end{array} \right\} \underline{\underline{\mathcal{G}_1 \cong 0,001 m^3/kg}} \quad (\text{Şekil 3})$$

veya ,

$$\underline{\underline{\mathcal{G}_1 \cong \mathcal{G}_{f,295^{\circ}K} = 0,001324m^3 / kg}} \quad (\text{Tablo 1})$$

hesaplayabiliriz de ,

“CARDOX” tüpünün hacmi

$$V_{HO} \cong 7,25 \cdot 10^{-4} m^3$$

olduğuna göre

$$\mathcal{G}_1 = \frac{V_{HO}}{m} = \frac{7,25 \cdot 10^{-4}}{0,82} = 8,84 \cdot 10^{-4} m^3 / kg$$

$$\underline{\underline{\mathcal{G}_1 = 0,000884m^3 / kg}}$$

bulunur ki, $0,001 m^3/kg$. değerine çok yakındır.

- Özgül entalpi h_1 ,

$$\underline{\underline{h_1 \cong h_{f,295^{\circ}K} = 183,67kj / kg}} \quad (\text{Tablo 1}), (\text{Şekil 3})$$

- Özgül entropi s_1 ,

$$\underline{\underline{s_1 \cong s_{f,295^{\circ}K} = 0,6939kj / kg}} \quad (\text{Tablo 1}), (\text{Şekil 3})$$

- Özgül iç enerji u_1 ,

Tablolarda iç enerji değerlerinin verilmemesi durumunda iç enerji ,

$$u_1 = h_1 - P_1 \cdot \mathcal{G}_1 \quad (1)$$

bağıntısından hesaplanabilir.

$$u_1 = 183,67 (kj / kg) - 12000 (kPa) \cdot 0,000884 (m^3 / kg)$$

$$1kj = 1kPa \cdot m^3$$

$$\underline{\underline{u_1 = 173kj / kg}}$$

(1-2)Hal değişimi (prosesi) :

Ateşleme manyetosu (600V,0,8...1,2 A) ile tp içindeki ısıtıcının (Kimyasal enerji kaynağı) devreye girmesiyle sıvı haldeki CO_2 ısınır ve gaz haline geçerek basıncını 2360 bar'a yükseltir.

Hal değişimi sırasında tpe giren veya çıkan kütle olmadığı için, kapalı bir sistem söz konusudur. Tp içindeki CO_2 yi sistem olarak alalım. Şu halde ,

Sistem : 0,82 kg CO_2 (KAPALI SİSTEM)

Hareketsiz kapalı sistem,

$$\Delta KE \cong \Delta PE \cong 0 \quad (2)$$

ve herhangi bir iş etkileşimi de olmadığı göz önüne alınırsa, birinci yasa bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir :

$$Q - W^0 = \Delta U + \cancel{\Delta KE}^0 + \cancel{\Delta PE}^0 \quad (3)$$

$$Q = \Delta U$$

$$Q_{12} = m(u_2 - u_1) \text{ (kj)} \quad (4)$$

(2) Halinde, $P_2=2360$ bar olup hal değişimi sabit hacimde gerçekleşmektedir, bu nedenle;

$$\underline{\underline{g_1 = g_2 = 0,000884 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

olur.

CO_2 , Karbon dioksit'in mkemmел gaz varsayımıyla özellikleri :

- Mkemmел –gaz özgül ısıları ;

Sabit basınçta ,

$$C_{p0} = 0,846 \text{ kj}/(\text{kg.K})$$

Sabit hacimde ,

$$C_{g0} = 0,657 \text{ kj}/(\text{kg.K})$$

- Gaz sabiti ,

$$R = 0,1889 \text{ kj}/(\text{kg.K})$$

- Özgül ısıları oranı ;

$$k = 1,289$$

Mkemmел gaz hal denklemini (2) haline uygularsak T_2 sıcaklığı kolaylıkla belirlenir.

$$P_2 \cdot g_2 = R \cdot T_2 \quad \rightarrow \quad T_2 = \frac{236000 \cdot 0,000884}{0,1889} \quad (5)$$

$$\underline{\underline{T_2 = 1104,4^\circ K}}$$

Şimdi , u_2 özgül iç enerji değerini yaklaşık hesap yöntemiyle bulalım :

Tablo 1 veya Şekil 3 ten faydalanarak 295 °K için ;

$$h_{g,295^\circ K} = 326,28 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$g_{g,295^\circ K} = 0,004808 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$P_{doyma,295^\circ K} = 5,977 \text{ MPa}$$

$$u_{g,295^\circ K} = h_{g,295^\circ K} - P_{doyma,295^\circ K} \cdot g_{g,295^\circ K}$$

$$u_{g,295^\circ K} = 326,28 - 5977 \cdot 0,004808$$

$$\underline{\underline{u_{g,295^\circ K} = 297,54 \text{ kJ} / \text{kg}}}$$

ve

$$\underline{\underline{u_2 - u_{g,295^\circ K} = C_{go} \cdot (T_2 - T_1)}}$$

denklemden ,

$$u_2 = 297,54 + 0,657 \cdot (1104,4 - 295)$$

$$\underline{\underline{u_2 = 829,3 \text{ kJ} / \text{kg}}}$$

olarak hesaplanır.

Böylece (1-2) hal değişimi sırasında gerçekleşen ısı geçişi (Isıtıcının vermiş olduğu ısı) ,

$$Q_{12} = m(u_2 - u_1) = 0,82 \cdot (829,3 - 173)$$

$$\underline{\underline{Q_{12} = 538 \text{ kJ}}}$$

olur.

(1-2) hal değişimi sırasında entropi değişimini de yaklaşık hesap yöntemiyle bulabiliriz. Kapalı bir sistem için entropi denge denklemi ,

$$\Delta S = m \cdot \Delta s \cong \frac{Q_{12}}{T_{ort.12}} + S_{\text{üretim}} \quad (6)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada ,

$$S_{\text{üretim}} = 0 \quad (\text{Tersinir haldeğişimi})$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 \text{ (kJ} / \text{K)}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 \text{ [kJ} / \text{(kg.K)]}$$

$$m \cdot (s_2 - s_1) = \frac{Q_{12}}{T_{ort.12}}$$

$$s_2 = s_1 + \frac{Q_{12}}{m \cdot T_{ort.12}}$$

$$T_{ort.12} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{295 + 1104,4}{2}$$

$$\underline{\underline{T_{ort.12} \cong 700^\circ K}}$$

ve

$$s_2 = 0,6939 + \frac{538}{0,82 \cdot 700}$$

$$\underline{\underline{s_2 = 1,631 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})}}$$

elde edilir.

(2-3)Hal değişimi (prosesi) :

$P_2=2360$ bar basınç ve $T_2=1104,4^\circ K$ sıcaklıktaki CO_2 gazı, s kalınlığındaki D diskini (patlatma diski) patlatıp genişler. Genişleyen gaz değarj kafasından geçerek kayaç (kömür, taş, v.s) içine fışırır.

$$P_3 = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

Genişlemenin (2-3 hal değişimi) izantropik (sabit entropili) olduğunu kabul edelim.

$$s_2 = s_3$$

olur.

1.nci yasayı yazalım. ($\Delta KE \cong \Delta PE \cong 0$ ile),

$$Q_{23} - W_{23} = (\Delta U)_{23} = m \cdot (u_3 - u_2)$$

Burada ,

$$Q_{23} = 0 \text{ (Kısa süreli, adyabatik)}$$

dolayısıyla , (2-3) izantropik genişleme işi ;

$$W_{23} = m \cdot (u_2 - u_3)$$

veya ,

$$W_{23} = m \cdot C_{\rho o} \cdot (T_2 - T_3) \quad (7)$$

denkleminde hesaplanabilir.

Mükemmel gazların entropi değişimlerini sabit özgül ısı varsayımıyla ifade eden bağıntılardan ,

$$s_3 - s_2 = C_{po} \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} - R \cdot \ln \frac{P_3}{P_2} \quad [kj/(kg \cdot K)] \quad (8)$$

yazılır, (2) ve (3) hallerinin mükemmel gaz olduğu kabul edilirse,

$$s_3 - s_2 = 0$$

$$C_{po} \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} - R \cdot \ln \frac{P_3}{P_2} = 0$$

$$C_{po} \ln \frac{T_3}{T_2} = R \cdot \ln \frac{P_3}{P_2}$$

$$\frac{R}{C_{po}} = \frac{k-1}{k}$$

olduğuna göre,

$$\ln \frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{k-1}{k} \right) \cdot \ln \frac{P_3}{P_2}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

elde edilir. Hesaplayalım ,

$$\frac{T_3}{1104,4} = \left(\frac{1}{2360} \right)^{\frac{1,289-1}{1,289}}$$

$$\underline{\underline{T_3 = 193,6^o K}}$$

böylece, (2-3) izantropik genişleme işi (patlama enerjisi)

$$W_{23} = m \cdot C_{90} \cdot (T_2 - T_3) = 0,82 \cdot 0,657 \cdot (1104,4 - 193,6)$$

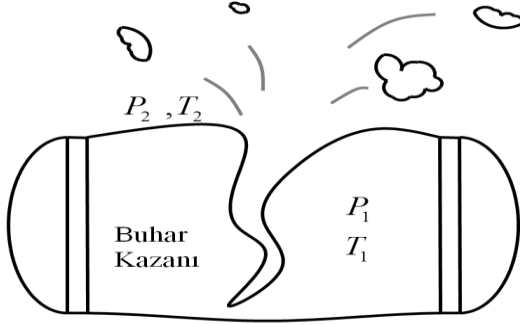
$$\underline{\underline{W_{23} = 490,6kj}}$$

bulunur (D diskinin patlaması için gerekli olan iş – disk patlatma işi – göz önüne alınmamıştır). Patlama enerjisini, Prof. Dr. Yunus ÇENGEL - Prof. Dr. Taner DERBENTLİ hocalarımın ‘TERMODİNAMİK’ kitabından alıntı yaparak hesaplayalım.

1800’lü yıllarda ve 1900’lerin başlarında buhar kazanlarının patlamaları sonucu bir çok insanın yaşamını yitirmesi , 1915 yılında ASME kazan ve basınçlı kaplar standardının hazırlanmasına yol açtı. Basınçlı kaptaki akışkanın, patlamadan kısa bir süre sonra çevreyle denge haline geleceği düşünülürse, basınç altındaki akışkanın, adyabatik olarak genişleyerek çevre koşullarına gelmesi sırasında yaptığı iş, basınçlı akışkanın “**patlama enerjisi**” diye tanımlanabilir. Patlamanın çok kısa bir süre alması ve sonrasında görülen denge hali, patlamanın kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edildiği adyabatik bir hal değişimi olarak ele alınmasını geçerli kılar.Kapalı sistem için enerjinin korunumu denklemi;

$$-W = m \cdot (u_2 - u_1)$$

şeklini alır. Patlama enerjisi de bu durumda,



$$E_{\text{patlama}} = m \cdot (u_1 - u_2)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada 1 ve 2 halleri akışkanın patlamadan önceki ve sonraki hallerini göstermektedir. Özgül patlama enerjisi, genellikle birim hacme göre tanımlanmıştır ve yukarıdaki değeri toplam hacim V ile bölerek bulunabilir.

$$e_{\text{patlama}} = \frac{u_1 - u_2}{\mathcal{G}_1} \quad (10)$$

Burada \mathcal{G}_1 akışkanın patlamadan önceki özgül hacmi olmaktadır. Sabit özgül ısıları olan mükemmel bir gaz için, özgül patlama enerjisini veren bağıntıyı bulalım :

Bir hal değişimi sırasında mükemmel gazın iç enerji değişimi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir ;

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 C_g \cdot (T) \cdot dt \cong C_{g,ort} \cdot (T_2 - T_1)$$

dolayısıyla,

$$u_1 - u_2 \cong C_{g,ort} \cdot (T_1 - T_2) = C_{g,ort} \cdot T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

yazılır ve,

$$C_{g,ort} = R \cdot \frac{1}{k-1}$$

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

mükemmel gazlar ile ilgili denklemlerden faydalanarak,

$$u_1 - u_2 = R \cdot \frac{1}{k-1} \cdot T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$u_1 - u_2 = \frac{1}{k-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\underline{e_{patlama} = \frac{u_1 - u_2}{v_1} = \frac{p_1}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)} \quad \frac{e_{patlama}}{kJ/m^3} \left| \frac{p_1}{kPa} \right| \frac{e_{patlama}}{kJ} \quad (11)$$

bulunur. ($1kj=1kpa \cdot m^3$)

Patlama enerjisi de ($E_{patlama}$), özgül patlama enerjisi ($e_{patlama}$) ile toplam hacim (V)'nin çarpımıyla bulunabilir.

$$\underline{E_{patlama} = e_{patlama} \cdot V} \quad \frac{E_{patlama}}{kJ} \left| \frac{e_{patlama}}{kJ/m^3} \right| \frac{V}{m^3} \quad (12)$$

Bu denklem kullanılır ise,

$$(2) \text{ Hali} \rightarrow P_2 = 2360 \text{ bar} = 236000 \text{ kPa} \quad (\text{Sayfa 1})$$

$$T_2 = 1104,4^\circ K \quad (\text{Sayfa 8})$$

$$(3) \text{ Hali} \rightarrow P_3 = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} \quad (\text{Sayfa 1})$$

$$T_3 = 193,6^\circ K \quad (\text{Sayfa 11})$$

V-‘CARDOX’ tüpünün hacmi

$$V \cong 7,25 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (\text{Sayfa 6})$$

$$E_{patlama} = e_{patlama} \cdot V = \frac{p_2}{k-1} \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \cdot V$$

$$E_{patlama} = \frac{236000}{1,289-1} \left(1 - \frac{193,6}{1104,4}\right) \cdot 7,25 \cdot 10^{-4}$$

$$\underline{E_{patlama} = 488 \text{ kJ}}$$

elde edilir ki, daha önce hesapladığımız

$$W_{23} = 490,6 \text{ kJ} \quad (\text{Şekil 11})$$

Değerine çok yakın olduğu görülür.

“CARDOX” deşarj kafasını (Şekil 1) ele alalım ve şekildeki sembollerle izantropik bir süreç için sistemi biraz daha irdeleyelim :

➤ (0) noktasında akışkana ait büyüklükler :

• ρ_o yoğunluğu ;

$$\rho_o = \frac{m}{V_{Ho}} = \frac{0,82}{7,25 \cdot 10^{-4}}$$

$$\underline{\underline{\rho_o \cong 1131 \text{ kg} / m^3}}$$

- T_0 sıcaklığı ;

$$T_0 = \frac{P_0}{R \cdot \rho_0} = \frac{2360 \cdot 10^5}{188,9 \cdot 1131}$$

$$\underline{\underline{T_0 = 1104,6^\circ K}}$$

- (1) noktasında akışkana ait büyüklükler :

Genişleyen gaz (1) kesitinden geçerek (2) ve (2') kesitlerinden kayaç içine fişkirir. (0) noktasından (1) noktasına bir çok “sanki – dengeli hal değişimleri” ile gidilebileceği kabulü ile ;

- P_1 basıncı ;

$$P_o \cdot V_{HO}^k = P_1 \cdot (V_{HO} + V_{H1})^k$$

$$P_1 = 2360 \cdot \left(\frac{7,25 \cdot 10^{-4}}{7,25 \cdot 10^{-4} + 1,8434 \cdot 10^{-5}} \right)^{1,289}$$

$$\underline{\underline{P_1 \cong 2285 \text{ bar}}}$$

- T_1 sıcaklığı ;

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \rightarrow T_1 = 1104,6 \cdot \left(\frac{2285}{2360} \right)^{\frac{1,289-1}{1,289}}$$

$$\underline{\underline{T_1 = 1096,6^\circ K}}$$

- ρ_1 ;

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R \cdot T_1} = \frac{2285 \cdot 10^5}{188,9 \cdot 1096,6}$$

$$\underline{\underline{\rho_1 = 1103 \text{ kg} / \text{m}^3}}$$

- V_1 hızı ;

$$C_{po} \cdot T_o + \frac{V_o^2}{2} = C_{po} \cdot T_1 + \frac{V_1^2}{2}$$

$$V_o \cong 0$$

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot C_{po} \cdot (T_o - T_1)} = \sqrt{2 \cdot 846 \cdot (1104,6 - 1096,6)} \quad (13)$$

$$\underline{\underline{V_1 \cong 116 \text{ m} / \text{s}}}$$

➤ (2) noktasında akışkana ait büyüklükler :

- Süreklilik denklemi (Deşarj kafasının 1 ve 2 kesitleri arasında)

$$A_1 \cdot \rho_1 \cdot V_1 = 2 \cdot A_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2 \quad (14)$$

$$A_1 \cdot \frac{P_1}{R \cdot T_1} \cdot V_1 = 2 \cdot A_2 \cdot \frac{P_2}{R \cdot T_2} \cdot V_2$$

$$2 \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

- Enerji denklemi (1 ve 2 konumu veya 1 ve 2 noktaları arasında)

$$C_{po} \cdot T_1 + \frac{V_1^2}{2} = C_{po} \cdot T_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$2 \cdot C_{po} \cdot (T_1 - T_2) = V_2^2 - V_1^2$$

$$2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_1 - T_2) = V_1^2 \cdot \left(\frac{V_2^2}{V_1^2} - 1 \right)$$

$$\frac{V_2^2}{V_1^2} - 1 = \frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R}{V_1^2} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\frac{V_2^2}{V_1^2} = \frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R}{V_1^2} \cdot T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) + 1$$

- İzentropik hal değişimi ;

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

Bu denklemlerden ,

$$2 \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$2 \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$4 \cdot \frac{V_2^2}{V_1^2} = \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{2}{k-1}}$$

$$\frac{1}{4} \cdot \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{2}{k-1}} = \frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R}{V_1^2} \cdot T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) + 1$$

$$\frac{T_1}{T_2} = x \text{ olsun.}$$

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{23,5}{25} \right)^4 \cdot x^{\frac{2}{0,289}} = \frac{2 \cdot \frac{1,289}{0,289} \cdot 188,9}{(116)^2} \cdot 1096,6 \cdot \left(1 - \frac{1}{x} \right) + 1$$

$$0,1952 \cdot x^{\frac{2}{0,289}} = 137,325 \cdot \left(1 - \frac{1}{x} \right) + 1$$

$$0,1952 \cdot x^{\frac{2,289}{0,289}} = 138,325 \cdot x - 137,325$$

$$x^{7,92} - 708,63 \cdot x + 703,5 = 0$$

$$x_1 = 0,99410732051$$

$$x_2 = 2,38891804385$$

$$\frac{T_1}{T_2} = x_1 \rightarrow \frac{1096,6}{T_2} = x_1 \rightarrow T_2 = 1103^\circ K$$

$$\frac{T_1}{T_2} = x_2 \rightarrow \frac{1096,6}{T_2} = x_2 \rightarrow T_2 = 459^\circ K$$

$T_2 > T_1$ olamaz

$$\underline{\underline{T_2 = 459^\circ K}}$$

bulunur.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow \frac{2285}{P_2} = \left(\frac{1096,6}{459} \right)^{\frac{1,289}{0,289}}$$

$$\underline{\underline{P_2 = 47bar}}$$

$$\rho_2 = \frac{P_2}{R \cdot T_2} = \frac{47 \cdot 10^5}{188,9 \cdot 459}$$

$$\underline{\underline{\rho_2 = 54,2kg / m^3}}$$

$$2 \cdot C_{p0} \cdot (T_1 - T_2) = V_2^2 - V_1^2$$

$$V_2^2 = 116^2 + 2 \cdot 846 \cdot (1096,6 - 459)$$

$$\underline{\underline{V_2 \cong 1045m / s}}$$

veya ,

$$C_{po} \cdot T_o + \frac{V_o^2}{2} = C_{po} \cdot T_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot C_{po} \cdot (T_o - T_2)} = \sqrt{2 \cdot 846 \cdot (1104,6 - 459)}$$

$$\underline{\underline{V_2 \cong 1045m/s}}$$

aynı sonuç elde edilir.

➤ İzantropik durma noktasında akışkana ait büyüklükler :

- P_{01} basıncı;

$$P_{01} = \left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_1^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_1 \quad (15)$$

M_1 – Mach sayısı

c_1 – Sesin yayılma hızı

$$V_1 = M_1 \cdot c_1 = M_1 \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_1} \quad (16)$$

$$116 = M_1 \cdot \sqrt{1,289 \cdot 188,9 \cdot 1096,6}$$

$$\underline{\underline{M_1 = 0,2245}}$$

$$P_{01} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot (0,2245)^2 \right]^{\frac{1,289}{0,289}} \cdot 2285$$

$$\underline{\underline{P_{01} = 2360bar}}$$

- P_{02} basıncı ;

$$P_{02} = \left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_2$$

$$V_2 = M_2 \cdot c_2 = M_2 \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}$$

$$1045 = M_2 \cdot \sqrt{1,289 \cdot 188,9 \cdot 459}$$

$$\underline{\underline{M_2 = 3,12}}$$

$$P_{o2} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot (3,12)^2 \right]^{\frac{1,289}{0,289}} \cdot 47$$

$$\underline{\underline{P_{o2} = 2361bar}}$$

$$(P_{o1} \cong P_{o2} = 2360bar)$$

- T_{o1} sıcaklığı ;

$$T_{o1} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_1^2 \right) \cdot T_1 \quad (17)$$

$$T_{o1} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot (0,2245)^2 \right] \cdot 1096,6$$

$$\underline{\underline{T_{o1} = 1104,6^{\circ} K}}$$

- T_{o2} sıcaklığı ;

$$T_{o2} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2 \right) \cdot T_2$$

$$T_{o2} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot (3,12)^2 \right] \cdot 459$$

$$\underline{\underline{T_{o2} = 1104,6^{\circ} K}}$$

$$(T_{o1} = T_{o2} = 1104,6^{\circ} K)$$

- Akışkan etki kuvveti :

Şekil 1 deki, kesikli çizgilerle çevrili olan kontrol hacmine hareket miktarı teoremini uygulayalım ;

- y – ekseni boyunca ;

$$\sum F_y = \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{gy} - \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{gy} \quad (18)$$

$$-R_y + F_2 = 0 - \rho_2 \cdot Q_2 \cdot V_2$$

$$R_y = F_2 + \rho_2 \cdot Q_2 \cdot V_2 = A_2 \cdot P_2 + \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2^2$$

$$R_y = A_2 \cdot (P_2 + \rho_2 \cdot V_2^2) = \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4} \cdot (47 \cdot 10^5 + 54,2 \cdot 1045^2)$$

$$\underline{\underline{R_y \cong 31361N}}$$

- x – eksenini boyunca,

$$\sum F_x = \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{gx} - \sum (\rho \cdot Q \cdot V)_{gx}$$

$$R_x - F_1 = 0 - (-\rho_1 \cdot Q_1 \cdot V_1)$$

$$R_x = F_1 + \rho_1 \cdot Q_1 \cdot V_1 = A_1 \cdot P_1 + \rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1^2$$

$$R_x = A_1 \cdot (P_1 + \rho_1 \cdot V_1^2) = \frac{\pi \cdot 0,0235^2}{4} \cdot (2285 \cdot 10^5 + 1103 \cdot 116^2)$$

$$\underline{\underline{R_x = 105546N}}$$

- Deşarj kafasının tek tarafından çıkan akışkanın birim zamandaki kinetik enerjisi :

$$E_{k1} = \gamma_2 \cdot Q_2 \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot \frac{V_2^2}{2} = \rho_2 \cdot A_2 \cdot \frac{V_2^3}{2} \quad (19)$$

$$E_{k1} = 54,2 \cdot \frac{\pi \cdot (0,025)^2}{4} \cdot \frac{(1045)^3}{2}$$

$$\underline{\underline{E_{k1} = 15180569 Nm / s (Watt)}}$$

- Deşarj kafasının tek tarafından birim zamanda çıkan CO_2 miktarı :

$$\dot{m}_2 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \rho_2 \cdot V_2 \quad (20)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\pi \cdot (0,025)^2}{4} \cdot 54,2 \cdot 1045$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_2 = 27,8kg / s}}$$

Deşarj süresi ;

$$t_2 = \frac{m/2}{\dot{m}_2} = \frac{0,82/2}{27,8} = 14,75 \cdot 10^{-3} \text{ saniye}$$

$$\underline{\underline{t_2 \cong 15 \text{ milisaniye}}}$$

- (1) Kesitinden birim zamanda geçen CO_2 miktarı

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= A_1 \cdot \rho_1 \cdot V_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \rho_1 \cdot V_1 \\ \dot{m}_1 &= \frac{\pi \cdot (0,0235)^2}{4} \cdot 1103 \cdot 116 \\ \dot{m}_1 &= \underline{\underline{55,5 \text{ Kg / s}}}\end{aligned}$$

Deşarj süresi ;

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{m}{\dot{m}_1} = \frac{0,82}{55,5} = 14,77 \cdot 10^{-3} \text{ saniye} \\ t_1 &\cong \underline{\underline{15 \text{ milisaniye}}}\end{aligned}$$

Not : \dot{m}_1 ve \dot{m}_2 değerleri ,

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{M}{\left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2\right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (21)$$

denkleminde de hesaplanabilir.

