

AKIŞKAN OLARAK HAVA, HAVA — SUBUHARI
KULLANILAN ÖZEL DIZAYNLI LÜLEDE SÜPERSONİK AKIŞ
VE ŞOK OLAYININ İNCELENMESİ

COŞKUN KILIÇ

Anadolu Ünivertesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Termodinamik ve Enerji
Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Yusuf Sezen

Haziran — 1990

Coşkun Kılıç'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Akışkan olarak hava,hava-subuharı kullanılan özel dizaynli lülede süpersonik akış ve şok olayının incelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

..11..7..1990

Üye :

Doç. Dr. Tahir Karasu

Üye :

Yrd. Doç. Dr. Yusuf SEZEN (Danışman)

Üye :

Yrd. Doç. Dr. İlker Gürkan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31.7.1990.
gün ve ..249/2..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Rüstem KAYA

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR	3
3. KANAL VE LÜLELERDE BİR BOYUTLU AKIŞLAR HAKKINDA GENEL BİLGİ	5
3.1. Ses Hızı ve Mach Sayısı	6
3.2. Hugoniot Teoremi	8
3.3. Şok Dalgaları	10
3.4. Lüle Geometrisinin Tayini	14
3.5. Lüle Çıkış Basıncına Ortam Basıncının Tesiri ...	15
3.6. Yakınsak Lülelerde Akım Karakteristiği	16
3.7. Yakınsak-Iraksak Lülelerde Akım Karakteristiği.	19
3.8. Yakınsak-Iraksak Bir Lülede Normal Şokun Yeri ..	24

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4. DAİRESEL PROFİLLİ VE DAİRESEL KESİTLİ LÜLE TEORİSİ ..	27
4.1. Çember Denklemlerinin Belirlenmesi	27
4.2. Lüle Şekillendirilmesinde Gerekli Özel Alan İfadelerinin Belirlenmesi	30
4.3. Kullanılacak Akışkanlara Ait k Sayısının Bulunması	31
4.4. Şok Dalgasının Yerini Bulmada Kullanılacak Yöntem	32
5. SONUÇ	78
EK AÇIKLAMALAR - A	80
KAYNAKLAR DİZİNİ	89

EKLER

1. Akışkanlara ait özgül ısılar
2. Hugoniot denkleminin elde edilmesi
3. Prandtl denkleminin elde edilmesi
4. Denklem 3.13'ün elde edilmesi
5. Denklem 3.14'ün elde edilmesi
6. Denklem 3.17'nin elde edilmesi

ÖZET

Bir boyutlu akışlar sıkıştırılabilir akışkanlarda ortaya çıkan çeşitli fiziksel olayları basit bir şekilde izah etmek için kullanılırlar.

Bu çalışmamızda bir boyutlu akışlar için kullanılan genel prensiplerden yararlanılmış , süpersonik akışlar ve şok olaylarını tanıttıcı bilgiler verilmiştir. Daha sonra dairesel kesitli ve dairesel profilli lüle dizaynı geliştirilmiş, süpersonik akış hali araştırılmış ve bu akış halinde meydana gelebilecek şok dalgasının yeri tespit edilmiştir.

Hava için yapılan bu uygulamalar çeşitli yüzdelerde nem oranına sahip hava-subuharı karışımı için tekrarlanmıştır. Böylece nemli havanın şokun oluşum yerine etkisi araştırılmıştır.

SUMMARY

One-dimensional flows in compressible fluid flow theory have generally been used to explain the basic physical characteristics of the flow phenomena occurring in compressible flows.

In this study, it has been taken advantage from the general principles for the one-dimensional compressible flows, and some introductory information about supersonic flows and shock phenomena has been given briefly.

Then a circular nozzle profile with a circular cross-section has been considered for appropriate nozzle design, and in the case of supersonic flow through the nozzle we investigated the position of the shock wave (if any occurs ever) inside the nozzle.

Various calculations have been made for both the air and the moist-air which contains different percentage of the moisture content. Thus the effect of moist-air to the position, where the shock wave happens to occur, has been investigated.

TESEKKÜR

Tez çalışmam da beni yönlendiren, çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd.Doç.Dr.Yusuf SEZEN'e teşekkürleri iletmeyi bir borç bilirim.

Çalışmamın tüm ilgilenenlere yararlı olması dileği ile.

Coskun KILIÇ

Haziran 1990

SEKİLLER DİZİNİ

Sekil	Sayfa
3.1. Bir boyutlu akımlar	4
3.2. Akım bölgeleri	7
3.3. Hugoniot denklemi	8
3.4. Yakınsak-ıraksak lüle	9
3.5. Lüle boyunca basınç değişimi	10
3.6. Şok dalgasının oluşum fotoğrafı	11
3.7. Entropinin M_1 ile değişimi	13
3.8. P_e çıkış basıncının P_o ortam basıncına tesiri	15
3.9. Yakınsak lülelerde akım karakteristiği	17
3.10. Yakınsak-ıraksak lülelerde akım karakteristiği ..	19
3.11. Normal şok dalgası	23
4.1. Dairesel kesitli ve dairesel profillilüle teorisi	28
4.2. $Oran_