- Deşarj kafasının tek tarafından çıkan akışkanın yapmış olduğu iş:

$$E_{s1} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot V_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{m}{2}\right) \cdot V_2^2 \quad (22)$$

$$\begin{aligned}E_{s1} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{0,82}{2} \cdot (1045)^2 \\ E_{s1} &= \underline{\underline{223865 \text{ Nm}}}\end{aligned}$$

Kontrol :

$$E_{s1} = E_{k1} \cdot t_2 = 15180569 \cdot 14,75 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{E_{s1} = 223913 \text{ Nm}}} \quad (\text{Hesaplanan} : 223865 \text{ Nm, çok yakın})$$

- Deşarj kafasının iki tarafından çıkan akışkanın yapmış olduğu iş :

$$E_{s2} = 2 \cdot E_{s1} = 2 \cdot 223865$$

$$E_{s2} = 447730Nm$$

$$\underline{\underline{E_{s2} \cong 448kj}}$$

Daha önce, patlama enerjisini

$$\underline{\underline{W_{23} = 490,6kj}} \quad (\text{Sayfa 10})$$

olarak hesaplamıştık.

- Normal şok dalgası :

Akışkan etki kuvveti ,

$$R_y = 31361N$$

olarak hesaplanmıştı (Sayfa : 17).

Küçük olan bu değer, kayaç parçalama için yeterli bir itme kuvveti yani patlatma parametresi değildir. Şok dalga mekanizması etkili olabilir.

(2) noktasında :

- Sesin yayılma hızı ;

$$c_2 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2} = \sqrt{1,289 \cdot 188,9 \cdot 459}$$

$$\underline{\underline{c_2 = 334,3m/s}}$$

- Mach sayısı ;

$$M_2 = V_2/c_2 = 1045/334,3$$

$$\underline{\underline{M_2 = 3,12}}$$

$M > 1$ ise sesüstü (süpersonik) akış söz konusudur. Yani (2) noktasında akış veya CO_2 gazının hızı süpersoniktir.

Deşarj kafasının (2) kesitinde sesüstü hızlara ivmelenen akış, normal bir şok dalgasından geçebilir. Başka bir deyişle şok meydana gelebilmesi için $M > 1$ olmalıdır. Şok dalgasının ardında basınç ve sıcaklık birdenbire yükselir ve hız sesaltı düzeye iner.

CO_2 gazının şoktan önceki özellikleri ; V_2, P_2, T_2 ve ρ_2 şoktan sonraki özellikleri ; V_3, P_3, T_3 ve ρ_3 olsun.

➤ Şoktan sonra akışkana ait büyüklükler :

Önce Mach sayısını hesaplayalım ;

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2}{k \cdot M_2^2 - \frac{k-1}{2}} = \frac{1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot (3,12)^2}{1,289 \cdot (3,12)^2 - \frac{1,289-1}{2}} \quad (23)$$

$$M_3^2 = 0,194$$

$$\underline{\underline{M_3 = 0,44}}$$

• P_3 basıncı ;

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{1 + k \cdot M_2^2}{1 + k \cdot M_3^2} \quad (24)$$

$$P_3 = 47 \cdot \frac{1 + 1,289 \cdot (3,12)^2}{1 + 1,289 \cdot 0,194}$$

$$\underline{\underline{P_3 \cong 509bar}}$$

• T_3 sıcaklığı ;

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot (k-1) \cdot M_2^2}{1 + \frac{1}{2} \cdot (k-1) \cdot M_3^2} \quad (25)$$

$$T_3 = 459 \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot (1,289-1) \cdot (3,12)^2}{1 + \frac{1}{2} \cdot (1,289-1) \cdot 0,194}$$

$$\underline{\underline{T_3 = 1074,5^\circ K}}$$

• ρ_3 yoğunluğu ;

$$\frac{\rho_3}{\rho_2} = \frac{k+1}{\frac{2}{M_2^2} + (k-1)} \quad (26)$$

$$\rho_3 = 54,2 \cdot \frac{1,289+1}{\frac{2}{(3,12)^2} + (1,289-1)}$$

$$\underline{\underline{\rho_3 \cong 251kg / m^3}}$$

- V_3 hızı ;

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{\frac{2}{M_2^2} + (k-1)}{k+1} \quad (27)$$

$$V_3 = 1045 \cdot \frac{\frac{2}{(3,12)^2} + (1,289-1)}{1,289+1}$$

$$\underline{\underline{V_3 = 225,7 \text{ m/s}}}$$

- P_{03} basıncı :

$$P_{03} = \left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_3^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_3$$

$$P_{03} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot 0,44^2 \right]^{\frac{1,289}{0,289}} \cdot 509$$

$$\underline{\underline{P_{03} = 578 \text{ bar}}}$$

- T_{03} sıcaklığı :

$$T_{03} = \left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_3^2 \right] \cdot T_3$$

$$T_{03} = \left[1 + \frac{1,289-1}{2} \cdot 0,44^2 \right] \cdot 1074,5$$

$$\underline{\underline{T_{03} = 1104,6^0 \text{ K}}}$$

Kontroller :

$$\bullet \rho_3 = \frac{P_3}{R \cdot T_3} = \frac{509 \cdot 10^5}{188,9 \cdot 1074,5}$$
$$\underline{\underline{\rho_3 \cong 251 \text{ kg/m}^3}} \quad (\text{Hesaplanan : } 251 \text{ kg/m}^3, \text{ Sayfa : } 21)$$

$$\bullet T_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot C_{po}} = 459 + \frac{(1045)^2}{2 \cdot 846}$$
$$\underline{\underline{T_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot C_{po}} = 1104,4^\circ K}} \quad (\cong T_{o1} = T_{o2} = 1104,6^\circ K)$$

$$\bullet T_3 + \frac{V_3^2}{2 \cdot C_{po}} = 1074,5 + \frac{(225,7)^2}{2 \cdot 846}$$
$$\underline{\underline{T_3 + \frac{V_3^2}{2 \cdot C_{po}} = 1104,6^\circ K}} \quad (= T_{o1} = T_{o2} = 1104,6^\circ K)$$

➤ Kritik Değerler:

Akışkan mach sayısının M=1 değerine eriştiği kesitteki sıcaklık, hız ve basıncın değerleri (kritik değerler) sırasıyla T*, V*, P* olmak üzere;

$$\bullet \frac{T_2}{T^*} = \frac{k+1}{2+(k-1) \cdot M_2^2} \quad (28)$$

$$\bullet \frac{V_2}{V^*} = \frac{\rho^*}{\rho_2} = M_2 \left[\frac{k+1}{2+(k-1) \cdot M_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$\bullet \frac{P_2}{P^*} = \frac{1}{M_2} \left[\frac{k+1}{2+(k-1) \cdot M_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

eşitlikleri yazılabilir.

Hesaplayalım:

$$\bullet \frac{459}{T^*} = \frac{1,289+1}{2+(1,289-1) \cdot 3,12^2}$$

$$\underline{\underline{T^* \cong 965^0 K}}$$

$$\bullet \frac{1045}{V^*} = \frac{\rho^*}{54,2} = 3,12 \cdot \left[\frac{1,289+1}{2+(1,289-1) \cdot 3,12^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

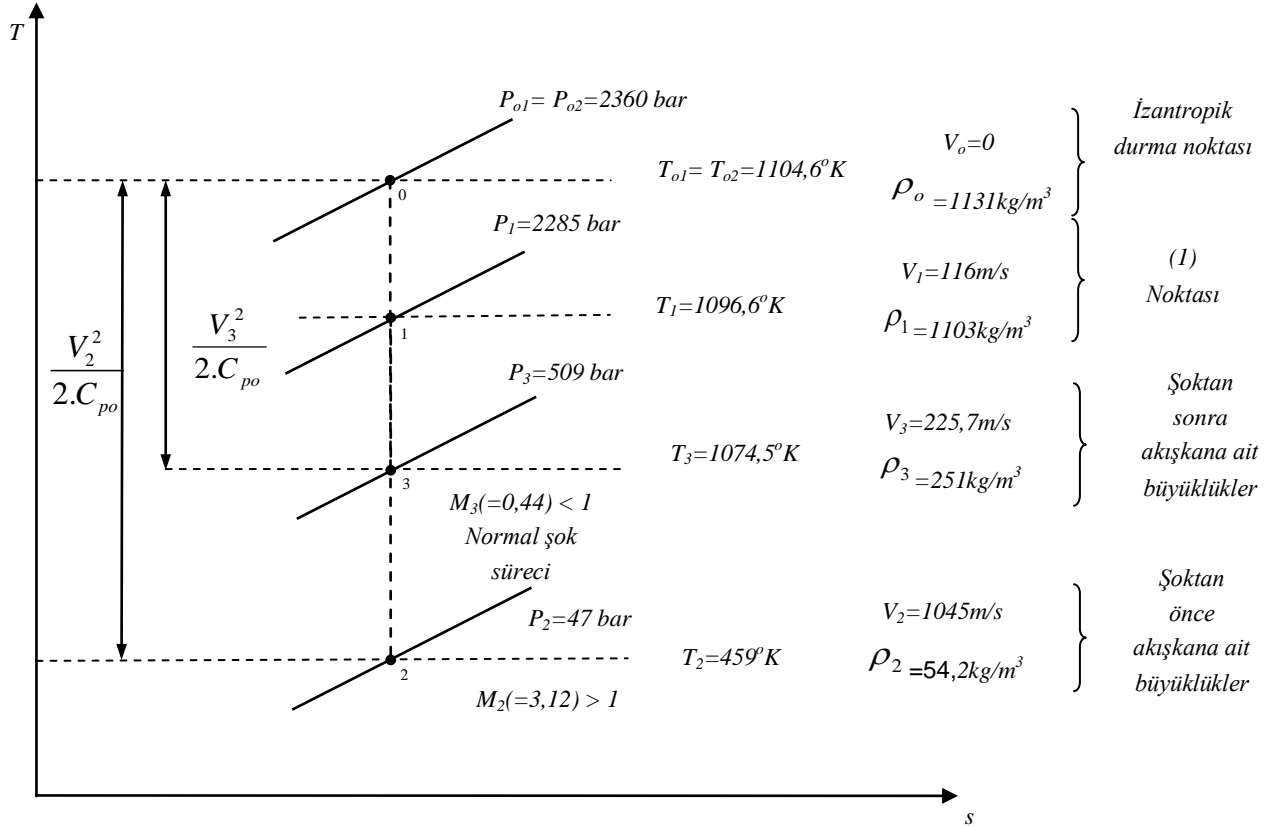
$$\underline{\underline{V^* = 485,7 m/sn}}$$

$$\underline{\underline{\rho^* = 116,6 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\bullet \frac{47}{p^*} = \frac{1}{3,12} \cdot \left[\frac{1,289 + 1}{2 + (1,289 - 1) \cdot 3,12^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\underline{\underline{P^* = 212,6 \text{ bar.}}}$$

Hesaplanan büyüklükler T-s ve h-s diyagramlarında gösterilmiştir



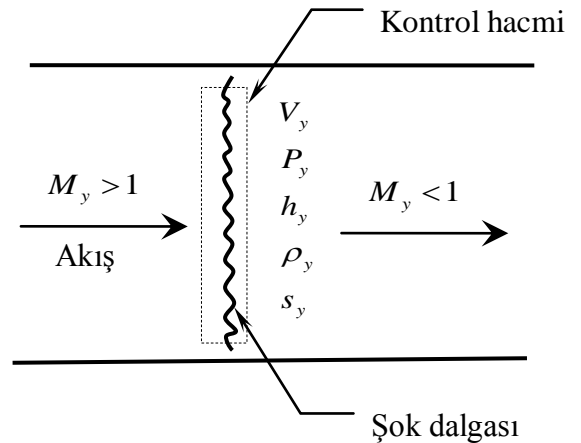
Şekil 4. T-s diyagramı üzerinde normal şok süreci. İzentropik durma hali (Şematik)

Şok dalgasını içine alan kontrol hacmini düşünelim;

- Kütlelen korunumu:
 $\rho_x \cdot A \cdot V_x = \rho_y \cdot A \cdot V_y$
 $\rho_x \cdot V_x = \rho_y \cdot V_y$

- Enerjinin korunumu:
 $h_x + \frac{V_x^2}{2} = h_y + \frac{V_y^2}{2}$
 $h_{ox} = h_{oy}$

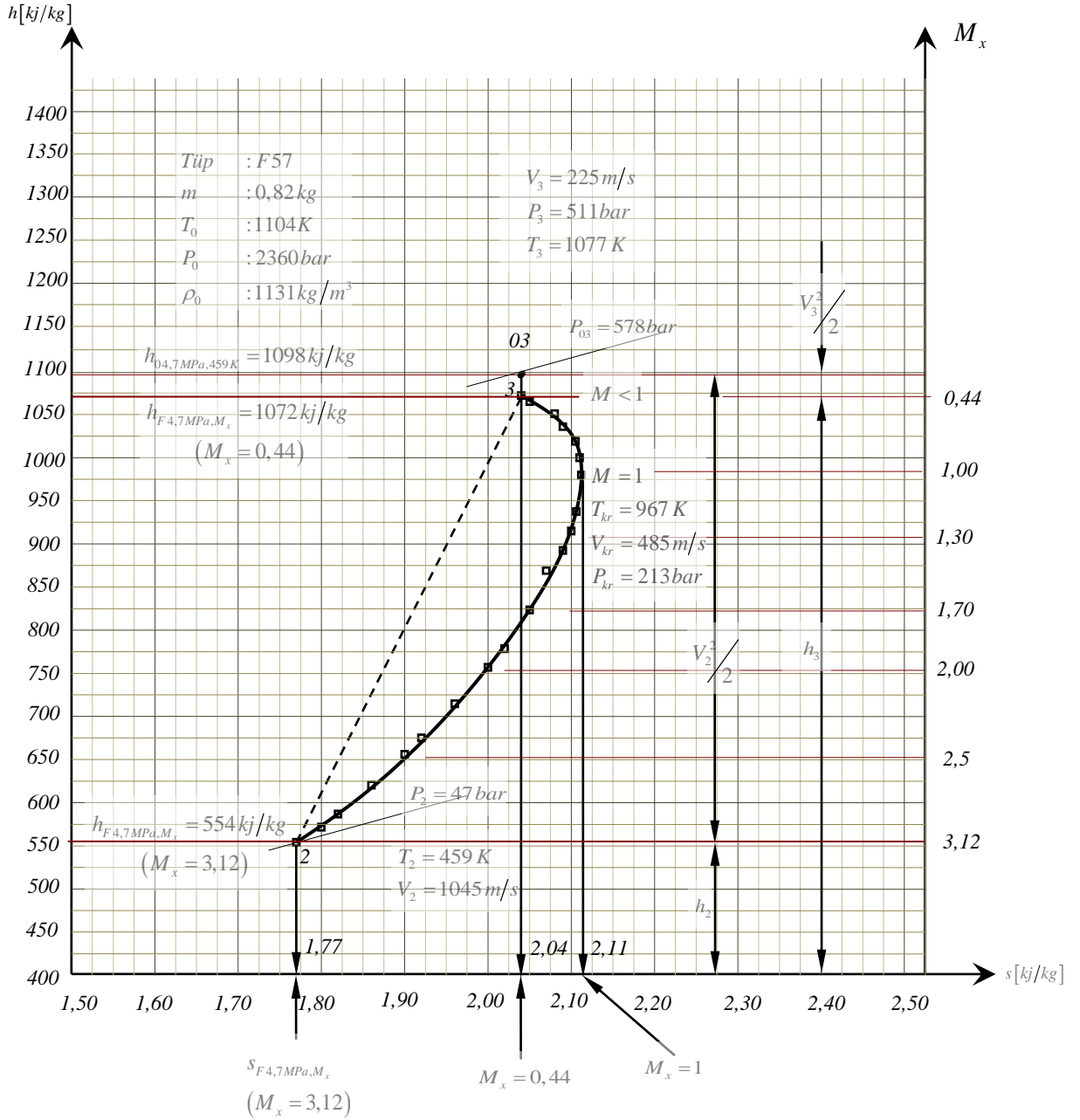
- Momentumun korunumu:
 $A \cdot (P_x - P_y) = \dot{m} \cdot (V_y - V_x)$



- İkinci yasa:

$$s_y - s_x \geq 0$$

Kütlenin ve enerjinin korunumu bağıntılarını bir denklemden birleştirip sonucu özellik bağıntılarından da yararlanarak h-s diyagramını çizebiliriz. Elde edilen eğriye “FANNO eğrisi” adı verilir. Kütlenin ve momentumun korunumu bağıntıları bir denklemden birleştirilir ve sonuç h-s diyagramında çizilirse “RAYLEIGH eğrisi” elde edilir.

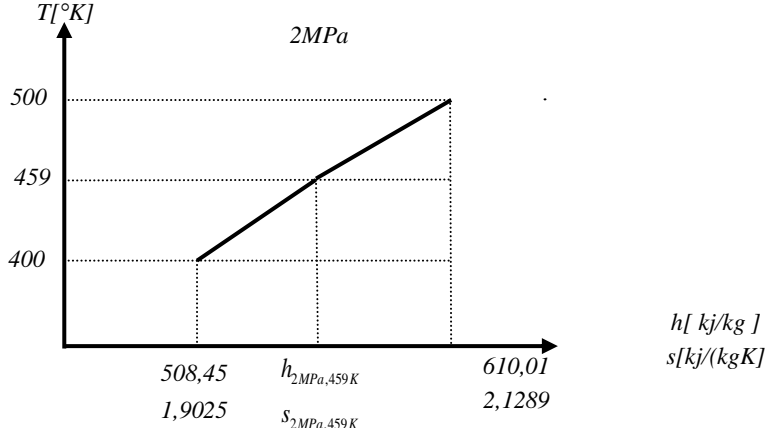


Şekil 5. .(h-s) diyagramı üzerinde şok dalgası ve “FANNO” eğrisi (şematik).

Gaz CO_2 'nin özellikleri tablosundan (Tablo1), h_2 ve s_2 değerlerini bulalım.

$p_2 = 47 \text{ bar} = 4,7 \text{ MPa}$, $T_2 = 459^0 \text{ K}$ olduğuna göre :

	$400 \text{ } ^\circ\text{K}$	$500 \text{ } ^\circ\text{K}$
2 MPa	$h=508,45 \text{ kJ/kg}$ $s=1,9025 \text{ kJ/(kg.K)}$	$h=610,01 \text{ kJ/kg}$ $s=2,1289 \text{ kJ/(kg.K)}$



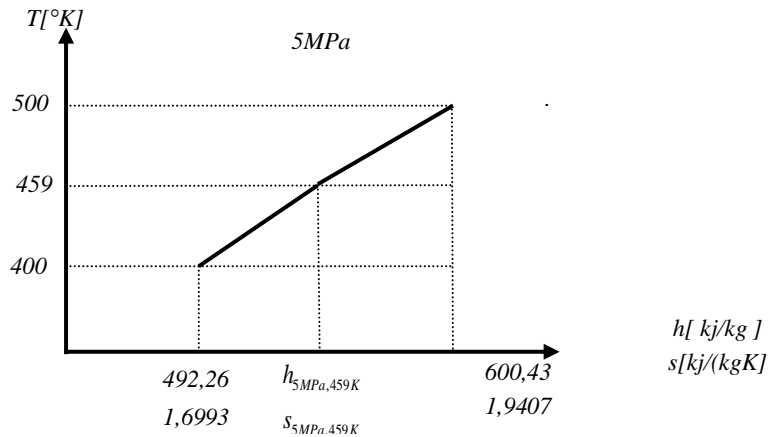
$h_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}}$ - 2 MPa basınçta, $459 \text{ } ^\circ\text{K}$ sıcaklığına karşılık gelen gaz CO_2 nin entalpisi

$s_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}}$ - 2 MPa basınçta, $459 \text{ } ^\circ\text{K}$ sıcaklığına karşılık gelen gaz CO_2 nin antropisi

$$\frac{h_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}} - 508,45}{610,01 - 508,45} = \frac{459 - 400}{500 - 400} \rightarrow h_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}} \cong 568,4 \text{ kJ / kg}$$

$$\frac{s_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}} - 1,9025}{2,1289 - 1,9025} = \frac{459 - 400}{500 - 400} \rightarrow s_{2 \text{ MPa}, 459 \text{ K}} = 2,036 \text{ kJ / (kg.K)}$$

	$400 \text{ } ^\circ\text{K}$	$500 \text{ } ^\circ\text{K}$
5 MPa	$h=492,26 \text{ kJ/kg}$ $s=1,6993 \text{ kJ/(kg.K)}$	$h=600,43 \text{ kJ/kg}$ $s=1,9407 \text{ kJ/(kg.K)}$



$h_{5MPa,459K}$ - 5 MPa basınçta, 459 °K sıcaklığına karşılık gelen gaz CO₂ nin entalpisi

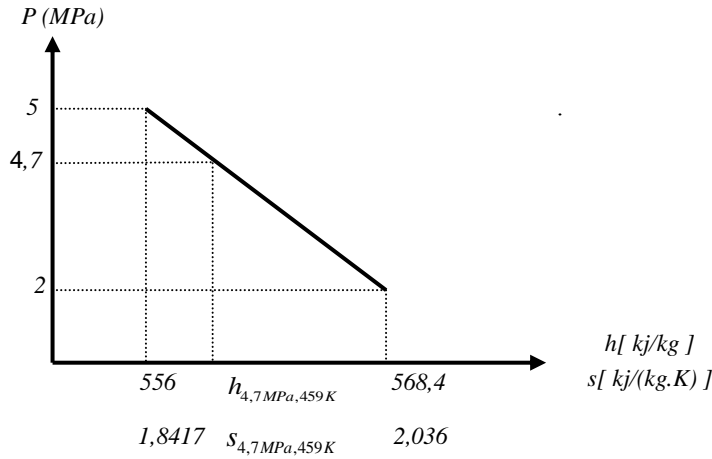
$s_{5MPa,459K}$ - 5 MPa basınçta, 459 °K sıcaklığına karşılık gelen gaz CO₂ nin antropisi

$$\frac{h_{5MPa,459K} - 492,26}{600,43 - 492,26} = \frac{459 - 400}{500 - 400} \rightarrow h_{5MPa,459K} \cong 556,4 \text{ kJ / kg}$$

$$\frac{s_{5MPa,459K} - 1,6993}{1,9407 - 1,6993} = \frac{459 - 400}{500 - 400} \rightarrow s_{5MPa,459K} \cong 1,8417 \text{ kJ / kg} \cdot K$$

$$\left. \begin{array}{l} 2MPa \\ 459^\circ K \end{array} \right\} \rightarrow \left[\begin{array}{l} h_{2MPa,459K} = 568,4 \text{ kJ / kg} \\ s_{2MPa,459K} = 2,036 \text{ kJ / kg} \cdot K \end{array} \right]$$

$$\left. \begin{array}{l} 5MPa \\ 459^\circ K \end{array} \right\} \rightarrow \left[\begin{array}{l} h_{5MPa,459K} = 556 \text{ kJ / kg} \\ s_{5MPa,459K} = 1,8417 \text{ kJ / kg} \cdot K \end{array} \right]$$



$$\frac{5 - 4,7}{5 - 2} = \frac{h_{4MPa,459K} - 556}{568,4 - 556} \rightarrow h_{4,7MPa,459K} = 557,24 \text{ kJ / kg}$$

$$\frac{5 - 4,7}{5 - 2} = \frac{s_{4,7MPa,459K} - 1,8417}{2,036 - 1,8417} \rightarrow s_{4,7MPa,459K} = 1,8611 \text{ kJ / (kg.K)}$$

“Şimdi ; 2,5 ve 10 MPa basınç değerlerindeki T_2 sıcaklığına karşılık gelen gaz CO₂’ nin, entalpi ve antropilerini Tablo 1 den yararlanarak yaklaşık olarak hesaplayalım veya başka bir deyişle P_2 MPa basınç aralıklarındaki

$$h_2 = f(T_2)$$

$$s_2 = f(T_2)$$

denklemleri’ni oluşturalım.

h_{2MPa,T_2K} - 2 MPa basınçta, T_2 °K sıcaklığına karşılık gelen gaz CO₂ nin entalpisi

s_{2MPa,T_2K} 5 MPa basınçta, T_2 °K sıcaklığına karşılık gelen gaz CO_2 nin antropisi $p = 2 MPa$

T_2 [°K]	253,6	300	400	500	600	700	800	900	1000
h_{2MPa,T_2K} [kJ/kg]	358,42	409,41	508,45	610,01	716,73	828,37	944,25	1063,68	1186,07
s_{2MPa,T_2K} [kJ/(kgK)]	1,4323	1,6174	1,9025	2,1289	2,3235	2,4954	2,65	2,7907	2,9196

Tablo değerlerinden,

$$h_{2MPa,T_2K} = 69,117 + 1,1 \cdot T_2 \quad (31)$$

ve

$$s_{2MPa,T_2K} = 1,072 + 1,946 \cdot 10^{-3} \cdot T_2 \quad (32)$$

elde edilir. Aynı şekilde ;

 $p = 5 MPa$

T_2 [°K]	287,5	300	400	500	600	700	800	900	1000
h_{5MPa,T_2K} [kJ/kg]	339,84	366,98	492,26	600,43	710,37	823,93	941,10	1061,45	1,84
s_{5MPa,T_2K} [kJ/(kgK)]	1,2426	1,3351	1,6993	1,9407	2,1410	2,3160	2,4724	2,6141	2,7438

Tablo değerlerinden,

$$h_{5MPa,T_2K} = 15,1938 + 1,163 \cdot T_2 \quad (33)$$

ve

$$s_{5MPa,T_2K} = 0,8 + 2,06 \cdot 10^{-3} \cdot T_2 \quad (34)$$

 $p = 10 MPa$

T_2 [°K]	400	500	600	700	800	900	1000
h_{10MPa,T_2K} [kJ/kg]	463,19	584,73	700,24	816,97	936,20	1058,02	1182,21
s_{10MPa,T_2K} [kJ/(kgK)]	1,5127	1,7846	1,9952	2,1751	2,3343	2,4777	2,6086

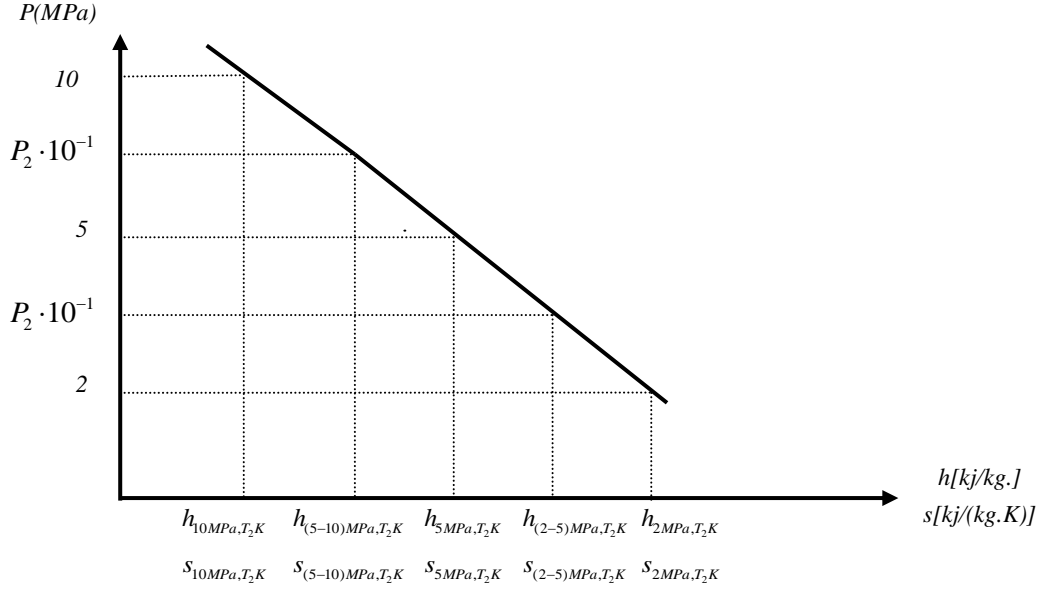
Tablo değerlerinden,

$$h_{10MPa,T_2K} = -14,677 + 1,193 \cdot T_2 \quad (35)$$

ve

$$s_{10MPa,T_2K} = 0,8736 + 1,79 \cdot 10^{-3} \cdot T_2 \quad (36)$$

korelasyon katsayıları yüksek olan denklemler yazılabilir. (Bütün programlar, HP50g grafik hesap makinası ile yapılmıştır).



$h_{(2-5)MPa,T_2K}$ - $P_2 = (2 \dots 5)MPa$ basınç aralığında, T_2 sıcaklığına karşılık gelen gaz CO_2 nin entalpisi

$s_{(2-5)MPa,T_2K}$ - $P_2 = (2 \dots 5)MPa$ basınç aralığında, T_2 sıcaklığına karşılık gelen gaz CO_2 nin antropisi

$$\frac{10 - P_2 \cdot 10^{-1}}{10 - 5} = \frac{h_{(5-10)MPa,T_2K} - h_{10MPa,T_2K}}{h_{5MPa,T_2K} - h_{10MPa,T_2K}} = \frac{s_{(5-10)MPa,T_2K} - s_{10MPa,T_2K}}{s_{5MPa,T_2K} - s_{10MPa,T_2K}}$$

$$\frac{5 - P_2 \cdot 10^{-1}}{5 - 2} = \frac{h_{(2-5)MPa,T_2K} - h_{5MPa,T_2K}}{h_{2MPa,T_2K} - h_{5MPa,T_2K}} = \frac{s_{(2-5)MPa,T_2K} - s_{5MPa,T_2K}}{s_{2MPa,T_2K} - s_{5MPa,T_2K}}$$

Diğerleri de aynı şekilde programlanır.

$$h_{(5-10)MPa,T_2K} = \frac{10 - p_2 \cdot 10^{-1}}{5} \cdot (h_{5MPa,T_2K} - h_{10MPa,T_2K}) + h_{10MPa,T_2K} \quad (37)$$

$$s_{(5-10)MPa,T_2K} = \frac{10 - p_2 \cdot 10^{-1}}{5} \cdot (s_{5MPa,T_2K} - s_{10MPa,T_2K}) + s_{10MPa,T_2K} \quad (38)$$

$$h_{(2-5)MPa,T_2K} = \frac{5 - p_2 \cdot 10^{-1}}{3} \cdot (h_{2MPa,T_2K} - h_{5MPa,T_2K}) + h_{5MPa,T_2K} \quad (39)$$

$$s_{(2-5)MPa,T_2K} = \frac{5 - p_2 \cdot 10^{-1}}{3} \cdot (s_{2MPa,T_2K} - s_{5MPa,T_2K}) + s_{5MPa,T_2K} \quad (40)$$

programlayalım:

$$P_2 = 47 \text{ bar} = 4,7 \text{ MPa} \quad (2 \dots 5 \text{ aralığı alınacak})$$

$$\left. \begin{array}{l} h_{4,7MPa,459K} \cong 552 \text{ kJ/kg} \\ s_{4,7MPa,459K} = 1,77 \text{ kJ/(kg.K)} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} (h_{4,7MPa,459K} = 557,24 \text{ kJ/kg}) \\ (s_{4,7MPa,459K} = 1,8611 \text{ kJ/kg}) \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{(Sayfa 27 de hesaplandı.)} \\ \text{Program değerlerine} \\ \text{çok yakın} \end{array} \right)$$

Basınç aralığına göre; $h_{(2-5)MPa,T_2K}$, $s_{(2-5)MPa,T_2K}$ veya $h_{(5-10)MPa,T_2K}$, $s_{(5-10)MPa,T_2K}$ değerleri hesaplanacak.

Enerjinin korunma ilkesine göre,

$$h_2 + \frac{V_2^2}{2} = h_3 + \frac{V_3^2}{2}$$

$$h_{02} = h_{03}$$

durma antalpisi şok dalgasının her iki tarafında eşit olmak zorundadır.

Mükemmel gazlar için,

$$h = h(T) \text{ olduğundan,}$$

$$T_{02} = T_{03}$$

yazılabilir.

Başka bir deyişle, durma sıcaklığı da şok dalgasının her iki tarafında eşit olur.

$$h_{(2-5)MPa,T_2K} + \frac{(V_2 m / sn)^2}{2} \cdot \left(\frac{1kj / kg}{1000m^2 / sn^2} \right) = h_{0(2-5)MPa,T_2K} \quad (41)$$

veya,

$$h_{(5-10)MPa,T_2K} + \frac{(V_2 m / sn)^2}{2} \cdot \left(\frac{1kj / kg}{1000m^2 / sn^2} \right) = h_{0(5-10)MPa,T_2K} \quad (42)$$

$h_{(2-5)MPa,T_2K}$ - T_2 sıcaklığında, (2...5)MPa basınç aralığına karşılık gelen gaz CO₂ nin entalpisi

$s_{(2-5)MPa,T_2K}$ - T_2 sıcaklığında, (5...10)MPa basınç aralığına karşılık gelen gaz CO₂ nin antropisi

verilen değerlerle

$$h_{04,7MPa,T_2K} = 1097,7 \cong 1098 \text{ kJ / kg}$$

olarak bulunur.

Fanno eğrisini incelemeye devam edelim:

Enerjinin korunumu,

$$h_x + \frac{V_x^2}{2} = h_y + \frac{V_y^2}{2}$$

$$h_{0x} = h_{0y}$$

dolayısıyla

$$T_{0x} = T_{0y}$$

eşitliklerini daha önce yazmıştık.

Burada, x şoktan önce y şoktan sonra akışkana ait büyüklükleri göstermektedir.

$$V_x = M_x \sqrt{kRT_x}$$

$$V_y = M_y \sqrt{kRT_y}$$

$$\frac{V_y}{V_x} = \frac{M_y}{M_x} \left(\frac{T_y}{T_x} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{T_{0x}}{T_x} = 1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M_x^2$$

$$\frac{T_{0y}}{T_y} = 1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M_y^2$$

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{1 + M_x^2(k-1)/2}{1 + M_y^2(k-1)/2} = \frac{(k-1)M_x^2 + 2}{(k-1)M_y^2 + 2}$$

$$\frac{V_y}{V_x} = \frac{M_y}{M_x} \left[\frac{(k-1)M_x^2 + 2}{(k-1)M_y^2 + 2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$h_x = h_{0x} - \frac{V_x^2}{2} \cdot \frac{1}{1000} = h_{0x} - \frac{1}{2000} M_x^2 k R T_x$$

$$h_x = h_{0x} - \frac{k R M_x^2}{2000} \cdot \frac{T_{0x}}{1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M_x^2}$$

$$h_x = h_{0x} - \frac{1,289.188,9 \cdot M_x^2}{2000} \cdot T_{0x} \frac{1}{1 + \frac{0,289}{2} M_x^2}$$

$$h_x = h_{0x} - \left(\frac{0,2435 \cdot T_{0x} \cdot M_x^2}{0,289 M_x^2 + 2} \right)$$

dolayısıyla ;

$$h_{F(2-5)MPa, M_x} = h_{0(2-5)MPa, T_2K} - \left(\frac{0,2435 \cdot T_0 \cdot M_x^2}{0,289 \cdot M_x^2 + 2} \right) \quad (43)$$

veya,

$$h_{F(5-10)MPa, M_x} = h_{0(5-10)MPa, T_2K} - \left(\frac{0,2435 \cdot T_0 \cdot M_x^2}{0,289 \cdot M_x^2 + 2} \right) \quad (44)$$

elde edilir.

$$h_{F(2-5)MPa, M_x} \quad P_2 = (2 \dots 5) MPa \text{ basınç aralığında ve verilen Mach sayısı } M_x \text{ 'e karşılık gelen FANNO eğrisi entalpisi}$$

$$h_{F(5-10)MPa, M_x} \quad P_2 = (5 \dots 10) MPa \text{ basınç aralığında ve verilen Mach sayısı } M_x \text{ 'e karşılık gelen FANNO eğrisi entalpisi}$$

Akış bir şok dalgasından geçerken antropinin değişimini tekrar ele alalım.

$$s_x - s_2 = C_p \ln \frac{T_x}{T_2} - R \ln \frac{P_x}{P_2}$$

$$\frac{T_x}{T_2} = \frac{(k-1)M_2^2 + 2}{(k-1)M_x^2 + 2}$$

$$\frac{P_x}{P_2} = \frac{M_2}{M_x} \left[\frac{(k-1)M_2^2 + 2}{(k-1)M_x^2 + 2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$s_x = s_2 + 0,846 \ln \left[\frac{(k-1)M_2^2 + 2}{(k-1)M_x^2 + 2} \right] - 0,1889 \ln \frac{M_2}{M_x} \left[\frac{0,289M_2^2 + 2}{0,289M_x^2 + 2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$s_x = s_2 + 0,846 \ln \left[\frac{0,289M_2^2 + 2}{0,289M_x^2 + 2} \right] - 0,1889 \ln \left[\frac{0,289M_2^4 + 2M_2^2}{0,289M_x^4 + 2M_x^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

$$\left. \begin{aligned} s_2 &= s_{(2-5)MPa, T_2 K} & \text{veya} & s_{(5-10)MPa, T_2 K} \\ s_x &= s_{F(2-5)MPa, M_x} & \text{veya} & s_{F(5-10)MPa, M_x} \end{aligned} \right\} \text{için}$$

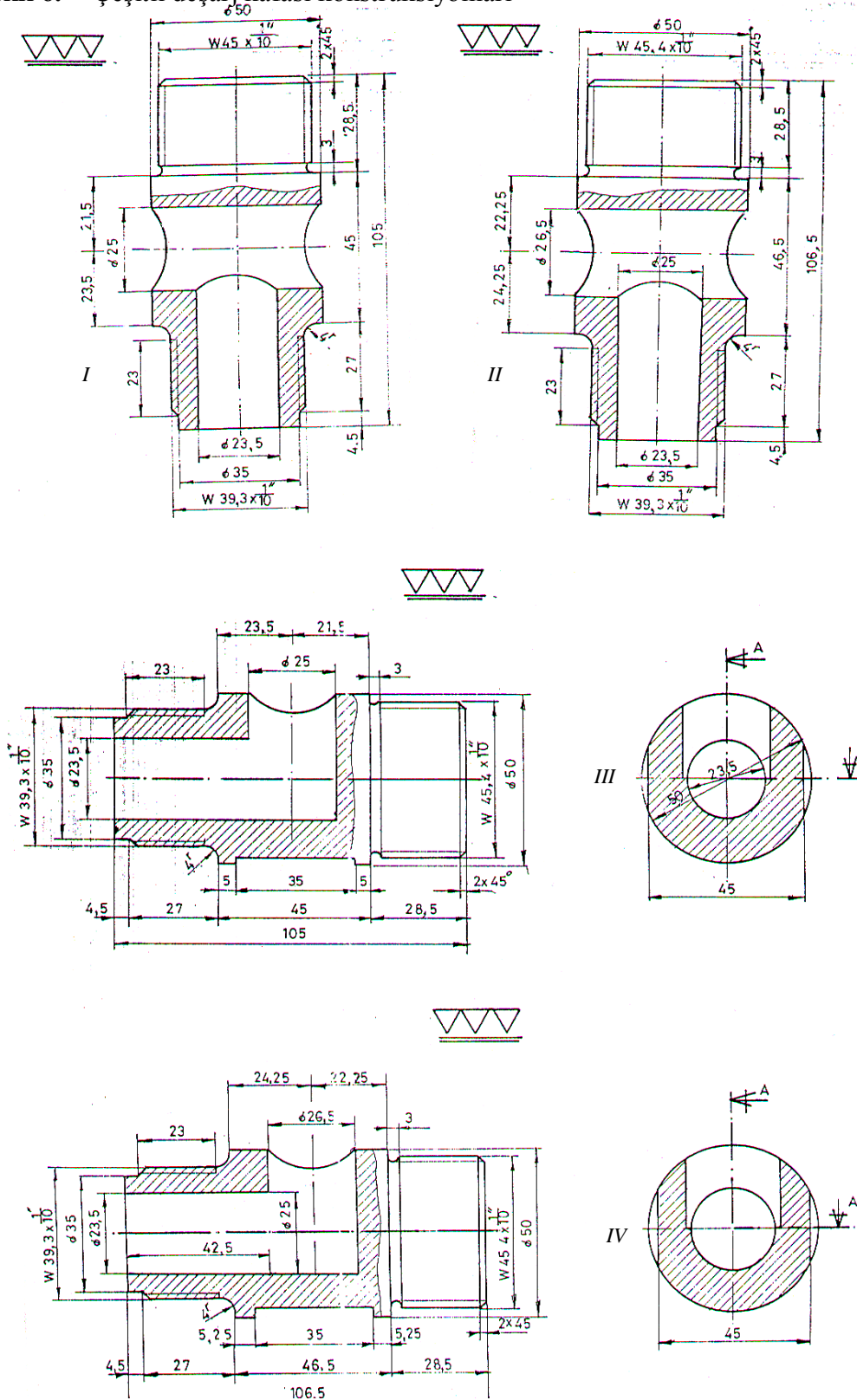
M_x	$h_{F4,7MPa, M_x} [kj / kg]$	$s_{F4,7MPa, M_x} [kj / (kgK)]$
0,44	1072	2,04
0,50	1065	2,05
0,60	1051	2,08
0,70	1036	2,09
0,80	1019	2,105
0,90	1000	2,11
1,00	980	2,112
1,20	937,5	2,106
1,30	915,1	2,1
1,40	892,4	2,09
1,50	869	2,07
1,70	823,6	2,05
1,90	778,7	2,02
2,00	757	2,00
2,20	714,7	1,96
2,40	675	1,92
2,50	656	1,90
2,70	620,3	1,86
2,90	587	1,82
3,00	571,6	1,80
3,12	554	1,77

Bu değerlerle 'FANNO' eğrisi net olarak çizilebilir. (Şekil 5)

Sonuc :

Kayacın (özellikle kömür) kırılma basıncı biliniyor ise, kırılacak parçanın büyüklüğüne göre toz yüzdesini en aza indiren şok basıncı, çeşitli deşarj kafası konstrüksiyonları ile sağlanabilir. (Şekil 6)

Şekil 6. Çeşitli deşarj kafası konstrüksiyonları



Tablo 2 Şekil 6’da gösterilen deşarj kafalarına göre yapılan hesap sonuçları

TİP	DEŞARJ KAFASI			VERİLER			(0) NOKTASI			(1) NOKTASI					(2) NOKTASI					İZANTROPİK DURMA NOKTASI		ŞOKTAN SONRA					
	d_0	d_1	d_2	CO_2 Şarjı	Patlatma basıncı	Disk Kalınlığı	ρ_0	P_0	T_0	ρ_1	P_1	T_1	V_1	\dot{m}_1	t_1	ρ_2	P_2	T_2	V_2	\dot{m}_2	t_2	P_{01}	T_{01}	ρ_3	P_3	T_3	V_3
I	23,5	23,5	25	0,82 (kg)	2360	4,4	1131	2360	1110	1103	2285	1102	116	55,5	15	54,2	47	461,25	1043	27,75	15	2360	1110	251	509	1079,8	225
					2760	5,2		2760	1298	1103	2672	1288,6	125,8	60,2	14	54,4	55,18	540	1128	30,11	14	2760	1298	251,6	597	1262,7	243,7
2360	4,4	2360	1110		1101	2280		1101,5	120	64,85	13	56,6	49,73	467,15	1038	32,41	13	2360	1110	259,6 3	524	1079,4	226,36				
2760	5,2	2760	1298		1101,2	2666,6		1288	129,75	70	12	56,6	58,15	546,3	1123	35	12	2760	1298	259,6 3	616,3	1262,3	245				
II	23,5	25	26,5		2360	4,4		2360	1110	1103	2285	1102	116	55,5	15	119,96	130,75	579,77	942,4	55,5	15	2360	1110	453,6	913,6	1072,2	249
					2760	5,2		2760	1298	1103	2672	1288,6	125,8	60,18	14	120,38	153,83	679,72	1019	60,18	14	2760	1298	454,4	1071, 6	1255	269
III	23,5	23,5	25		2360	4,4		2360	1110	1101	2280	1101,5	120	64,85	13	125,7	139	588,2	935,4	64,85	13	2360	1110	468,0 7	943,7 4	1072,5	251
					2760	5,2		2760	1298	1101,2	2666,6	1288	129,75	70,13	12	125,7	163	689,75	1012	70,13	12	2760	1298	467,3	1103, 2	1255,7	270
IV	23,5	25	26,5	2360	4,4	2360	1110	1103	2285	1102	116	55,5	15	119,96	130,75	579,77	942,4	55,5	15	2360	1110	453,6	913,6	1072,2	249		
				2760	5,2	2760	1298	1103	2672	1288,6	125,8	60,18	14	120,38	153,83	679,72	1019	60,18	14	2760	1298	454,4	1071, 6	1255	269		
IV	23,5	25	26,5	2360	4,4	2360	1110	1101	2280	1101,5	120	64,85	13	125,7	139	588,2	935,4	64,85	13	2360	1110	468,0 7	943,7 4	1072,5	251		
				2760	5,2	2760	1298	1101,2	2666,6	1288	129,75	70,13	12	125,7	163	689,75	1012	70,13	12	2760	1298	467,3	1103, 2	1255,7	270		

ρ – Yoğunluk $[kg/m^3]$

P – Basınç $[bar]$

T – Sıcaklık $[°K]$

V – Hız $[m/sn]$

t – Zaman - Deşarj süresi - $[Milisaniye]$

\dot{m} – Birim zamanda geçen akışkanın miktarı $[kg/sn]$

R_x – Tepki kuvveti X - eksenine doğrultusunda $[N]$

R_y – Tepki kuvveti Y - eksenine doğrultusunda $[N]$

Akışkana ait büyüklükler

E_{K1} – Tüpün tek tarafından çıkan akışkanın birim zamandaki kinetik enerjisi $[N \cdot m/sn. (watt)]$

E_{K2} – Tüpün tek tarafından çıkan akışkanın birim zamandaki kinetik enerjisi $[BG]$

E_{s1} – Tüpün tek tarafından çıkan akışkanın yapmış olduğu iş $[Nm]$

E_{s2} – Tüpün tek tarafından çıkan akışkanın yapmış olduğu iş $E_{s2} = 2 \cdot E_{s1} [Nm]$

E_{sp1} – Grizütün için spesifik enerji 0,250 kg *Grizütün/delik* için $2 \cdot E_{s1} [Nm]$

$\frac{(E_{s2})_{CARDOX}}{(E_{sp1})_{GRUZİTİN}}$ – Bir delikte yapılan işlerin oranı

E_{sp2} – Dinamit için spesifik enerji 1 kg *Dinamit/delik* için $2 \cdot E_{s1} [Nm]$

$\frac{(E_{s2})_{CARDOX}}{(E_{sp2})_{DİNAMİT}}$ – Bir delikte yapılan işlerin oranı

Tablo 2 devamı

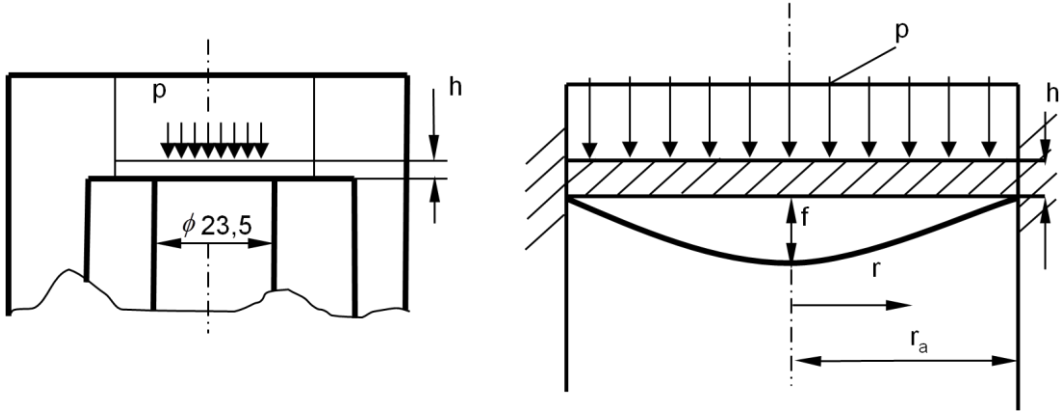
ÇEVRE NOKTASI		TEPKİ KUVVETLERİ		Birim Zamandaki Kinetik Enerji (Tüpün Tek Tarafı İçin)		YAPILAN İŞ		Grizutin İçin Spesifik Enerji (0,250 kg Grizutin/Delik)	İŞ ORANLARI	Dinamit İçin Spesifik Enerji (1 kg.Dinamit/Delik)	İŞ ORANLARI	KRİTİK BÜYÜKLÜKLER			
						Tek Taraf	Çift Taraf		$(E_{s1})/CARDOX$		$(E_{s2})/CARDOX$				
P_C	$T_C(t_C)$	R_x	R_y	E_{K1}	E_{K2}	E_{s1}	E_{s2}	E_{sp1}	$(E_{sp1})/GRIZUTIN$	E_{sp1}	$(E_{sp2})/GRIZUTIN$	P^*	T^*	ρ^*	V^*
1	194,56 (-78,44)	105546	31250	15093575	20507	223009	446018	220-10 ³	2	1140-10 ³	0,4	1293	970	709	485
	219,7 (-53,3)	123465	36658	19139680	26005	260626	521252		2,37		0,46	1511,7	1134		524
	194,6 (-78,4)	119701,7	36397,4	17471759	23739	221004	442008		2		0,38	1293	970		485
	219,7 (-53,3)	139994	42576,5	22105856	30035	258531	517062		2,35		0,45	1511,7	1134		524
	194,4 (-78,6)	105546	58719	24644708	33485	364151,5			1,65		0,32	1293	970		485
	219,8 (-53,2)	123465	68849	3126007	42413	425310			1,93		0,37	1511,7	1134		524
	194,56 (-78,44)	119701,7	68332	28374015	38551,6	358762			1,63		0,3	1293	970		485
	220 (-53)	139994	79930	35879714	48749,6	419525,7			1,9		0,37	1511,7	1134		524

d_0 – Deşarj kafası gaz giriş çapı [mm]
 d_1 – Deşarj kafası gaz 1. çıkış çapı [mm]
 d_0 – Deşarj kafası gaz 2. çapı [mm]
 } (Şekil1)

d_0 – $\phi 23,5$ mm.
 d_1 – $\phi 23,5$ mm.
 d_0 – $\phi 25$ mm.
 } (Orjinal kafa)

Disk patlatma işi

D diskinin patlaması için gerekli olan işi hesaplayalım, ama önce patlama diskini ele alalım ve çevresi boyunca ankastre mesnetli dairesel plak olarak düşünelim



Şekil 7. Çevresi boyunca ankastre mesnetli ve p yayılı yüke çalışan patlatma diskini

M.ten BOSCH'a göre :

- Plak, paralel iki düzlem yüzey ile sınırlanmış olan ve orta düzleme dik kuvvetler ile (eğilmeye) zorlanan bir cisimdir.
- Her meridyen düzlem, gerek şekil (geometrik) ve gerekse yük bakımından bir simetri düzlemidir. Bu sebepten meridyen düzlemleri içinde kayma gerilmeleri yoktur, yalnız normal gerilmeler (σ_r) vardır. Demek ki (σ_t) teğetsel gerilmeleri asal gerilmelerdir.
- Çepçevre simetrik yüke maruz dairesel plak tamamen simetrik bir deformasyon arz edecek ve böylece orta düzlem bir dönel yüzeye dönüşecektir. Bunun sonucu olarak ta, teğetsel gerilmeler daima asal gerilme olur.

σ_r ve σ_t eğilme gerilmeleri

$$\sigma_r = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{m+1}{m} \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{3m+1}{m+1} r^2 - r_a^2 \right)$$

$$\sigma_t = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{m+1}{m} \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{m+3}{m+1} r^2 - r_a^2 \right)$$

m- poisson sayısı (Çelik için m=10/3)

- $r = r_a$ için;

$$\sigma_r(r_a) = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{\left(\frac{10}{3}+1\right)}{\frac{10}{3}} \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{3 \cdot \frac{10}{3} + 1}{\frac{10}{3} + 1} \cdot r_a^2 - r_a^2 \right)$$

$$\underline{\underline{\sigma_r(r_\alpha) = \mp 0,75 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}}} \quad (46)$$

$$\sigma_t(r_\alpha) = \mp \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{10}{3} + 1 \right) \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{10}{3} + 3 \cdot \frac{r_\alpha^2}{10} - r_\alpha^2 \right)$$

$$\underline{\underline{\sigma_t(r_\alpha) = \mp 0,225 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}}} \quad (47)$$

- $r = 0$ (plak ortasında) için

$$\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{10}{3} + 1 \cdot \frac{p}{h^2} \cdot r_\alpha^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = \mp 0,49 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}}} \quad (48)$$

Görüldüğü gibi en büyük gerilme $r = r_\alpha$ için σ_r gerilmesidir.

$$\underline{\underline{\sigma_{\max} = \sigma_r(\sigma_\alpha) = \mp 0,75 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}}} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

En küçük gerilme, patlatma diskinin $r = r_\alpha$ daki dış yüzeyinde ve teğetsel doğrultudadır.

$$\underline{\underline{\sigma_{\min} = \sigma_t(\sigma_\alpha) = \mp 0,225 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}}} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

En küçük gerilme, patlatma diskinin $r = r_\alpha$ daki dış yüzeyinde ve teğetsel doğrultuda olacağına göre, patlatma diski çevresi boyunca kopar. Disk'in patlaması istendiğine göre, $\sigma_t(r_\alpha) > \sigma_k$ şartı doğrultusunda disk kalınlıkları basınca bağlı olarak tespit edilir.

Örnek : $p=2360$ bar basınç için,

$$\sigma_{r_{\min}} = \sigma_t(r_\alpha) = \mp 0,225 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2} > \sigma_k$$

St37 malzemede kopma mukavemeti,

$$\sigma_k = 360 \dots 440 \text{ N / mm}^2 \quad (\text{Niemann})$$

$$0,225 \cdot (236 \text{ N / mm}^2) \cdot \frac{(23,5 / 2 \text{ mm})^2}{h^2} > (360 \dots 440 \text{ N / mm}^2)$$

$$h < (4,1 \dots 4,5 \text{ mm})$$

$$\underline{\underline{h = 4,4 \text{ mm (seçilen)}}}$$

$P=2360$ bar basınç ve $h=4,4$ mm disk kalınlığı için incelemeyi sürdürürelim (Şekil 8) :

$$\bullet \quad \sigma_r(0) = \sigma_t(0) = \mp 0,49 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2}$$

$$\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = -0,49 \cdot 236 \text{ (N / mm}^2) \cdot \left(\frac{23,5 / 2}{4,4} \right)^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = -825 \text{ N / mm}^2}}$$

$$\bullet \quad \sigma_{\max} = \sigma_r(r_\alpha) = \mp 0,75 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2} = 0,75 \cdot 236 \cdot \left(\frac{23,5 / 2}{4,4} \right)^2$$

$$\bullet \quad \underline{\underline{\sigma_{\max} = \sigma_r(r_\alpha) = 1262 \text{ N / mm}^2}}$$

$$\bullet \quad \sigma_{\min} = \sigma_t(r_\alpha) = \mp 0,225 \cdot p \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2} = 0,225 \cdot 236 \cdot \left(\frac{23,5 / 2}{4,4} \right)^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_{\min} = \sigma_t(r_\alpha) = 379 \text{ N / mm}^2}}$$

$$\bullet \quad \sigma_r = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{m+1}{m} \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{3m+1}{m+1} r^2 - r_\alpha^2 \right)$$

$$\sigma_t = \mp \frac{3}{8} \cdot \frac{m+1}{m} \cdot \frac{p}{h^2} \cdot \left(\frac{m+3}{m+1} r^2 - r_\alpha^2 \right)$$

$$m = 10/3, \quad p = 236 \text{ N / mm}^2, \quad h = 4,4 \text{ mm} \dots \text{ için}$$

$$\underline{\underline{\sigma_r \cong \mp 5,943 \cdot (2,54 \cdot r^2 - r_\alpha^2)}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_t \cong \mp 5,943 \cdot (1,46 \cdot r^2 - r_\alpha^2)}}$$

elde edilir.

$$2,54 \cdot r^2 - r_\alpha^2 = 0 \rightarrow r \cong 0,627 \cdot r_\alpha = 0,627 \cdot \left(\frac{23,5}{2}\right) \cong 7,37 \text{ mm}$$

$$r = 0,627 \cdot r_\alpha \cong 7,37 \text{ mm} \dots \text{için}$$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_t = \pm 5943 \cdot [1,46 \cdot (0,627 \cdot r_\alpha)^2 - r_\alpha^2] = -2,53 \cdot r_\alpha^2$$

$$\sigma_t = -2,53 \cdot \left(\frac{23,5}{2}\right)^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_t = -349,56 \text{ N/mm}^2}}$$

$$1,46 \cdot r^2 - r_\alpha^2 = 0 \rightarrow r \cong 0,828 \cdot r_\alpha = 0,828 \cdot \left(\frac{23,5}{2}\right) = 9,72 \text{ mm}$$

$$r = 0,828 \cdot r_\alpha = 9,72 \text{ mm} \text{ için}$$

$$\underline{\underline{\sigma_t = 0}}$$

$$\sigma_r = \mp 5943 \cdot [2,54 \cdot (0,828 \cdot r_\alpha)^2 - r_\alpha^2] = 4,4 \cdot r_\alpha^2$$

$$\sigma_r = 4,4 \cdot \left(\frac{23,5}{2}\right)^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_r = 608,3 \text{ N/mm}^2}}$$

Görüldüğü gibi ;

$r = 0 \dots r = 7,37 \text{ mm}$ ($\sigma_r = 0$) arasında σ_r gerilmeleri basma (-)

$r = 7,37 \text{ mm}$ ($\sigma_r = 0$) $\dots r = r_\alpha = 11,75 \text{ mm}$ arasında σ_t gerilmeleri çekme (+)

$r = 0 \dots r = 9,72 \text{ mm}$ ($\sigma_t = 0$) arasında σ_t gerilmeleri basma (-)

$r = 9,72 \text{ mm}$ ($\sigma_t = 0$) $\dots r = r_\alpha = 11,75 \text{ mm}$ arasında σ_t gerilmeleri çekme (+)

şeklinde olup disk bu gerilmeler ile zorlanmaktadır. En küçük çekme gerilmesi

$$r = r_\alpha \text{ daki } \sigma_t = 379 \text{ N/mm}^2$$

olan teğetsel gerilmedir.

σ_t ve σ_r gerilme diyagramları :

$$\sigma_r = 5,943 \cdot (2,54 \cdot r^2 - r_\alpha^2) = 5,943 \cdot \left[2,54 \cdot r^2 - \left(\frac{23,5}{2} \right)^2 \right]$$

$$\underline{\underline{\sigma_r \cong 15,1r^2 - 820,5}} \quad (\text{Şekil 8})$$

$$\sigma_t = 5,943 \cdot (1,46 \cdot r^2 - r_\alpha^2) = 5,943 \cdot \left[1,46 \cdot r^2 - \left(\frac{23,5}{2} \right)^2 \right]$$

$$\underline{\underline{\sigma_t \cong 8,68 \cdot r^2 - 820,5}} \quad (\text{Şekil 8})$$

Artık 'D' diskinin patlaması için gerekli olan işi hesaplayabiliriz.

Akma sınırındaki basınç ,

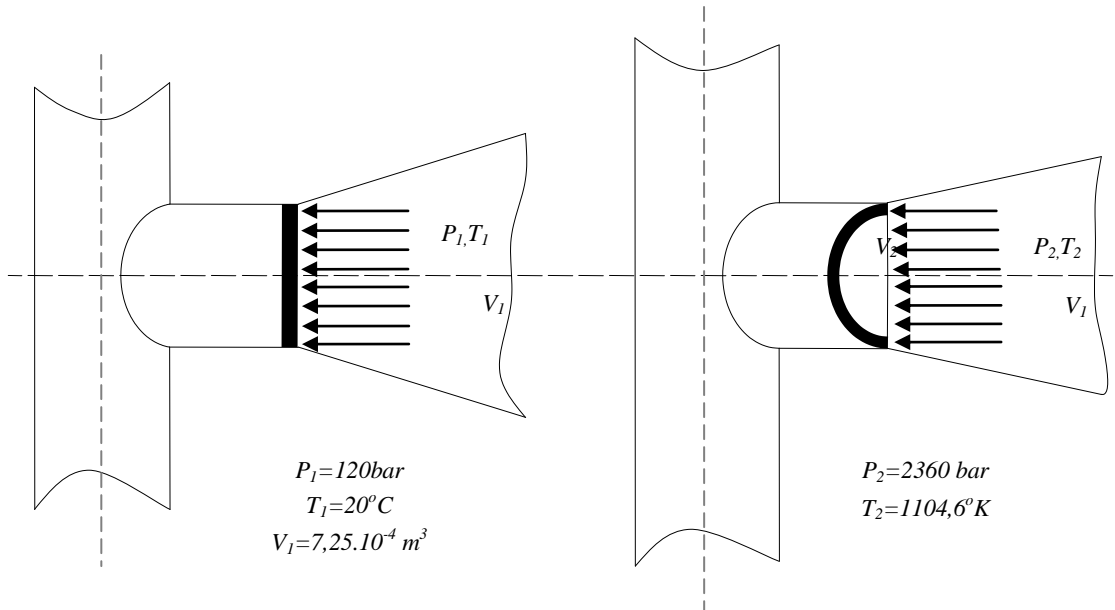
$$\sigma_{t \min} = \sigma_t(r_\alpha) = \mp 0,225 \cdot p_{AK} \cdot \frac{r_\alpha^2}{h^2} = \sigma_{AK}$$

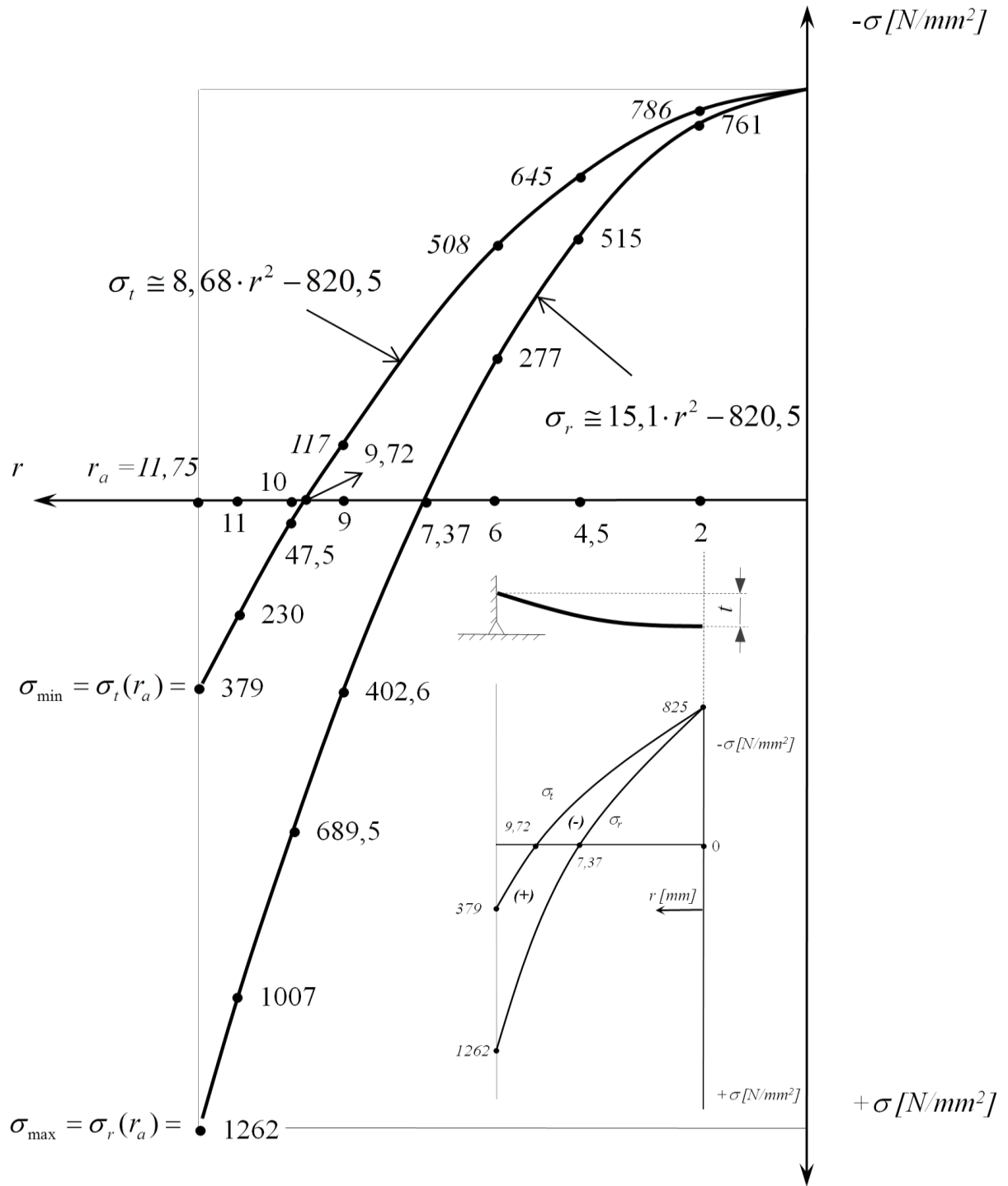
St37 malzemede akma sınırı ,

$$\sigma_{AK} = 240 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Niemann})$$

$$0,225 \cdot p_{AK} \cdot \frac{\left(\frac{23,5}{2} \right)^2}{(4,4)^2} = 240$$

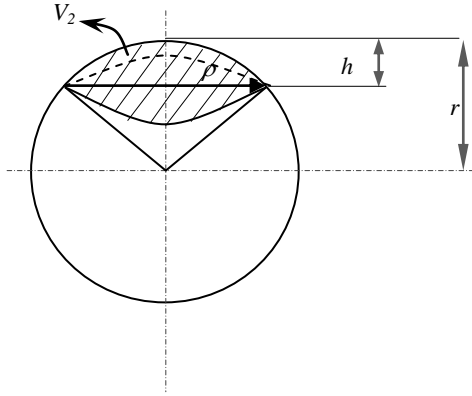
$$\underline{\underline{p_{AK} \cong 150 \text{ N/mm}^2 = 1500 \text{ bar}}}$$





Şekil 8. Patlatma diskinde gerilme dağılımı.
 (Gerilme diyagramları)
 $P=2360 \text{ bar.}$, $h=4,4 \text{ mm.}$

Disk'in, patlamadan max. şekil değişimini bir küre kapağı olarak kabul edersek; küre kesiyi, küre parçası veya küre takkesinin hacmi,



$\rho = 23,5/2 = 11,75 \text{ mm}$
 $h = 5,6 \text{ mm}$ (Patlamamış ancak bombeleşerek çok hafif-
 kılcal-çatlak oluşturmuş diskler üzerinde yapılan ölçümler
 ortalamasıdır.)

$$V_2 = \frac{\pi}{3} h^2 (3r - h) = \frac{\pi}{6} h^2 (3d - 2h) = \frac{\pi}{6} h (3\rho^2 + h^2)$$

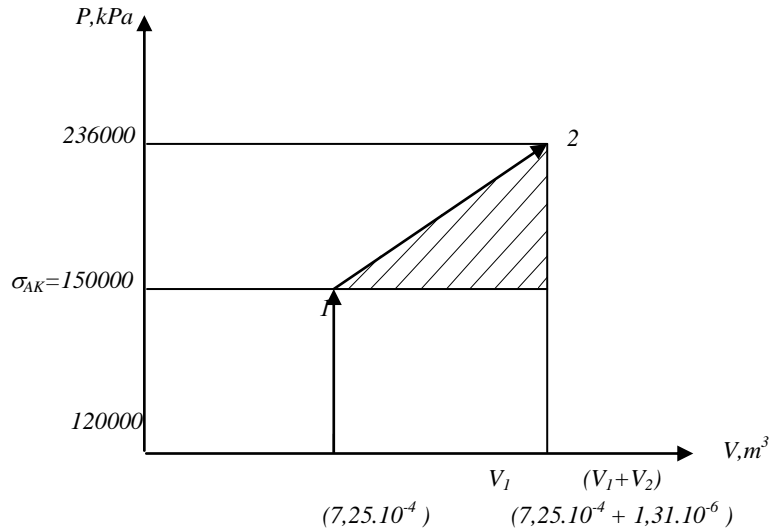
$$V_2 = \frac{\pi}{6} \cdot 5,6 \left[3 \cdot (11,75)^2 + (5,6)^2 \right] = 1306,4 \text{ mm}^3$$

$$\underline{\underline{V_2 = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}}$$

CARDOX tüpünde başlangıçta 120 bar basınç ve 20⁰ C sıcaklıkta sıvı CO₂ vardır. Tüpün iç hacmi 7,25.10⁻⁴ m³ tür. Daha sonra sıvı CO₂ ye ısı geçişi olmaktadır ve :

- Isınan CO₂ nin artan basıncı ile birlikte disk'in şekil değişimi de başlamaktadır,
- Şekil değişimi; CO₂ basıncının 2360 bar'a çıkmasına kadar devam edebiliyor çünkü bu basınçta disk patlıyor. Patlamadan hemen önce disk max. deformasyona CO₂ hacmi de (V₁+V₂) ye ulaşılıyor.
-

P-V diyagramında disk'e karşı yapılan iş üçgeninin alanıdır. (DİSK'İN YAY GİBİ DAVRANDIĞI KABUL EDİLMİŞTİR)



$$W_{disk} = \frac{1}{2}[(236000 - 150000)kPa](1,31 \cdot 10^{-6} m^3)$$

$$W_{disk} = 0,056 m^3 kPa = 0,056 kJ$$

$$\underline{\underline{W_{disk} = 56 j}}$$

(Bu değer, gerilmenin diskin bütün noktalarında aynı kabulü ile bulunmuştur.)

Dairesel plak analizi:

- Modelleme;

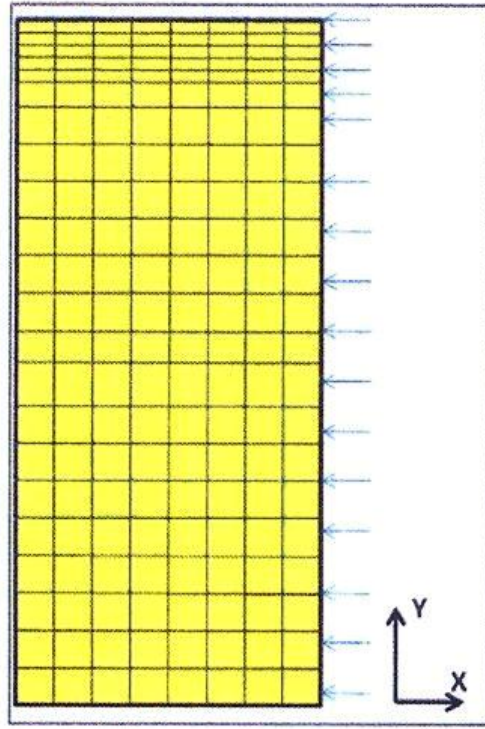
Aşağıda özellikleri verilen çelik (St37) daireSEL plak sonlu elemanlar yöntemi kullanan MSC Marc 2003 yardımıyla "axisymmetric" elemanlar kullanılarak modellendi (Şekil 9). Malzemenin plastik gerilme değerinin akma gerilmesi değerinden sonra sabit kaldığı kabul edilmiştir.

Disk in çapı : 23,5 mm

Disk kalınlığı : 4,4 mm

E : 210000 MPa

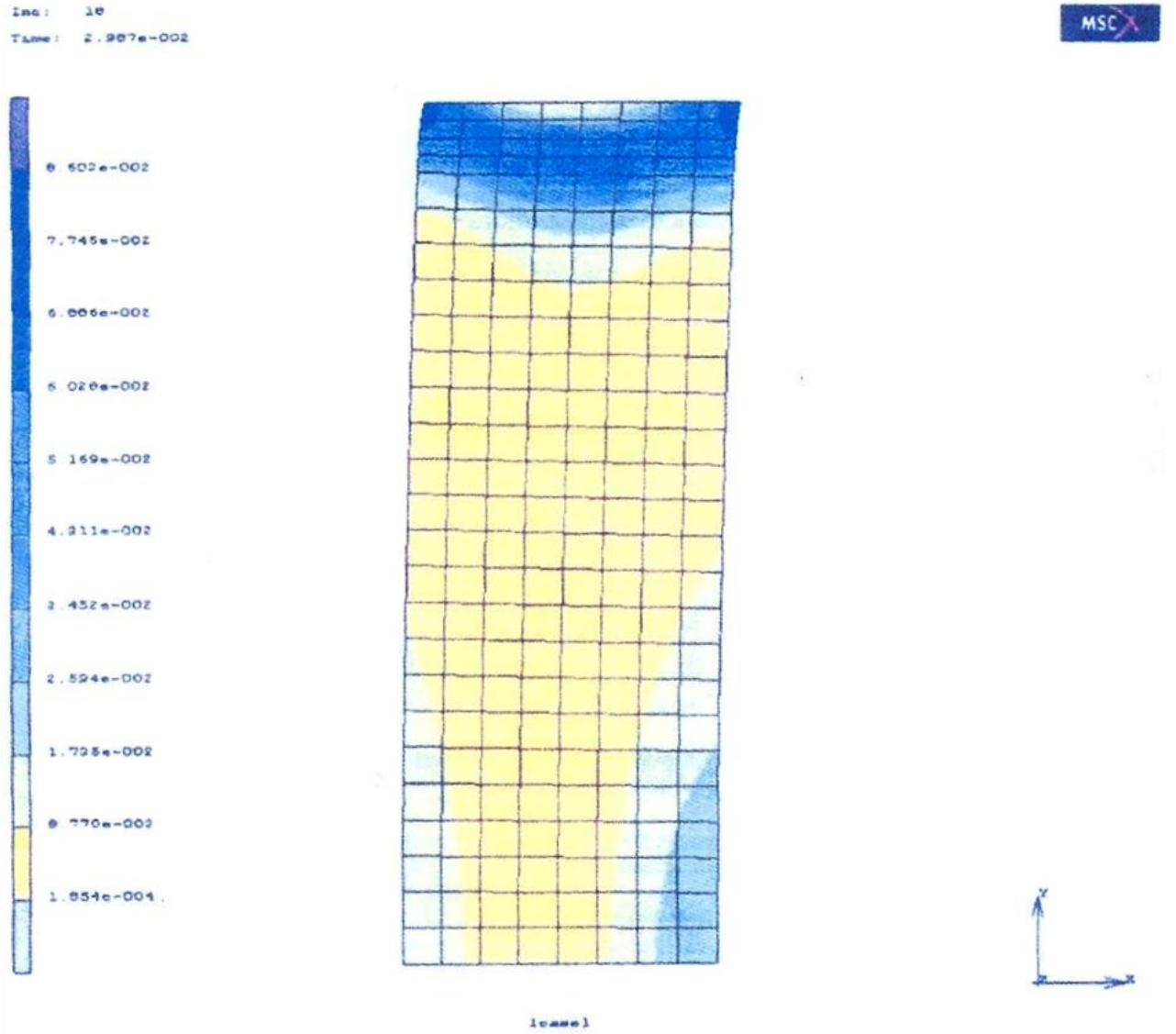
σ_y : 370 MPa



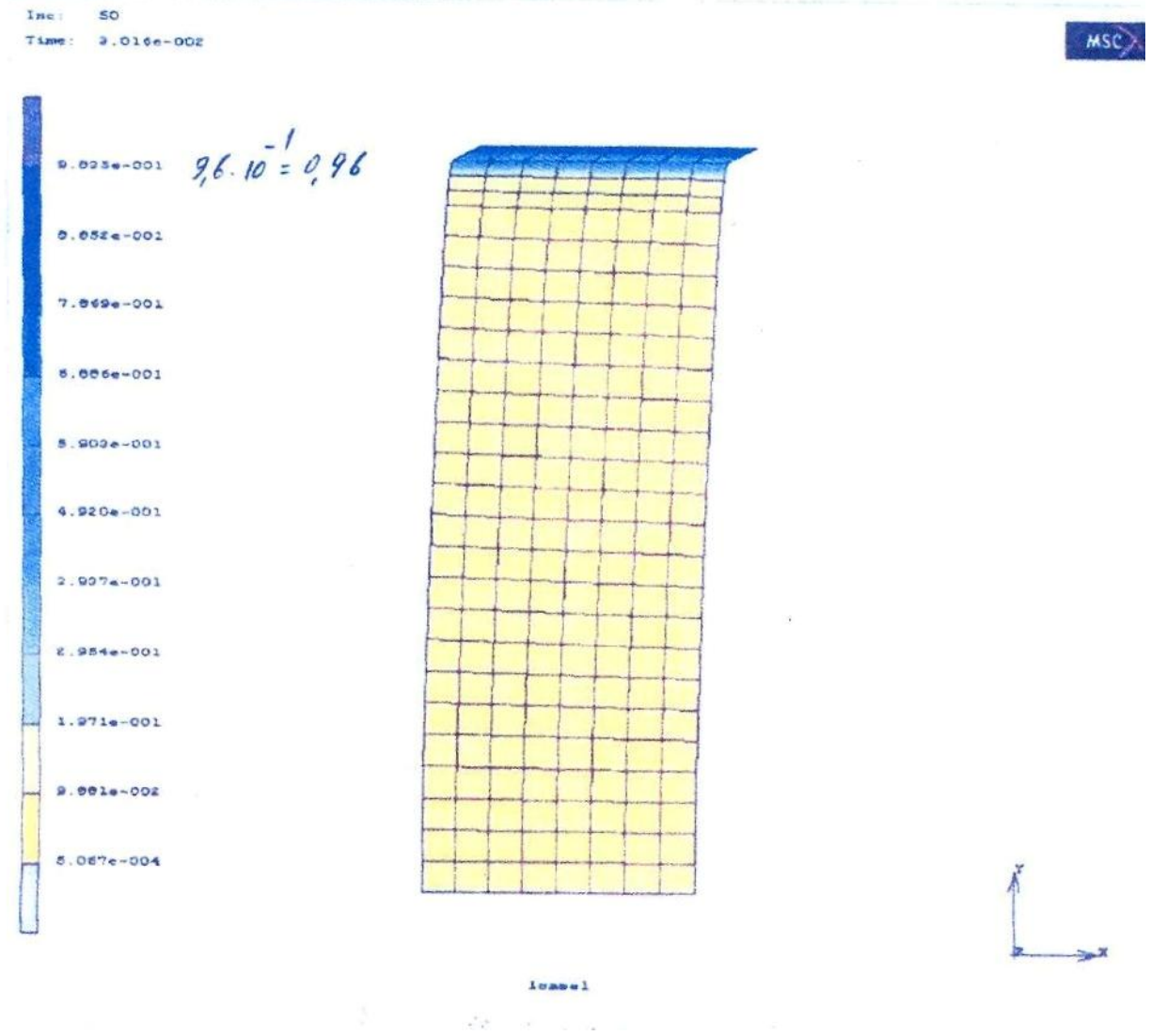
Şekil 9. Sonlu elemanlar modeli

- Sonuçlar;

Analiz sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki Şekil 10,11 ve 12’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi böyle bir yük altında 0.96’lık bir birim uzama (strain) değerine ulaŐılmıŐtır. Plak yüzeyine $5.36 \cdot 10^9$ Pa ‘lık yük uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar aŐađıda verilmiştir. Toplam Şekil değiştirme enerjisi değerı 46.32 J olarak elde edilmiştir.

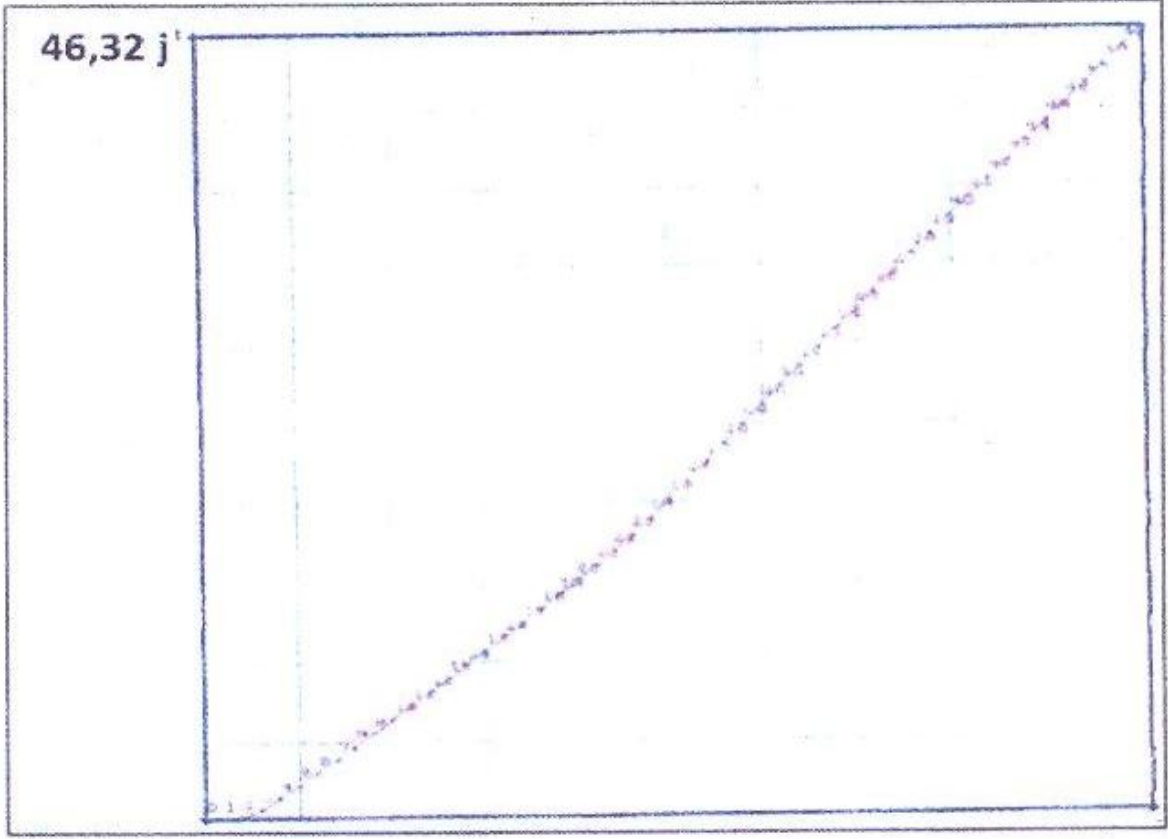


Şekil 10. Yükleme altında plağın deformasyonu ve maksimum asal plastik strain (Şekil değişimi) 18. Step’deki dağılımı.



Şekil 11. Yükleme altında plağın deformasyonu ve maksimum asal palstik gerilme (şekil değişimi) 50. Step'deki dağılımı.

(Not: Şekildeki model diskin merkezden kenara kadar olan yarım modelidir. Simetriden dolayı diğer yarım da aynı gerilme haline sahiptir.)

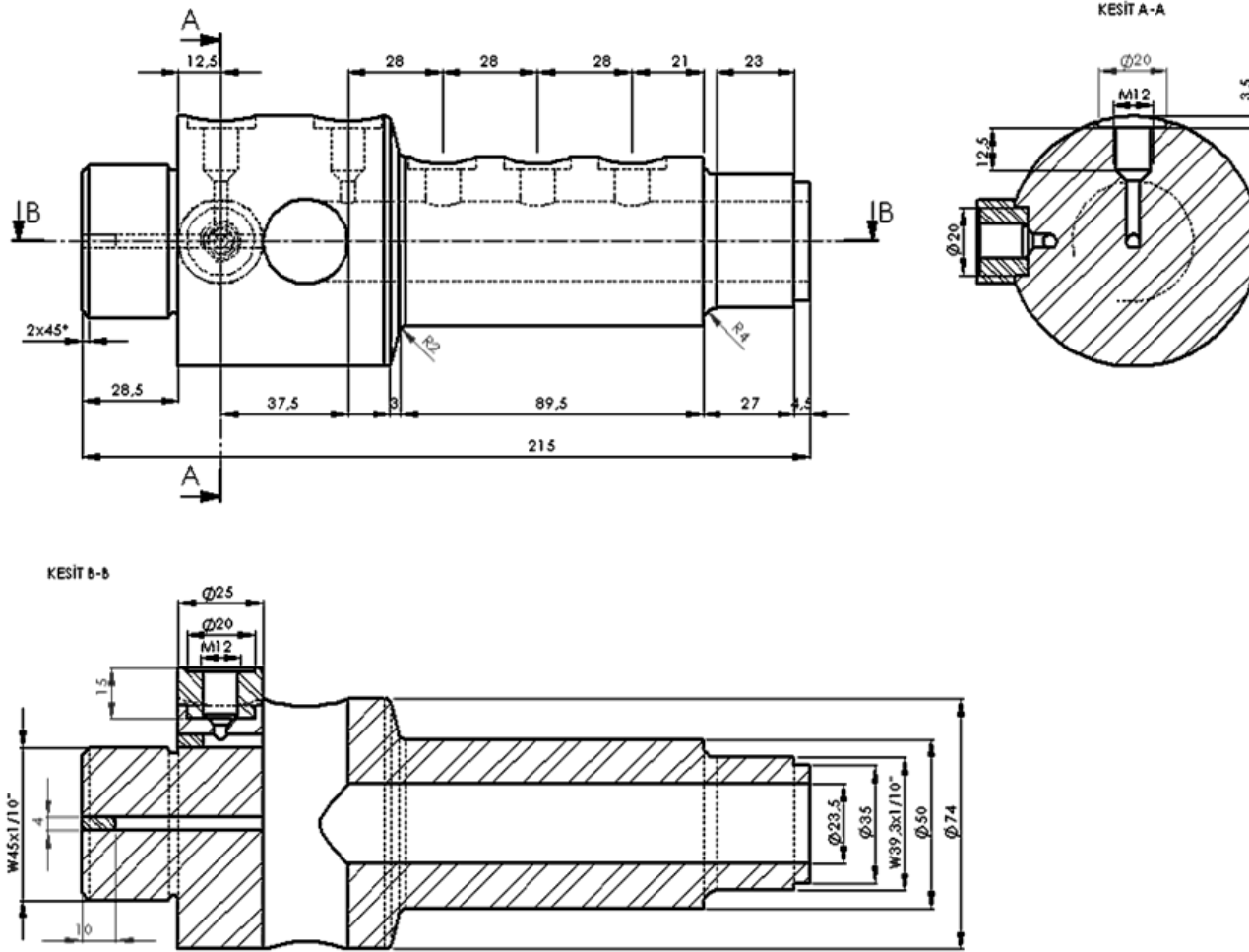


Şekil 12. Toplam şekil değiştirme (strain) enerjisinin step ile değişimi

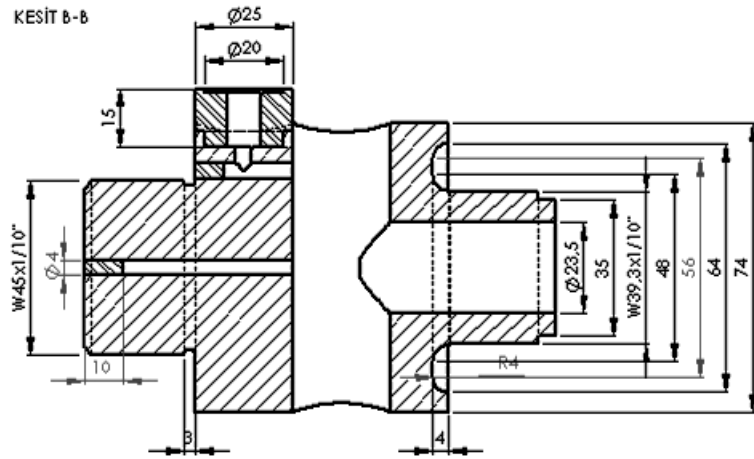
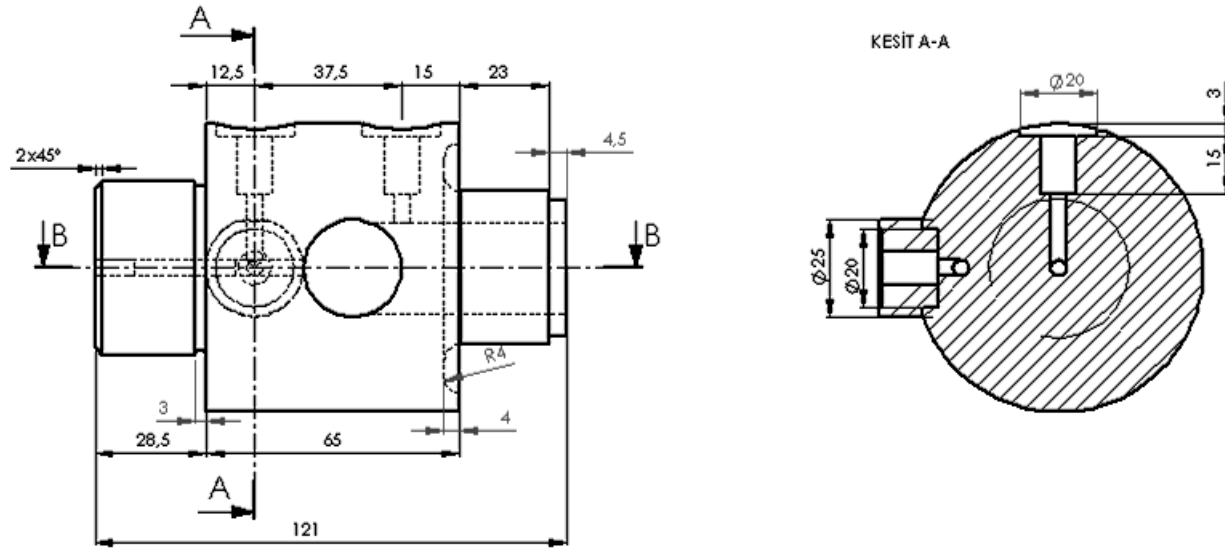
Metal malzemeler için çekme deneyi eğrisine bakacak olursak, akma konumundan sonra kopma noktasına kadar (diskte diskin parçalanmasına karşılık gelir) uzun bir şekil değiştirme bölgesi var. Elastik enerji bu eğrinin altında kalan alandır. Diskte en büyük gerilmeler çevre boyunca noktalarda oluşacağından, parçalanma da çevre boyunca olacaktır. Dolayısıyla gerçeğe yakın gerilme dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ile yapıldığında, parçalanmaya karşılık gelen enerji yaklaşık 46 Joule'e kadar çıkıyor.

Not 1: Tübitak projesinde kullandığımız ve tasarımı bize ait olan iki adet "CARDOX" deney kafası Şekil 13 ve 14'te, bilgi için gösterilmiştir.

Not 2: "CARDOX" kazı sisteminin termodinamik çözümlenmesinde "HP50g Graphing Calculator" ile yapılan programa göre sonuç değerleri, Tablo 3 ve 4'te verilmiştir. (Semboller için Şekil 1'e bakınız.)



Şekil 13. Tübitak projesi (MİSAG 224) CARDOX-DENEY KAFASI I Malzeme Ç4140 (42CrMo4)



Şekil 14. Tübitak projesi (MİSAG 224) CARDOX-DENEY KAFASI II Malzeme Ç4140 (42CrMo4)

CO₂ Gaz Patlatmalı Kazı Sistemi (CARDOX)
Termodinamik Program (HP50g) Sonuçları:

Tablo 3 – Verilen değerlere göre hesap sonuçları (P₀=2360 bar için)

VERİLENLER		
P ₀ =2360 bar		
TÜP		
	F57	F57L
<i>m sıvı CO2 (kg)</i>	0,82	1,25
<i>V (m³)</i>	7,25·10 ⁻⁴	1,08·10 ⁻³
<i>L_{tüp fay.} (m)</i>	1,245	1,753
<i>G_{tüp top.} (kgf)</i>	12,73	20
<i>L (m)</i>	0,0425	
<i>d₁ (mm)</i>	Ø23,5	
<i>d₂ (mm)</i>	Ø25	
<i>s (mm)</i>	4,4	

SONUÇLAR					
P ₀ =2360 bar					
Sembol	F57	F57L	Sembol	F57	F57L
<i>g₀ (m³/kg)</i>	8,84·10 ⁻⁴	8,64·10 ⁻⁴	<i>M₂</i>	3,12	3,286
<i>ρ₀ (kg/m³)</i>	1131	1157,4	<i>P₀₂</i>	2381	2382
<i>T₀ (K)</i>	1104,6	1079,4	<i>T₀₁ (K)</i>	1104,6	1079,4
<i>P₁ (bar)</i>	2285	2309	<i>T₀₂ (K)</i>	1107	1082
<i>T₁ (K)</i>	1096,6	1074	<i>F_y (N)</i>	31363	26324
<i>V₁ (m/s)</i>	116	94,4	<i>F_x (N)</i>	105566	104551
<i>ρ₁ (kg/m³)</i>	1103	1138	<i>ṁ₂ (kg / s)</i>	27,8	23,3
<i>A</i>	705,7	1045,71	<i>t₂ (s)</i>	0,0147	0,0268
<i>B</i>	700,6	1040,6	<i>ṁ₁ (kg / s)</i>	55,6	46,6
<i>x</i>	2,387	2,542	<i>t₁ (s)</i>	0,147	0,0268
<i>T₂ (K)</i>	459	422,6	<i>E_{S1} (Nm)</i>	223811	347306
<i>V₂ (m/s)</i>	1045	1054	<i>E_k (kJ)</i>	447,6	694,6
<i>ρ₂ (kg/m³)</i>	54,2	45	<i>M₃</i>	0,44	0,43
<i>P₂ (bar)</i>	47	36	<i>P₃(bar)</i>	511	432,6
<i>M₁</i>	0,22	0,18	<i>T₃ (K)</i>	1077	1053,8
<i>P₀₁</i>	2360	2360	<i>ρ₃ (kg/m³)</i>	251	217,3
<i>V₃ (m/s)</i>	225,5	218,4	<i>V_{kr} (m/s)</i>	485,4	479,8
<i>P₀₃ (bar)</i>	578	487	<i>ρ_{kr} (kg/m³)</i>	116,7	99
<i>T₀₃ (K)</i>	1107	1082	<i>P_{kr}(bar)</i>	213,3	176,7
<i>T_{kr} (K)</i>	967	945,5	-	-	-

Tablo 4 – Verilen değerlere göre hesap sonuçları ($P_0=2360$ bar için)

VERİLENLER		
$P_0 = 2760$ bar		
TÜP		
	F57	F57L
m sıvı CO2 (kg)	0,82	1,25
V (m^3)	$7,25 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$
$L_{tüp, fay.}$ (m)	1,245	1,753
$G_{tüp top.}$ (kgf)	12,73	20
L (m)	0,0425	
d_1 (mm)	Ø23,5	
d_2 (mm)	Ø25	
s (mm)	5,2	

SONUÇLAR					
$P_0=2760$ bar					
Sembol	F57	F57L	Sembol	F57	F57L
ϑ_0 (m^3/kg)	$8,84 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$	V_2 (m/s)	1130	1140
ρ_0 (kg/m^3)	1131	1157,4	ρ_2 (kg/m^3)	54,2	45
T_0 (K)	1291,8	1262,4	P_2 (bar)	55	42
P_1 (bar)	2672	2700	M_1	0,22	0,18
T_1 (K)	1282,5	1256	P_{01} (bar)	2760	2760
V_1 (m/s)	126	102	M_2	3,12	3,286
ρ_1 (kg/m^3)	1103	1138	P_{02} (bar)	2784	2785
A	705,7	1045,71	T_{01} (K)	1292	1262,4
B	700,6	1040,6	T_{02} (K)	1295	1265,5
x	2,387	2,542	F_y (N)	36678	30786
T_2 (K)	537	494	F_x (N)	123459	122272
\dot{m}_2 (kg / s)	30,1	25,2	ρ_3 (kg/m^3)	251	217,3
t_2 (s)	0,0136	0,0248	V_3 (m/s)	243,8	236
\dot{m}_1 (kg / s)	60,1	50,4	P_{03} (bar)	676	569,4
t_1 (s)	0,0136	0,0248	T_{03} (K)	1295	1265,5
E_{S1} (Nm)	261745	406171	T_{kr} (K)	1131	1105,7
E_k (kJ)	523,4	812,4	V_{kr} (m/s)	525	519
M_3	0,44	0,43	ρ_{kr} (kg/m_3)	116,7	99
P_3 (bar)	598	506	P_{kr} (bar)	249,4	206,6
T_3 (K)	1260	1232,4	-	-	-

Tablo 3 ve Tablo 4'e baktığımızda, başlangıç değerleri (120 bar basınç 20 °C'de sıkıştırılmış sıvı CO₂) aynı kalmak üzere :

- $m_{F57L,2360bar} / m_{F57,2360bar} = 1,25 / 0,82 = 1,52$
- $V_{F57L,2360bar} / V_{F57,2360bar} = 1,08 \times 10^{-3} / 7,25 \cdot 10^{-4} \cong 1,50$
- $E_{kF57L,2360bar} / E_{kF57,2360bar} = 694,6 / 447,6 = 1,55$
- $E_{kF57L,2760bar} / E_{kF57,2760bar} = 812,4 / 523,4 = 1,55$

elde edilir ki, oranlar görüldüğü gibi birbirine çok yakındır. (1,50...1,55)

Bu bilgilerle yeni bir tüp konstrüksiyonu yapabiliriz. Örneğin, patlama enerjisinin $W_{2760bar} = 1000kJ$ olması istensin.

Yöntem olarak F57 tüpü, KARŞILAŞTIRMA (mukayese) TÜPÜ kabul edilmiş ve hesaplar bu varsayıma göre yapılmıştır.

$$m = 0,82 kg \text{ sıvı } CO_2$$

$$V = 7,25 \cdot 10^{-4} m^3 \text{ (Tüp dolum hacmi)}$$

$$E_{k2360bar} = 447,6 kJ$$

$$E_{k2760bar} = 523,4 kJ$$

W- istenen patlama enerjisi [kJ]

$$\left(\frac{W}{447,6} \right)_{2360bar} = \lambda_{2360bar} \quad (49)$$

$$\left(\frac{W}{523,4} \right)_{2760bar} = \lambda_{2760bar} \quad (50)$$

dolayısıyla 2360 bar basınç için,

$$m = 0,82 \cdot \lambda_{2360bar} \quad (51)$$

$$V = 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{2360bar} \quad (52)$$

ve, 2760 bar basınç için,

$$m = 0,82 \cdot \lambda_{2760bar} \quad (53)$$

$$V = 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{2760bar} \quad (54)$$

başlangıç değerleriyle hesaba girilebilir.

$W_{2760bar} = 1000kJ$ olduğuna göre,

$$\lambda_{2760bar} = \frac{W_{2760bar}}{523,4} = \frac{1000}{523,4} \cong 1,90$$

$$\left\| \begin{array}{l} m = 0,82 \cdot 1,90 = 1,558kg \\ V = 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,90 = 1,37 \cdot 10^{-3} m^3 \end{array} \right.$$

değerleri ile programa girilirse veya hesap yapılırsa,

$$\left\| \underline{E_k = 1054kJ} \right.$$

bulunur ki, istenen 1000 kJ patlama enerjisine çok yakındır.

Acaba yeni konstrüksiyon tüpün, faydalı uzunluğu ve ağırlığı ne kadardır?

Tüpün faydalı uzunluğu :

Tüpün faydalı uzunluğu, kayaç içinde bulunan tüp uzunluğu olarak tarif edilmiştir.

Kolaylık olması bakımından, F57 tüpünün sadece orta parçasında (L_{1t}) değişiklik yapalım. (L_{1t}) uzunluğuna karşılık gelen dolun hacmi;

$$V_{1t} = V - V_{diğer}$$

$V_{tdiğer}$ - Deşarj kafası ve dolun kafası taraflarında bulunan toplam dolun hacmi

$$V_{tdiğerF57} = 12,32055 \cdot 10^{-5} m^3 \quad (\text{Hesaplanan})$$

dolayısıyla,

$$V_{1r} = V - 12,32055 \cdot 10^{-5} m^3$$

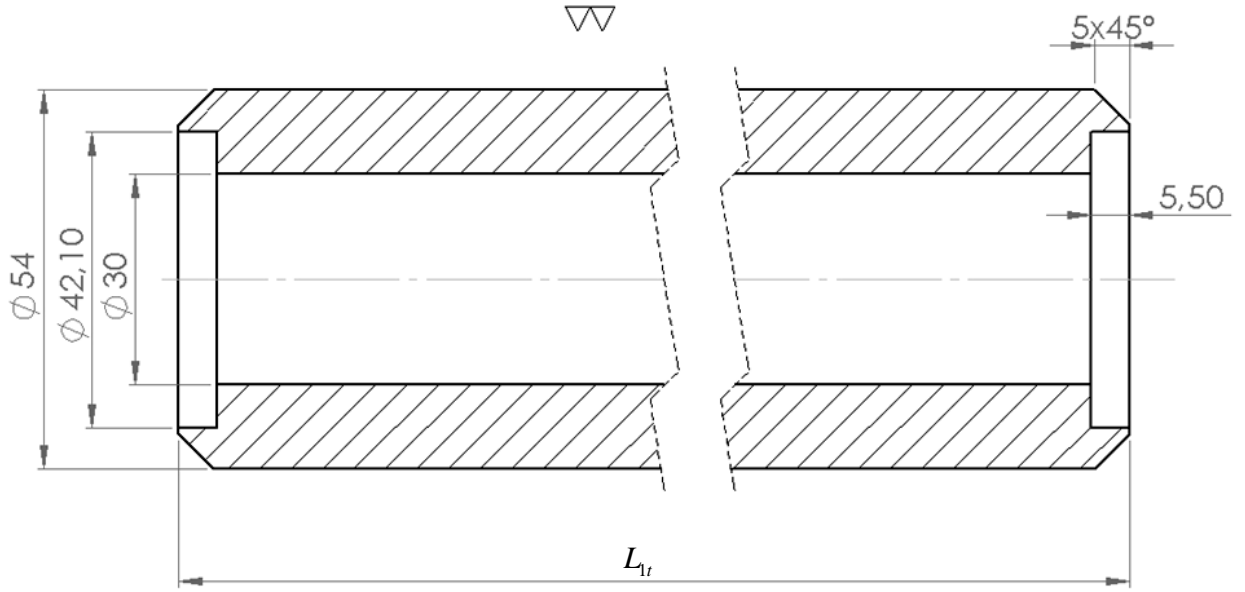
yazılır ve,

$$V_{1r} = \frac{\pi d^2}{4} (L_{1r} - 0,011)$$

eşitliği ile (Şekil 15),

$$\parallel \underline{L_{1r} = 1414,71 \cdot V - 0,1633} \quad \frac{L_{1r}}{m} \Big| \frac{V}{m^3} \quad (55)$$

elde edilir.



Şekil 15. Şekil 15: F57 tütünün orta parçası

$$L_{1rF57} = 862mm$$

$$L_{1rF57L} = 1370mm$$

$$F57 \text{ tütünün faydalı uzunluğu} \quad : \quad L_{fayF57} = 1245mm$$

$$F57 \text{ tütünün orta parça uzunluğu} \quad : \quad L_{1rF57} = 862mm$$

Yeni konstrüksiyon tütün faydalı uzunluğu ,

$$L_{fay} = 1245 - 862 + L_{1t} \cdot 1000$$

$$\left\| \frac{L_{fay} = 383 + L_{1t} \cdot 1000}{mm} \left| \frac{L_{1t}}{m} \right. \right. \quad (56)$$

eşitliğinden elde edilebilir.

Tüpün ağırlığı :

Yeni konstrüksiyon tüpün ağırlığını da aynı düşünce yöntemiyle hesaplayalım.

Orta parçanın ağırlığı,

$$G_{F57orta} = \frac{\pi}{4} (5,4^2 - 3,0^2) \cdot 86,2 (7,8 \text{ gr} / \text{cm}^3)$$

$$G_{F57orta} = 10646 \text{ g}$$

Orta parçasız ve sıvı CO₂'siz tüp ağırlığı,

$$G_{boş} = \underbrace{12,73 \text{ kg}}_{\text{Dolu tüp ağırlığı}} - (10,646 + \underbrace{0,82}_{\text{Sıvı CO}_2 \text{ ağırlığı}}) \text{ kg}$$

$$G_{boş} = 1,264 \text{ kg}$$

Yeni konstrüksiyon tüpün ağırlığı,

$$G_{yeni} = 1,264 + \frac{\pi}{4} (5,4^2 - 3,0^2) \cdot L_{1t} \cdot 7,8 + m$$

$$\left\| \frac{G_{yeni} = 1264 + 12,35 \cdot L_{1t} \cdot 7,8 + m}{kg} \right. \quad (57)$$

$$\frac{G_{yeni}}{kg} \left| \frac{L_{1t}}{m} \right| \frac{m}{kg}$$

denklemden hesaplanabilir.

Patlama enerjisi :

Patlama enerjisi denklemini,

$$E_{patlama} = \frac{P_2}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \cdot V \quad (\text{Eşitlik 11 ve 12})$$

ele alarak, başlangıç değerleri (*120 bar basınçta 20°C de sıkıştırılmış CO₂*) aynı kalmak şartıyla yeni konstrüksiyon tüp değerleri ile ilgili kullanışlı ve basit yeni hesap yöntemleri bulabilirmiyiz?

P_0 basıncına ve T_0 sıcaklığına çıkan CO_2 gazının genişlemesi sonucunda elde edilen patlama enerjisini,

$$E_{patlama} (= E_{p0}) = \frac{P_0}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{T_3}{T_0}\right) \cdot V$$

$$\frac{T_3}{T_0} = \left(\frac{P_3}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$P_3 = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

$$E_{p0} = \frac{P_0 \cdot 100}{1,289-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{P_0}\right)^{\frac{1,289-1}{1,289}}\right) \cdot V$$

$$E_{p0} = 346 \cdot P_0 \cdot (1 - P_0^{-0,224}) \cdot V$$

$$\left\| \underline{E_{p0} = 346 \cdot (P_0 - P_0^{0,776}) \cdot V} \right. \quad (58)$$

$$\frac{E_{p0}}{\text{kJ}} \left| \frac{P_0}{\text{bar}} \right| \frac{V}{\text{m}^3}$$

şeklinde yazabiliriz.

Tüp dolum hacmi de,

$$\left\| \frac{V = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot E_{p0} \cdot (P_0 - P_0^{0,776})^{-1}}{m^3} \left| \frac{E_{p0}}{kj} \right| \frac{P}{bar} \right. \quad (59)$$

denkleminde hesaplanabilir. Görüldüğü gibi, Eşitlik 58 ve 59 da, tüpün tipi önemli değildir.

Yeni konstrüksiyon tüpte, sıvı CO_2 miktarı,

$$m = \frac{V [m^3]}{v_0 [m^3/kg]}$$

12 MPa basınç ve 295 K sıcaklığında çıkıştırılmış sıvı CO_2 nin özgül hacmi,

$$v_0 \cong 8,84 \cdot 10^{-4} m^3/kg \quad (\text{Sayfa 6})$$

olduğuna göre,

$$m = \frac{V [m^3]}{8,84 \cdot 10^{-4} [m^3/kg]}$$

$$\left\| \underline{m = 1131 \cdot V} \quad \frac{m}{kg} \left| \frac{V}{m^3} \right. \quad (60)$$

elde edilir. Başlangıç değerleri (120 bar , 20°C) aynı kaldığı sürece, Eşitlik 60 ta da tüpün tipi önemli değildir.

Özetlersek;

İstenen patlama enerjisi E_{p0} olsun. Seçilen P_0 basıncı ile:

- Tüpün dolum hacmi V (Eşitlik 59)
- *• Tüp orta parçasının uzunluğu L_{t1} (Eşitlik 55)
- *• Tüpün faydalı uzunluğu L_{fay} (Eşitlik 56)
- Sıvı CO_2 miktarı m (Eşitlik 60)
- *• Tüpün toplam ağırlığı G_{yen} (Eşitlik 57)

elde edilebilir. (*: $\phi 54/\phi 30$ tüpler için geçerlidir).

Isıtıcının vermiş olduğu ısı miktarı:

Başlangıç değerlerinin değişmiyor kabulü ile ısıtıcının vermiş olduğu ısı,

$$Q_{isi} = m \cdot (u_2 - u_1) \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$P_0 \cdot v_0 = R \cdot T_2 \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$T_2 = \frac{P_0 \cdot 100 \cdot 8,84 \cdot 10^{-4}}{0,1889}$$

$$\| \underline{T_2 = 0,468 \cdot P_0} \quad \left. \frac{T_2}{K} \right| \frac{P_0}{bar} \quad (61)$$

$$u_1 = 173 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Sayfa 6})$$

$$u_2 = u_{g,295K} + C_{v0} \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{Sayfa 8})$$

$$u_{g,295K} = 297,54 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Sayfa 8})$$

$$u_2 = 297,54 + 0,657 \cdot (0,468 \cdot P_0 - 295)$$

$$\| \underline{u_2 = 103,725 + 0,3075 \cdot P_0} \quad (62)$$

$$\left. \frac{u_2}{kJ/kg} \right| \frac{P_0}{bar}$$

$$Q_{isi} = m \cdot (103,725 + 0,3075 \cdot P_0 - 173)$$

$$\| \underline{Q_{isi} = m \cdot (0,3075 \cdot P_0 - 69,275)} \quad (63)$$

$$\left. \frac{Q_{isi}}{kJ} \right| \frac{m}{kg} \left| \frac{P_0}{bar} \right.$$

şeklinde kolayca hesaplanabilir.

Şimdi, CARDOX, B20, B37 ve C74 tüplerini ele alalım ve bir de kabul yapalım. Tüplerin çapları; $\phi 54\text{mm}/\phi 30\text{mm}$ olsun. (F57 ve F57L tüplerinde olduğu gibi)

CO_2 şarjı:

$$\left. \begin{array}{l} m_{B20} = 0,29\text{ kg} \\ m_{B37} = 0,60\text{ kg} \\ m_{C74} = 1,25\text{ kg} \end{array} \right\} \text{katalog değerleri}$$

$$m = 1131 \cdot V \text{ (Eşitlik 60)}$$

olduğuna göre;

$$V_{B20} = 0,29/1131 = 2,564 \cdot 10^{-4} m^3 \quad \text{gibi}$$

$$V_{B37} = 5,3 \cdot 10^{-4} m^3$$

ve

$$V_{C74} = 1,1 \cdot 10^{-3} m^3$$

olarak hesaplanır.

Patlama enerjisi,

$$E_{p0} = 346 \cdot (P_0 - P_0^{0,776}) \cdot V \quad \text{(Eşitlik 58)}$$

$$E_{p0,B20,1900\text{bar}} = 346 \cdot (1900 - 1900^{0,776}) \cdot 2,564 \cdot 10^{-4}$$

$$\| \underline{E_{p0,B20,1900\text{bar}} \cong 137,5\text{ kJ}}$$

Isı miktarı,

$$Q_{isi} = m \cdot (0,3075 \cdot P_0 - 69,275) \quad \text{(Eşitlik 63)}$$

$$Q_{isi,B20,1900\text{bar}} = 0,29 \cdot (0,3075 \cdot 1900 - 69,275)$$

$$\| \underline{Q_{isi,B20,1900\text{bar}} = 149,34\text{ kJ}}$$

Bunun gibi, diğer değerleri de hesaplayıp sonuçları toplu olarak Tablo 5 te gösterelim.

Tablo 5 –Çeşitli tüplere ait karakteristik değerler (Program: HP50g Graphing Calculator)

* $E_{P0} = 1000 \text{ kJ}$, hem 2360bar hem de 2760 bar için istenmiştir.

** Katalog değerleridir.

*** Uyumsuzluk var incelenmeli.

Not: Tüp çapları aynı ve $\phi 54 \text{ mm} / \phi 30 \text{ mm}$ alınmıştır.

Tüp:		B20		B37		F57		F57L		C74		Föz			
$V [m^3]$		$2,58 \cdot 10^{-4}$		$5,3 \cdot 10^{-4}$		$7,28 \cdot 10^{-4}$		$1,08 \cdot 10^{-3}$		$1,105 \cdot 10^{-3}$		$1,493 \cdot 10^{-3}$		$1,27 \cdot 10^{-3}$	
$m [kg]$		0,29**		0,60**		0,824		1,23		1,25**		1,69		1,44	
$L_t [m]$		0,20		0,59		0,867		1,371		1,4		1,95		1,63	
$L_{fay} [mm]$		584,3		973,3		1250		1754		1784		2332		2012,5	
$G_{yen} [kg]$		4,04		9,157		12,8		19,43		19,8		27		22,82	
VERİLENER	$P_0 [bar]$	1900	2360	1900	2360	2360	2760	2360	2760	1260	1900	2360	2760		
	$E_{P0} [kJ]$	137,5	172,6	284,2	356,8	488	575	727	856	382,6	598,8	1000	1000		
$Q_{isi} [kJ]$		150	191,3	310,3	395	541	642	806	956,3	397,8	653,7	1108	1117		
Q_{isi} / E_{P0}		1,09	1,10	1,09	1,10	1,10	1,116	1,108	1,117	1,04***	1,09	1,108	1,117		

Tablo 5 incelendiğinde, ısıtıcının vermiş olduğu ısı miktarının, patlama enerjisine oranının,

$$\left\| \frac{Q_{ısı}}{E_{P0}} \cong 1,1 \right. \quad (64)$$

olduğu görülürki, bu çok önemli bir sonuçtur.

Tüp, dış yüzeyinde ısınma kontrolü:

Acaba, patlamadan sonra tüp ısınır mı?. Ne kadar ısınır, ısıtıcının vermiş olduğu ısıda, tüpün ısınmasından dolayı ısı kaybı göz ardı edilebilir mi?. P_0 basıncına ve T_0 sıcaklığına çıkan gaz CO_2 nin, kısa süreli adyabatik genişleme yaparak deşarz kafasından kayaç içine çıktığı kabulünün, ne kadar gerçekçi bir düşünce olduğu gibi konuları incelemeye çalışacağız.

Kimyasal enerji kaynağı (ısıtıcı) tarafından tüp içinde üretilen enerji, ancak deşarz süresi boyunca tüp hacmi içinde depo edilebilir. Dolayısıyla, tüpteki sıcaklık dağılımı, zamanın bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar.

Eğer sıcaklık zamanın bir fonksiyonu ise bu tür problemler “Geçici Rejim” olarak adlandırılır. Öyleyse, “Geçici Rejimde Isı iletimi” ni ele alalım ve bazı boyutsuz sayıların tanımlarını yapalım;

Biot Sayısı B_i :

Malzemede iletim ısıl direncinin, yüzeyde taşınım ısıl direncine oranını gösteren boyutsuz bir sayıdır. Biot sayısı, cismin yüzeyi ve akışkan arasındaki sıcaklık farkına göre cismin içindeki sıcaklık düşüşünün bir ölçüsünü verir. Bu nedenle, geçici rejimde ısı iletimi problemlerinde yapılması gereken ilk iş, Biot (B_i) sayısının hesaplanmasıdır. Bu sayı;

$$B_i = \frac{h \cdot Lc}{k} \quad \left| \frac{h}{W/(m^2 \cdot K)} \right| \left| \frac{Lc}{m} \right| \left| \frac{k}{W/(m \cdot K)} \right. \quad (65)$$

olarak tanımlanır.

h - Isı taşınım katsayısı

k - Isı iletim katsayısı

Lc - Karakteristik uzunluk (veya cismin karakteristik uzunluğu)

$$Lc = \frac{V}{As} \qquad \frac{Lc}{m} \left| \frac{V}{m^3} \right| \frac{As}{m^2} \qquad (66)$$

V - Cismin (veya katının) hacmi

As - Cismin (veya katının) yüzey alanı

Fourier sayısı Fo :

Başlangıçta her tarafındaki sıcaklığı, $T_{sıvıCO_2} = T_{çelik,tüp} [^{\circ}C]$ hacmi $V [m^3]$, iç yüzey alanı $As [m^2]$, yoğunluğu $\rho [kg/m^3]$, özgül ısısı $c [J/(kg \cdot K)]$ ve ısı iletim katsayısı $k [W/(m \cdot K)]$ olan çelik CARDOX tüpünü göz önüne alalım. Tüp aniden içinde, ısıtıcı tarafından üretilen enerjiden dolayı sıcaklığı $T_{gazCO_2} [^{\circ}C]$ olan bir gaz CO_2 ortamı ile karşı karşıya kalmaktadır.

Önce, gaz CO_2 ile tüpün iç yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısı $h [W/(m^2 \cdot K)]$ olan tüpteki sıcaklık değişimini, zamana bağlı olarak veren ifadeyi bulmaya çalışalım.

Tüpte sıcaklık gradyanı olmadığından (içlerindeki sıcaklık gradyanı ihmal edilebilen cisimler) her noktada, herhangi bir t anında her noktadaki sıcaklık T kabul edilebilir. Tüpün iç yüzeyine taşınım ile geçen ısı, tüpün iç enerjisindeki artma kadar olacaktır. Bu durumda,

$$q = -h \cdot A_s \cdot (T - T_{gazCO_2}) = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \qquad (67)$$

yazılabilir.

$$dt = -\frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A_s} \cdot \frac{dT}{T - T_{gazCO_2}}$$

Başlangıçta $t = 0$ için $T = T_{sıvıCO_2} = T_{çelik,tüp}$ olduğundan, sıcaklığın zamana göre değişimi için

$$t = -\frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A_s} \cdot \ln \left(\frac{T - T_{gazCO_2}}{T_{sıvıCO_2} - T_{gazCO_2}} \right)$$

$$\frac{T - T_{gazCO_2}}{T_{sıvıCO_2} - T_{gazCO_2}} = e^{-t/\tau} \qquad (68)$$

elde edilebilir. Burada,

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{h \cdot A_s} \quad \left| \frac{c}{j / (kgK)} \right| \left| \frac{\rho}{kg / m^3} \right| \left| \frac{V}{m^3} \right| \left| \frac{h}{W / (m^2K)} \right| \left| \frac{A}{m^2} \right| \quad (69)$$

anlamında olup, zaman boyutunda olan bu büyüklük, "zaman sabiti" adını alır.

Denkem 69 dan faydalanarak,

$$\frac{t}{\tau} = t \cdot \frac{h \cdot A_s}{c \cdot \rho \cdot V} = t \cdot \frac{h \cdot (V/A_s)}{k} \cdot \frac{k}{c \cdot \rho \cdot (V/A_s)^2}$$

Şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte,

$$\frac{V}{A_s} = L_c \quad \text{Karakteristik uzunluk} \quad (\text{Eşitlik 66})$$

$$\frac{k}{\rho \cdot c} = \alpha \quad \text{Malzemenin ısı yayılım katsayısı} \quad (70)$$

$$\frac{\alpha}{m^2/s} \left| \frac{k}{W/(mK)} \right| \left| \frac{\rho}{kg/m^3} \right| \left| \frac{c}{J/(kgK)} \right|$$

olarak göz önüne alınırsa,

$$\frac{t}{\tau} = t \cdot \frac{h \cdot L_c}{k} \cdot \frac{\alpha}{L_c^2}$$

$$\frac{t}{\tau} = \left(\frac{h \cdot L_c}{k} \right) \cdot \left(\frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \right)$$

elde edilebilir. Burada,

B_i (Biot) sayısı,

$$B_i = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (\text{Eşitlik 65})$$

F_o (Fourier) sayısı,

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \quad (71)$$

olarak adlandırılır. Biot sayısı ile birlikte zamana bağlı problemleri belirleyen bir "boyutsuz zamandır".

Şu halde,

$$\frac{t}{\tau} = B_i \cdot F_o$$

olup Eşitlik 68,

$$\frac{T - T_{gazCO_2}}{T_{sıvıCO_2} - T_{gazCO_2}} = e^{(-B_i \cdot F_o)} \quad (72)$$

şeklinde yazılabilir.

Örnek uygulamayı F57 CARDOX tüpünde yapalım:

Ç4140 (42CrMo4) ıslah çeliğinden yapılmış CARDOX tüpü, 54 mm çapında ve 12 mm cidar kalınlığındadır. Sıvı CO_2 gaz haline geçmeden önce tüpün her tarafı $T_{sıvıCO_2} = T_{çeliktüp} = 20^\circ C$ dir. Sıvı CO_2 gaz haline geçince gaz sıcaklığı, $T_{gazCO_2} = 1100K = 827^\circ C$ ve iç yüzeyde taşınım katsayısı h_{gazCO_2} , Tablo 6 ya göre ortalama;

$$h_{gazCO_2} = 15W / (m^2 K) \quad (\text{Doğal ısı taşınımı})$$

olmaktadır.

Sıvı CO_2 nin dolun hacmi: $V_{F57} = 7,25 \cdot 10^{-4} m^3$ (Tablo 3)

Dolum hacmine karşılık gelen dolun boyu,

$$V_{F57} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{F57,dolum}$$

$$7,25 \cdot 10^{-4} m^3 = \frac{\pi \cdot (0,03m)^2}{4} \cdot L_{F57,dolum}$$

$$\| \underline{L_{F57,dolum} \cong 1,026m}$$

Tablo 6 –Isı Taşınım katsayısı için örnek değerler [L.8].

İşlem	$h [W/(m^2 \cdot K)]$
Doğal Taşınım	
• Gazlar	2 - 25
• Sıvılar	50 - 1000
Zorlanmış Taşınım	
• Gazlar	25 - 250
• Sıvılar	50 - 20000

Dolum boyuna karşılık gelen, tüp iç yüzey alanı,

$$A_s = \pi \cdot d \cdot L_{F57,dolum}$$

$$A_s = \pi \cdot 0,030 \cdot 1,026$$

$$\| \underline{A_s = 9,7 \cdot 10^{-2} m^2}$$

Tüpün, dolum boyuna karşılık gelen hacmi (katının veya cismin hacmi),

$$V_{F57,katı} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,054^2 - 0,030^2) \cdot 1,026$$

$$\| \underline{V_{F57,katı} = 1,625 \cdot 10^{-3} m^3}$$

Karakteristik uzunluk,

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (\text{Eşitlik 66})$$

$$L_c = \frac{1,625 \cdot 10^{-3} m^3}{9,7 \cdot 10^{-2} m^2}$$

$$\| \underline{L_c = 1,675 \cdot 10^{-2} m}$$

bulunur.

Tablo 7 –Kıtu metallerin 6zellikleri [L.10]

Yapı	Ergime Noktası, K	300 K 'de 6zellikler				Çeşitli Sıcaklıklarda 6zellikler (K), k(W/m · K)/c _p (J/kg · K)					
		ρ kg/m ³	c _p J/kg · K	k W/m · K	α × 10 ⁶ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Karbon–manganez–silikon (%1 < Mn < %1.65 %0.1 < Si < %0.6)		8131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1090
Krom (düşük) çelikleri: ½ Cr–¼ Mo–Si (%0.18 C, %0.65 Cr, %0.23 Mo, %0.6 Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2 492	36.7 575	33.3 688	26.9 969
1 Cr–½ Mo (%0.16 C, %1 Cr, %0.54 Mo, %0.39 Si)		7858	442	42.3	12.2			42.0 492	39.1 575	34.5 688	27.4 969
1 Cr–V (%0.2 C, %1.02 Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			46.8 492	42.1 575	36.3 688	28.2 969
Paslanmaz çelikler: AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606
Kurşun	601	11,340	129	35.3	24.1	39.7 118	36.7 125	34.0 132	31.4 142		
Magnezyum	923	1740	1024	156	87.6	169 649	159 934	153 1074	149 1170	146 1267	
Molibden	2894	10,240	251	138	53.7	179 141	143 224	134 261	126 275	118 285	112 295
Nikel: Saf	1728	8900	444	90.7	23.0 232	164 383	107 485	80.2 592	65.6 530	67.6 562	71.8 562
Nikrom (%80 Ni, %20 Cr)	1672	8400	420	12	3.4			14 480	16 525	21 545	
İnconel X-750 (%73 Ni, %15 Cr, 6.7% Fe)	1665	8510	439	11.7	3.1	8.7	10.3	13.5	17.0	20.5	24.0
Niobyum	2741	8570	265	53.7	23.6	55.2 188	52.6 249	55.2 274	58.2 283	61.3 292	64.4 301
Paladyum	1827	12,020	244	71.8	24.5	76.5 168	71.6 227	73.6 251	79.7 261	86.9 271	94.2 281
Platin: Saf	2045	21,450	133	71.6	25.1	77.5 100	72.6 125	71.8 136	73.2 141	75.6 146	78.7 152
Alaşım 60Pt–40Rh (%60 Pt, 940 Rh)	1800	16,630	162	47	17.4			52 —	59 —	65 —	69 —
Renyum	3453	21,100	136	47.9	16.7	58.9 97	51.0 127	46.1 139	44.2 145	44.1 151	44.6 156
Rodyum	2236	12,450	243	150	49.6	186 147	154 220	146 253	136 274	127 293	121 311

Özellikler:

Tablo 7 Çelik tüp; Ç4140 (42CrMo4) ortalama sıcaklık, $T \cong (295 + 1104)/2 \cong 700 K$ için

$$\rho = 7858 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\alpha = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\left. \begin{array}{l} k_{600K} = 39,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \\ k_{800K} = 34,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} k_{700K} = \frac{39,1 + 34,5}{2} \\ \parallel \underline{k_{700K} \cong 37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} c_{P600K} = 575 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ c_{P800K} = 688 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} c_{P700K} = \frac{575 + 688}{2} \\ \parallel \underline{c_{P700K} = 631 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \end{array}$$

$t = 15 \cdot 10^{-3}$ saniyede (Deşarj süresi), Biot ve Fourier sayılarını L_c ile hesaplayalım.

$$B_i = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (\text{Eşitlik 65})$$

$$B_i = \frac{15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 1,675 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})}$$

$$\parallel \underline{B_i = 6,8 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \quad (\text{Eşitlik 71})$$

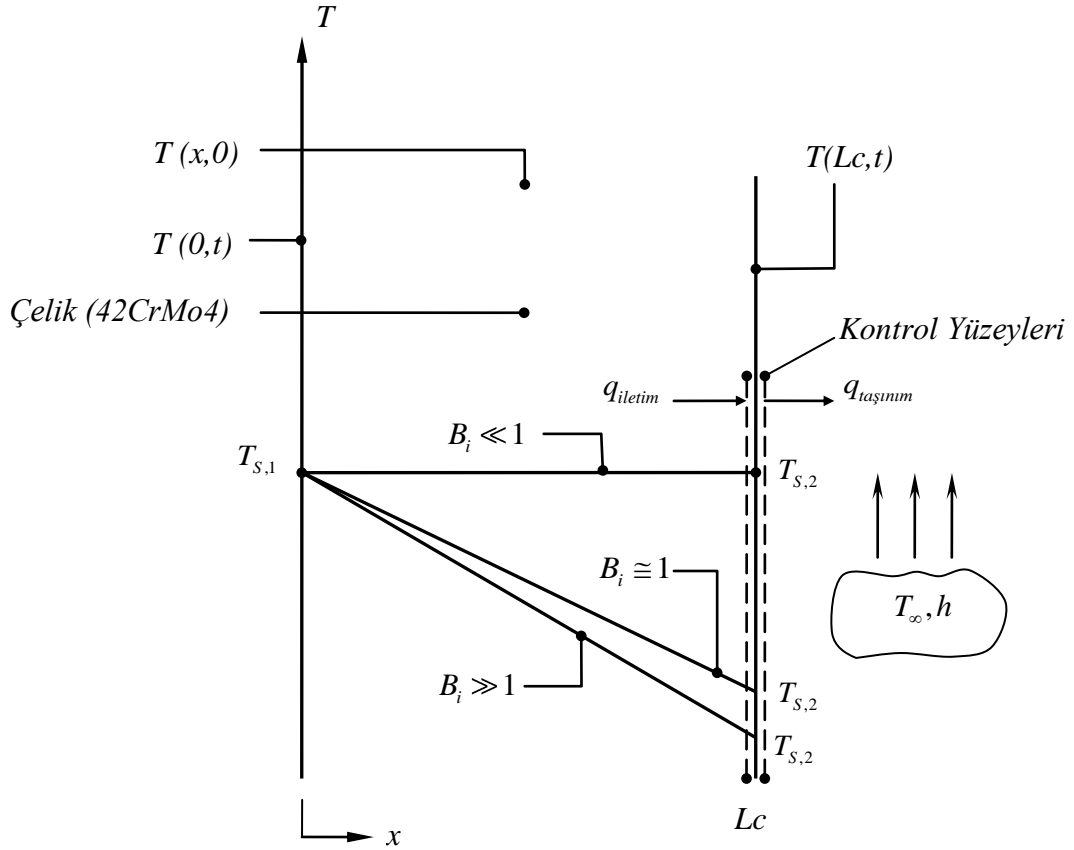
$$F_o = \frac{12,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{(1,675 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$\parallel \underline{F_o = 6,5 \cdot 10^{-4}}$$

Not : Genel olarak literatürde B_i sayısının $B_i < 0,1$ olması durumunda, cismin içindeki sıcaklık dağılımı ihmal edilebilir mertebelere düşer. Böyle durumlar, cisim içinde sıcaklık gradyanının olmadığı sistemler olarak gözönüne alınabilir [L.7].

$B_i = 6,8 \cdot 10^{-3} = 0,0068 \ll 0,1$ olduğundan, çelik tüpte sıcaklık gradyanı ihmal edilebilme kabulü geçerlidir. Yani sabit sıcaklık varsayımı doğrudur.

Boru gövdesini, yaklaşık olarak $L = L_c$ olan düz bir levha olarak çizilen şekil 16, konuya açıklık getirebilir.



Şekil 16. Düz levhada sıcaklık dağılımı

Şimdi, $t = 15 \cdot 10^{-3} s$ sonra borunun dış yüzey sıcaklığını bulalım.

$$T - T_{gazCO_2} = (T_{sıvıCO_2} - T_{gazCO_2}) \cdot e^{(-B_i \cdot F_o)} \quad (\text{Eşitlik 72})$$

$$(T - 827)^\circ C = (20 - 827)^\circ C \cdot e^{\underbrace{(-6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-4})}_{0,999}}$$

$$T = 827 - 806,99$$

$$\| \underline{T(15 \cdot 10^{-3} s) \cong 20^\circ C}$$

Deşarj süresi boyunca ($15 \cdot 10^{-3} s$) boru dış yüzeyinde sıcaklık artışı meydana gelmemektedir.

Şimdi, Osman GENCELİ [L.7] hocamdan yararlanarak bir problemi önce genele, sonrada özele yani CARDOX F57 tüpüne uygulayalım.

“Başlangıçtaki sıcaklığı $T_0 [^{\circ}C]$, hacmi $V [m^3]$, dış yüzey alanı $A [m^2]$, yoğunluğu $\rho [kg/m^3]$, özgül ısı $c [J/(kg \cdot K)]$ ve ısı iletim katsayısı $k [W/m.K]$ olan bir cisim göz önüne alınmaktadır. Bu cisim aniden sıcaklığı $T_{\infty} [^{\circ}C]$, cisim ile yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı $h [w/m^2 \cdot K]$ olan bir ortam içine sokulurken, aynı anda bu cisim içinde de $q [W]$ şeklinde toplam bir ısı üretimi olmaktadır. Isı iletim katsayısının çok büyük kabulü ($k \rightarrow \infty$) için, bu cisim içindeki sıcaklık değişimini zamana bağlı olarak veren ifadeyi bulunuz.”

Çelik CARDOX F57 tüp cidar kalınlığında sıcaklık gradyanı olmadığından her noktada, herhangi bir t anında her noktadaki sıcaklık T kabul edilebilir. Tüp içinde ısıtıcı ile üretilen toplam q ısı, tüpün dış yüzeyinden taşınım ile geçen ısı ile çelik tüpün iç enerjisindeki artma kadar olacaktır. Bu durumda

$$q = h \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) + c \cdot \rho \cdot V \frac{dT}{dt} \quad (73)$$

yazılabilir. Burada,

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{h \cdot A} \quad (\text{Eşitlik 69})$$

ve,

$$\theta = T - T_{\infty}$$

tanımları yapılırsa,

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt}$$

ile eşitlik 73,

$$\frac{q}{c \cdot \rho \cdot V} = \frac{hA}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot \theta + \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot \theta - \frac{q}{\rho \cdot c \cdot V} = 0 \quad (74)$$

şekline gelir. Burada da

$$\psi = \frac{1}{\tau} \cdot \theta - \frac{q}{\rho \cdot c \cdot V} \quad (75)$$

olarak göz önüne alınırsa,

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

Eşitlik 74 teki $\frac{d\theta}{dt}$, yukarıda yerine konursa,

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{q}{\rho \cdot c \cdot V} - \frac{1}{\tau} \cdot \theta \right)$$

Eşitlik 75 teki ψ , yukarıda yerine konulursa,

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot (-\psi)$$

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot \psi = 0 \quad (76)$$

elde edilebilir. Bu denklemin çözümü,

$$\frac{d\psi}{\psi} = -\frac{1}{\tau} dt$$

M bir sabit olmak üzere,

$$\ln \psi - \ln M = -\frac{t}{\tau}$$

$$\ln \frac{\psi}{M} = -\frac{t}{\tau}$$

$$\psi = M \cdot e^{-t/\tau} \quad (77)$$

şeklindedir. Bu değeri eşitlik 75 te yerine koyalım,

$$M \cdot e^{-t/\tau} = \frac{1}{\tau} \cdot \theta - \frac{q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot A} \quad (\text{Eşitlik 69})$$

ile,

$$M \cdot e^{-t/\tau} = \frac{h \cdot A}{\rho \cdot c \cdot V} \cdot \theta - \frac{q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

$$\theta = \frac{q}{h \cdot A} + \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot A} \cdot M \cdot e^{-t/\tau}$$

$$M' = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot A} \cdot M \quad \text{başka bir sabit olmak üzere,}$$

$$\theta = \frac{q}{h \cdot A} + M' \cdot e^{-t/\tau}$$

elde edilebilir. Başlangıç şartı olarak, $t = 0$ için $T = T_0$ olduğundan, $\theta = T_0 - T_\infty = \theta_0$ alınırsa,

$$\theta_0 = \frac{q}{h \cdot A} + M'$$

$$M' = \theta_0 - \frac{q}{h \cdot A}$$

ve,

$$\theta = \frac{q}{h \cdot A} + \left(\theta_0 - \frac{q}{h \cdot A} \right) \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\theta = \frac{q}{h \cdot A} \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + \theta_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\left\| \underline{T - T_\infty = \frac{q}{h \cdot A} \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + (T_0 - T_\infty) \cdot e^{-t/\tau}} \right. \quad (78)$$

sonucuna ulaşılabilir.

Şimdi bu genel ifadeyi CARDOX F57 çelik tüpüne uygulamaya çalışalım.

- Tüpün içinde aniden üretilen ısı,

$$q_{top} = Q_{ısı,F57,2360bar} = 541kJ \quad (Tablo 5)$$

Ancak üretilen q_{top} ısısının tümü, tüpün iç yüzeyine dolasıyla dış yüzeyinden, taşınım yoluyla tüpün içinde bulunduğu kayaç ortamına geçmemektedir. Taşınımın tüpün iç yüzeyine geçen ısı,

$$q = -h \cdot A_s (T_{sıvıCO2} - T_{gazCO2}) \quad (Eşitlik 67)$$

$$q = -15 \cdot 9,7 \cdot 10^{-2} (20^\circ C - 827^\circ C)$$

$$\parallel \underline{q = 1174W}$$

olarak bulunur.

$$q_{top} = 541kJ = 541 \cdot 10^3 J = \frac{541 \cdot 10^3 J}{15 \cdot 10^{-3} s} = 36 \cdot 10^6 W$$

$q_{top} (= 36 \cdot 10^6 W)$ yanında $q (= 1174W)$ ihmal edilebilir yani tüpte enerji kaybı yoktur varsayımı gerçekçidir.

- Zaman sabiti,

$$\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot A} \quad (Eşitlik 69)$$

$$\tau = \frac{631 J / (kg \cdot K) \cdot 7858 kg / m^3 \cdot 1,625 \cdot 10^{-3} m^3}{15 W / (m^2 K) \cdot 9,7 \cdot 10^{-2} m^2}$$

$$\parallel \underline{\tau = 5538 s}$$

$$T - T_\infty = \frac{q}{h \cdot A} \cdot [1 - e^{-t/\tau}] + (T_0 - T_\infty) \cdot e^{-t/\tau} \quad (Eşitlik 78)$$

q ısısı üretildiği an, başlangıçtaki sıcaklığı $T_0 = 20^\circ C$ olan tüp, aynı anda sıcaklığı $T_0 = 20^\circ C$ olan kayaç ortamı içindedir.

$$T - 293K = \frac{1174W}{15W/(m^2K) \cdot 9,7 \cdot 10^{-2}m^2} \cdot \left[1 - e^{-15 \cdot 10^{-3}/5538} \right]$$

$$T - 293K = 2,18 \cdot 10^{-3} K$$

$$\parallel \underline{T = 293K = 20^\circ C}$$

$t = 15 \cdot 10^{-3} s$ sonra, tütün iç ve dış yüzey sıcaklıkları ($B_i < 0,1$ olması nedeniyle sıcaklık dağılımı ihmal edilebileceğinden) birbirine eşit ve $20^\circ C$ dir.

NOT:Tütün dış yüzey alanı,

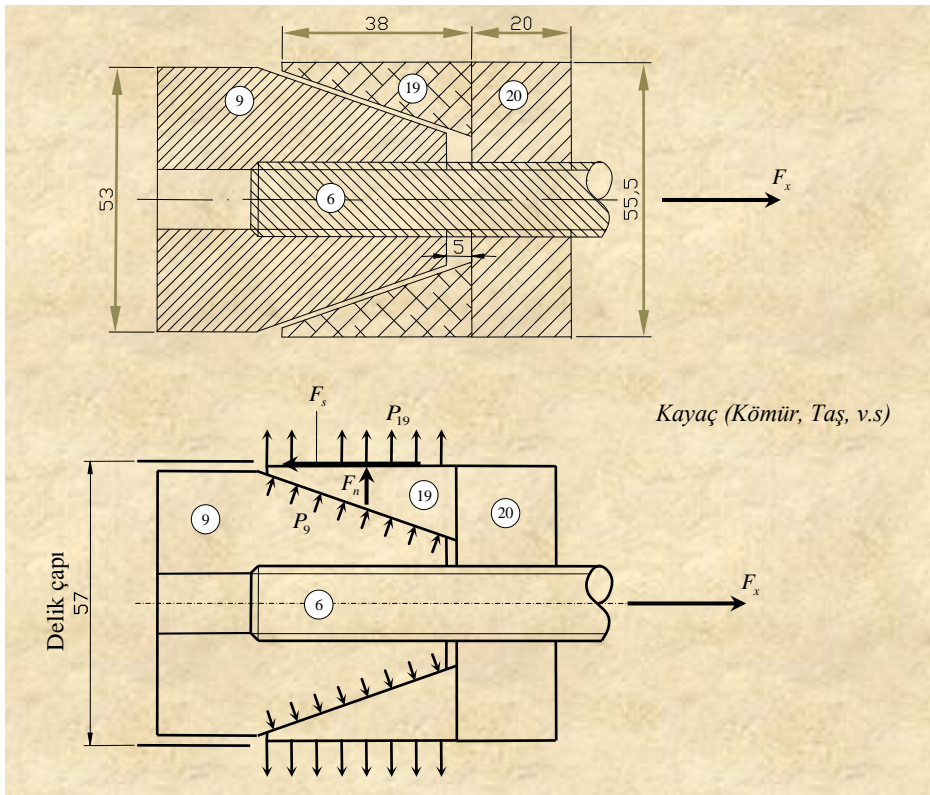
$$A = \pi \cdot d \cdot L_{F57dolum} = \pi \cdot 0,054m \cdot 1,026m$$

$$A = 0,174m^2$$

ile hesap yapılırsada aynı sonuç elde edilir.

Acaba, patlamada oluşan akselal itmeden dolayı kayaç içinden hızla dışarı çıkmaya çalışan tütün yüzeyinde sürtünmeden dolayı bir sıcaklık artışı meydana gelebilir mi? Düşünülebilir.

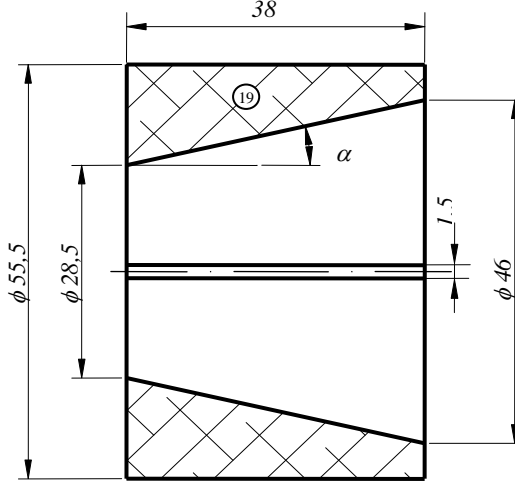
Konik, sıkırtma kovanı ve takozu ile ilgili inceleme;



Şekil 17. Kayaç içindeki sıkırtma takozu ve kovanı üzerine etki eden kuvvetler (MAZ-F777 nolu resimden faydalanılmıştır)

F_x - Akışkan etki kuvveti

- Cardox tüpünün (F57) kütlesi :12,73 kg
- Cardox tüpü, $\phi 57mm$ lik matkap (jakbit) ile kayada delinen deliğe yerleştirildiğinde (9) nolu konik takoz ile (19) nolu sıkırma kovani arasında 5 mm lik bir montaj boşluğu bulunmalıdır. (Montaj teknik resmine bakınız Şekil 22).

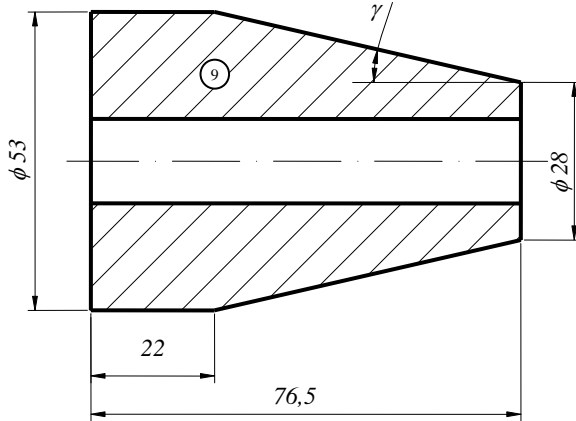


$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(46 - 28,5)}{2 \cdot 38}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,23^\circ$$

$$\parallel \quad \underline{\alpha = 12,967^\circ \cong 13^\circ}$$

Şekil 18. Sıkırma kovani



$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{(53 - 28)}{2 \cdot (76,5 - 22)}$$

$$\operatorname{tg} \gamma = 0,229^\circ$$

$$\parallel \quad \underline{\gamma = 12,918^\circ \cong 13^\circ}$$

Şekil 19. Sıkırma takozu

- Manyeto ile ateşleme yapıp patlama diski çevresi boyunca kopunca oluşan F_x kuvveti nedeniyle (9) nolu parça (19) nolu parça içine oturur ve cardox tüpü kayada içinden çıkmaya dolayısıyla kaymaya başlar.
- (19) nolu parçanın özelliğinde dolayı, (9) nolu parçanın (19) nolu parçaya yapmış olduğu yüzey basıncı (19) nolu parçanın açılmasına ve dolayısıyla kayada basınç yapmasına neden olur.
- (19) nolu parçanın kayada üzerine yaptığı basınçtan dolayı kayma esnasında, (19) nolu parça ile kayada arasındaki sürtünme kuvveti nedeniyle kayma olayı, belirlidir kayma ile sona erer.

$$\begin{aligned}
\text{Tüp} & : F57 \\
P_0 & : 2360 \text{ bar} \\
F_x & : 105566 \text{ N} \\
t & : 15 \cdot 10^{-3} \text{ saniye} \\
m & : 12,73 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Halini gözönüne alalım.

- Cardox tüpünün ağırlığı yanında, (19) nolu sıkırma kovanının ağırlığı ihmal edilmiştir.
- Başlangıçta, (9) nolu parça ile (19) nolu parça arasında 5 mm aksenal gezinme payı olup, F_x oluşunca (9) nolu parça hız kazanır ve (19) nolu parça üzerine çarparak beraber kaymaya başlarlar.
- CO_2 gazının deşarz süresi boyunca F_x kuvveti var olacağına göre, başka bir deyişle , çarpma $15 \cdot 10^{-3}$ saniye süreceğine göre veya sistem $15 \cdot 10^{-3}$ saniyede sükunete geçeceğine göre, kayacın (19) nolu parçaya karşı gösterdiği direnç (tüpün diğel elemanlarına karşı gösterilen direnç gözönüne alınmamıştır) Newton'un ikinci yasına göre hesaplanabilir.

$$F_x = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (79)$$

$$F_x \cdot dt = m \cdot dV$$

$$F_x \int_{t_1}^{t_2} dt = m \int_{V_1}^{V_2} dV$$

$$F_x \cdot \Delta t = m \cdot V_2$$

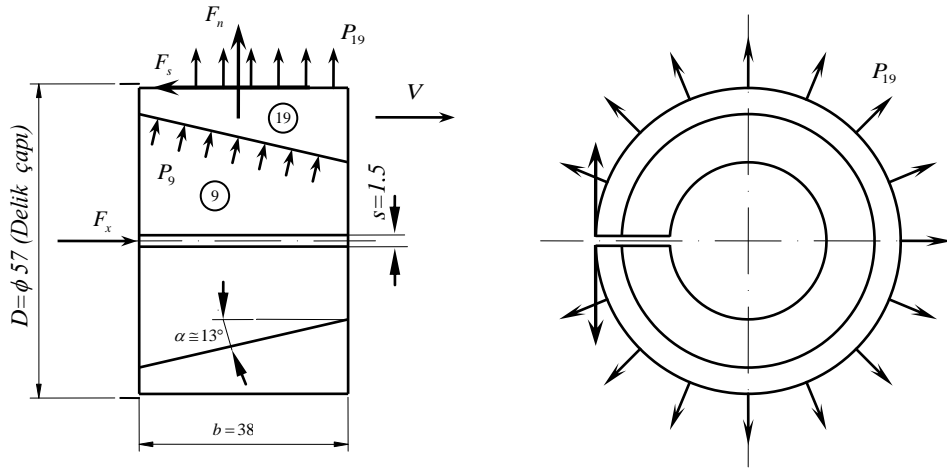
$$105566 \text{ N} \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 12,73 \text{ kg} \cdot V_2 \cdot \left(\frac{m}{s} \right)$$

Cardox tüpünün son hızı,

$$\| \underline{V_2 = 124,4 \text{ m/s}} \|$$

Bulunan V_2 hızı, cardox tüpüne dolayısıyla (19) nolu parçayakarşı kayacın direnç GÖSTERMEMESİ hali içindir.

Halbuki biz; (19) nolu parça ile kayaç arasında öyle bir sürtünme kuvveti oluşsunki veya (19) nolu parça dışa doğru açılarak kayaç üzerine öyle bir baskı kuvveti uygulasin ki $15 \cdot 10^{-3}$ saniyede cardox tüpü kayaç içinde $L = 0,1 \text{ m}$ (kabul) kaysın ve sükunet haline geçsin.



Şekil 20. Takoz ve kovan kuvvetleri

P_9 - (9) nolu konik takozun (19) nolu sıkırma kovanına yapmış olduğu basınç

P_{19} - (19) nolu sıkırma kovanının kayaç üzerine yaptığı basınç

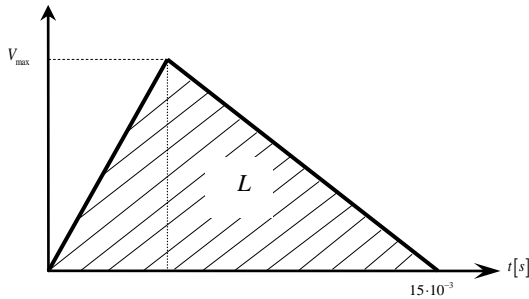
F_s - (19) nolu sıkırma kovani ile kayaç arasındaki sürtünme kuvveti

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (80)$$

F_n - (19) nolu parçanın kayaç üzerine yaptığı normal kuvvet

μ - (19) nolu parça (Polyamid) ile kayaç (kömür, taş, ..., v.s.) arasındaki sürtünme katsayısı. Çelik/Grafit kömürü sürtünme çifti için: $\mu = 0,25$ [L12]

Şimdi (19) nolu parça, hem segman gibi açılmaya ve hemde kayaç içinde kaymaya başlar. P_{19} basıncı dolayısıyla F_n normal kuvveti veya F_s sürtünme kuvvetini oluşumuyla sistem $15 \cdot 10^{-3}$ saniyede $L = 0,1m$ (kabul) yolunu alarak hareketini tamamlar ve sükunete geçer. Olayı, $V - t$ diyagramında gösterelim.



$$L = \frac{1}{2} \cdot V_{\max} \cdot t \rightarrow 0,1m = \frac{1}{2} \cdot V_{\max} (m/s) \cdot 15 \cdot 10^{-3} (s)$$

$$\parallel \underline{V_{\max} = 13,4 m/s}$$

V_{\max} - Cardox tüpünün kayaç içinde maximum kayma hızı ((19) nolu parçanın frenleme özelliği göz önüne alınarak)

Olayı şöyle de ifade edebiliriz;

Tüp kinetik enerjisi bitene kadar kayaç içinde kayar. Kayma mesafesi L olduğuna göre,

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{\max}^2 = (F_x - F_{s_{\min}}) \cdot L$$

(Kayma hızı arttıkça, sürtünme kuvveti azalır)

$$\frac{1}{2} \cdot 12,73 \cdot (13,4)^2 = (105566 - F_{s_{\min}}) \cdot 0,1$$

$$\parallel \underline{F_{s_{\min}} = 94137 N}$$

bulunur.

Yani, (19) nolu parça ile kayaç arasında öyle bir basınç dağılımı oluşmalı ki, sürtünme kuvveti $F_{s_{\min}} = 94137 N$ olsun.

Hesaplarımızı,

$$\parallel \underline{F_{s_{\max}} = F_x = 105566 N}$$

değerine göre yapalım.

(19) nolu sıkırtma kovanının $s = 1,5 mm$ olan aralığı, (9) nolu parçanın yapmış olduğu baskıdan dolayı açılır ve (19) nolu parça $\phi 57 mm$ delik çaplı kayaca P_{19} basıncını uygular.

$$F_s = \mu \cdot F_n$$

$$105566 = 0,25 \cdot F_n$$

$$\parallel \underline{F_n = 422264 N}$$

Sürtünme alanı,

$$A_s = \pi \cdot D \cdot b = \pi \cdot 0,057 \cdot 0,038 \quad (s \text{ aralığı gözönüne alınmamıştır})$$

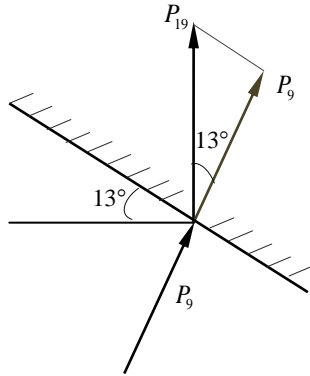
$$\parallel \underline{A_s = 6,8 \cdot 10^{-3} m^2}$$

$$P_{19} = \frac{F_n}{A_s} = \frac{422264 N}{6,8 \cdot 10^{-3} m^2}$$

$$P_{19} \cong 620 \cdot 10^5 N/m^2$$

$$\parallel \underline{P_{19} = 620 bar}$$

P_9 basıncını hesaplayalım,

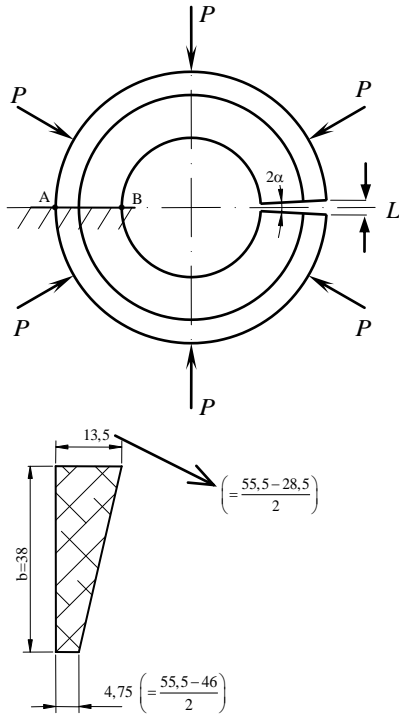


$$P_9 = P_{19} \cdot \cos 13^\circ$$

$$P_9 = 620 \cdot \cos 13^\circ$$

$$\parallel \underline{P_9 = 604 \text{ bar}}$$

Sıktırma kovanı P_9 iç basıncından dolayı açılır ve $\phi 57 \text{ mm}$ delik çaplı kayaca P_{19} basıncını uyguladığını söylemiştik. Dolayısıyla kayacın kovana dıştan $P (= P_{19})$ basıncını tatbik eder.

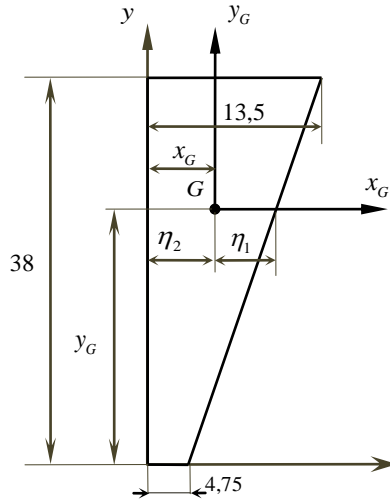


Şekil 21. İç basınçtan dolayı açılmaya çalışan sıktırma kovanı

En büyük gerilme, kesik ucun daire merkezine göre simetriği olan A-B kesitinde olup

$$M_{\max} = 2 \cdot P \cdot b \cdot R^2 \quad (81)$$

dir. Yine, A-B kesitine karşılık gelen alanın atalet (eylemsizlik) momenti ve ağırlık merkezi hesaplanırsa (*Tuncer ÖZKAN- Konik, sıktırma kovanı ve takozu ile ilgili inceleme hesapları*);



$$\| x_G \cong 4,9 \text{ mm}$$

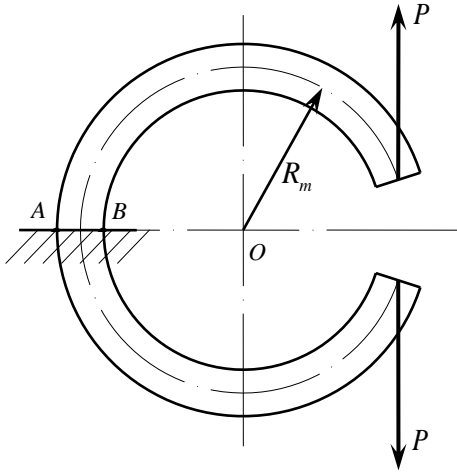
$$\| \underline{y_G \cong 2,2 \text{ mm}}$$

$$\| I_{x_G} \cong 3,85 \text{ cm}^4$$

$$\| \underline{I_{y_G} \cong 0,347 \text{ cm}^4}$$

bulunur.

P gibi bir kuvvetle açılabilirliğini düşünelim ve P değerini hesaplamaya çalışalım.



En büyük eğrilik yarıçapı ρ

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_m} - \frac{M}{I \cdot E} \quad (82)$$

formülü gereğince ρ nun en büyük değeri M_{\max} momentinin oluşturduğu kesite karşılık gelmektedir. Yani A-B kesitinde ρ , enbüyük değere sahiptir.

$$\rho_{\max} = \frac{D}{2} = \frac{57}{2} \quad (D - \text{Delikçapı})$$

$$\| \underline{\rho_{\max} = 285 \text{ mm}},$$

kabulu ile, M_{\max} değerini hesaplayalım.

Tablo 8-Kullanılabilir sıkırma kovani malzemeleri [L11].

	Yoğunluk kg/dm^3	Çekme Mukavemeti $20^\circ C (N/mm^2)$	Eğilme Mukavemeti (N/mm^2)	Basma Mukavemeti (N/mm^2)	Kopma Uzaması %	E-Modülü (N/mm^2)
Polyamid Typ A	1,13	60...80	70...100	100	20...200	1600
Polyamid Typ B	1,13	50...60	35...50	90	20...250	700

$$R_m = 23,6 \text{ mm}$$

$$I_{YG} = 3470 \text{ mm}^4$$

$$E_{ort.} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{1}{28,5 \text{ mm}} = \frac{1}{23,6} - \frac{M_{\max}}{3470 \text{ mm}^4 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2}$$

$$\| \underline{M_{\max} = 25,3 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}}$$

$$M_{\max} = P \cdot 2 \cdot R_m \quad (\text{Sayfa 79})$$

$$25,3 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm} = P \cdot 2 \cdot 23,6 \text{ mm}$$

$$\| \underline{P = 536 \text{ N}}$$

η -kesit üzerinde herhangi bir noktanın, ağırlık noktası ekseninden olan mesafesi (Sayfa 79) olmak üzere, gerçek σ gerilme değeri;

$$\sigma \cong \frac{M}{I} \cdot \frac{\eta}{1 + \frac{\eta}{r}} \quad (83)$$

denkleminde hesaplanabilir.

Burada η ;

- Çubuk ekseninin dışbükey tarafı için (+)
- Çubuk ekseninin içbükey tarafı için (-)

alınır.

$$\left. \begin{array}{l} \eta_2 = 4,9 \\ \eta_1 = 4,85 \end{array} \right\} \left(\begin{array}{l} \text{Hesaplandı (Tuncer ÖZKAN – Konik sıkırma)} \\ \text{kovani ve takozu hesapları} \end{array} \right)$$

$$\sigma_{\max} \cong \frac{M_{\max}}{I_{YG}} \cdot \frac{\eta_2}{1 + \frac{\eta_2}{r}}$$

$$\sigma_{\max} \cong \frac{23,3 \cdot 10^3 N \cdot mm}{3470 mm^4} \cdot \frac{4,9 mm}{1 + \frac{4,9}{23,6}}$$

$$\| \underline{\sigma_{\max} = 29,6 N/mm^2}$$

$$\sigma_{\min} \cong \frac{M_{\max}}{I_{YG}} \cdot \frac{-\eta_1}{1 - \frac{\eta_1}{r}}$$

$$\sigma_{\min} \cong \frac{23,3 \cdot 10^3 N \cdot mm}{3470 mm^4} \cdot \frac{-4,85 mm}{1 - \frac{4,85}{23,6}}$$

$$\| \underline{\sigma_{\min} = -44,5 N/mm^2}$$

Polyamid Tip B için (Tablo 8):

$$\| \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\max} = 29,6 N/mm^2 < \sigma_{\text{çekme}} (= 50 \dots 60 N/mm^2) \\ \sigma_{\min} = -44,5 N/mm^2 < \sigma_{\text{basma}} (= 90 N/mm^2) \end{array} \right.$$

Bu değerler sıkıtırma kovan malzemesinde mücade edilebilecek büyüklüktedir. Yani kovan PARÇALANMAMALIDIR (Gerçekte de parçalanma olmamaktadır).

Acaba, $M_{\max} = 25,3 Nmm$ moment tesirinde P basınç değeri ne olur?

$$M_{\max} = 2 \cdot P \cdot b \cdot R^2 \quad (\text{Eşitlik 81})$$

$$25,3 \cdot 10^3 Nmm = 2 \cdot P \cdot 38mm \cdot \left(\frac{57mm}{2} \right)^2$$

$$\| \underline{P = 0,4 N/mm^2} \quad (= 4 kgf/cm^2)$$

Yani, $\phi 55,5 mm$ çapındaki sıkıtırma kovanını yarığın iki ucundan $P = 536 N$ luk bir kuvvetle açılarak $\phi 57 mm$ çapındaki deliğe oturtulduğunda kovan, çevresine eşit olarak dağılmış n tane radyal $P = 0,4 N/mm^2$ kuvveti ile zorlanmaya çalışır (F_x DÜŞÜNÜLMEDEN).

Not Sıkıtırma kovani, yarığın iki ucundan P gibi bir kuvvetle açılarak $1,5 mm$ olan yarığın $(1,5 + f) mm$ ye çıkması halinde meydana gelen f deformasyonunu hesaplamaya çalışalım.

A-B kesiti ile ikiye ayırdığımızı farzettığımız sıkıtırma kovanının bir yarısına P kuvvetinin kendi doğrultusunda hareketi f_1 ise, bütün f bunun iki katıdır.

Deformasyon işi,

$$\frac{1}{2} \cdot P \cdot f_1 = U = \int_0^{\pi} \frac{M^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot R_m \cdot d\varphi$$

dir.

$$\frac{1}{2} \cdot P \cdot f_1 = \int_0^{\pi} \frac{P^2 \cdot R_m^2 \cdot (1 - \cos\varphi)^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot R_m \cdot d\varphi$$

$$f_1 = \frac{P \cdot R_m^3}{E \cdot I} \int_0^{\pi} (1 - \cos\varphi)^2 \cdot d\varphi$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} (1 - \cos\varphi)^2 \cdot d\varphi &= \int_0^{\pi} d\varphi - 2 \int_0^{\pi} \cos\varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\pi} \cos^2\varphi \cdot d\varphi \\ &= \pi - 2 \cdot \sin\varphi \Big|_0^{\pi} + \int_0^{\pi} \frac{1 + \cos 2\varphi}{2} \cdot d\varphi \\ &= \pi - 0 + \frac{1}{2} \cdot \pi + \frac{1}{2} \cdot \sin 2\varphi \Big|_0^{\pi} \\ &= \pi + \frac{1}{2} \cdot \pi = \frac{3\pi}{2} \end{aligned}$$

$$f_1 = \frac{P \cdot R_m^3 \cdot 3\pi}{E \cdot I \cdot 2} \quad \rightarrow \quad f = 2 \cdot f_1$$

$$\left\| \underline{f = \frac{3\pi \cdot R_m^3 \cdot P}{E \cdot I}} \right.$$

$$f = \frac{3\pi \cdot (23,6 \text{ mm})^3 \cdot 536 \text{ N}}{1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 3470 \text{ mm}^4}$$

$$\left\| \underline{f \cong 19 \text{ mm}} \right.$$

Sıktırma kovanını yarığın iki tarafından $P = 536 N$ luk bir kuvvetle açmaya çalıştığımızda,

- Yarıktaki şekil değişimi

$$f \cong 19 mm$$

- Toplam yarık açıklığı

$$f_{top} = 1,5 mm + 19 mm$$

$$\| \underline{f_{top} = 20,5 mm}$$

olur.

Maden makinalarında yapılan, sıktırma kovani deneyi:

P , Çekme yükü[N]	Aralık[mm]
0	4 ^(*)
200	10
300	14
400	16,5
500	21
600	29,5
700	35
800	45

(*) Test aparatının çenelerinin girmesi için

Deneyde de görüldüğü gibi, $P = 500 N$ çekme kuvvetinde toplam aralık $f_{top} = 21 mm$ olup, bu değer hesaplanan değere ($20,5 mm$) çok yakındır.

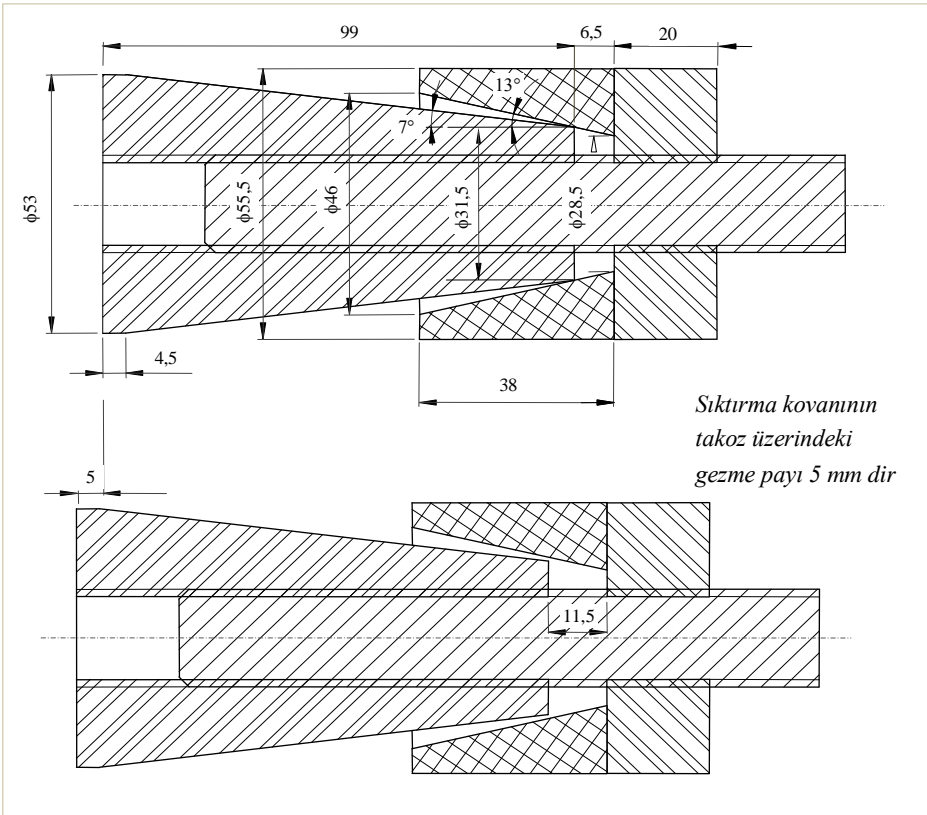
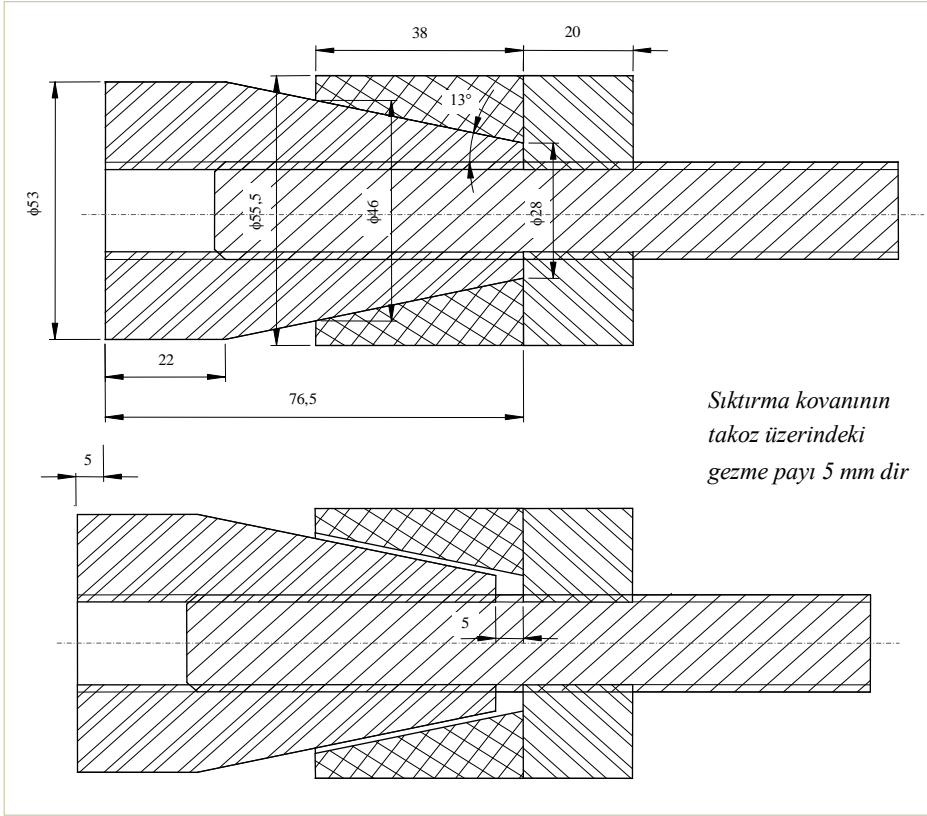
$P = 800 N$ dan sonra, deney aparatının çeneleri kovan aralığından çıktı. Dolayısıyla deformasyonlar ölçülemedi.

Konik sıktırma takozu ve kovanının montajı:

Şekil 17 de görüldüğü gibi, F_x akışkan etki kuvveti veya aksenal itme kuvvetinden dolayı, Cardox tüpü kayaç içinden çıkmaya çalışır. Cardox tüpünün kayaç içinde kabul edilebilir bir kayma ($\cong 0,1 m$) ile sükunete geçmesini ise konik sıktırma takozu veya fren mekanizması sağlar. Bu mekanizmanın montajı, Şekil 22 deki gibi çok dikkatli yapılmalıdır. Aksi takdirde Cardox tüpü bir füze gibi delik dışına fırlar ve çevresine zarar verir. Örnek olarak şekil 23 incelenirse hatalı montajdan dolayı;

- Tüp delik dışına çok yüksek bir hızla fırlamış,
- Patlama diski ise deşarz kafasından dışarı çıkarken sıktırma kovanını yakalamış ve sanki birbirlerine soğuk kaynak olmuşlar gibi bağlanmışlardır.

Bu örnek, hatalı montajın ne kadar zararlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 22. Konik sıkırma takozu ve kovanının montajı (Fren mekanizması)



Şekil 23. Fren mekanizmasındaki hatalı montaja bir örnek. Tüp delik dışına fırlamış ve patlatma diski deşarz kafasından dışarı çıkarken sıkıştırma kovanına kaynak olmuş.

LİTERATÜR

1. Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL-Taner DERBENTLİ, “Termodinamik”.McGraw-Hill. Literatür yayıncılık 1996
2. Prof. Dr. Ahmet Rasim BÜYÜKTÜR,“Termodinamik” Uludağ üniversitesi 1985
3. M.ten BOSCH – Hilmi İLERİ,“Makine Elemanları Hesabı” İTÜ Kütüphanesi Sayı: 721,748
4. Prof. Dr. Nuri A. AKÇIN-Tuncer ÖZKAN, “The Mechanism of the Rock Breakage by Liquid Carbondioxide” Proceedings of The EUROCK 2000 Symposium, 14th National Symposium on Rock Mechanics and Tunnelling, (2000 a), Aachen, Germany, Verlag Gluckauf, pp.643-648
5. J. D. ANDERSON, Modern Compressible Flow, Second Edition, Mc Graw-Hill, International Edition, (1990)
6. Prof. Dr. Tuncer TOPRAK, ‘Dairesel Plak Analizi, Modelleme’ ile ilgili kişisel görüşme.
7. Prof. Dr. Osman F. GENÇELİ, ‘Çözümlü Isı iletimi Problemleri’,Birsen Yayınevi-İSTANBUL.2011
8. Frank P.INCROPERA-Prof. Dr. Taner DERBENTLİ, ‘Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri’,Literatür Yayıncılık-İSTANBUL.2001
9. Prof. Dr. Muhsin KILIÇ-Prof. Dr. Abdulvahap YİĞİT, ‘Isı Transferi’, Alfa Aktüel Yayınları-BURSA.2008
10. Prof. Dr. Yunus ÇENGEL, ‘Isı ve Kütle Transferi’, Güven Kitabevi-İZMİR.2011
11. G. NİEMANN – H.WİNTER, “Maschinenelemente” Springer – Verlag Tokyo 1983
12. G. NİEMANN – Gazanfer HARZADIN – Süleyman YURDAKONAR, “Makina Elemanları”, Fon Matbaası-Ankara.1973

- “CO2 GAZ PATLAMALI KAZI SİSTEMİ (CARDOX) MEKANİĞİNİN TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMESİ” konulu çalışmamızın sonuçları ile , tarafımızdan hazırlanan CARDOX-DEŞARJ DENEY KAFALARI (Şekil 13 ve Şekil 14 üzerinde; Prof. Dr Nuri Ali AKÇIN, Yrd. Doç. Dr. Mustafa EĞRİBOYUN ve Tuncer ÖZKAN tarafından yapılan “SIVI KARBONDİOKSİT İLE PATLAMA SİSTEMİNDE GAZ ÇIKIŞ HIZININ DENEYSEL OLARAK SAPTANMASI” konulu Tubitak projesi (MİSAG-224; 2002-2007) sonuçları, ilerideki çalışmalara ışık tutması bakımından mutlaka irdelenmelidir.
- Termodinamik çözümleme çalışmamızda, haklı olma yerine, yanlışlıktan kurtulmayı ve gerçeği öğrenmeyi ana ilke olarak kabul ettiğimiz için, varsayımlarımızı en açık şekilde konuya ilgi duyanların eleştirilerine sunuyoruz. Eleştirileriniz için şimdiden teşekkürler.
(Tuncer ÖZKAN. 0-542-5254287)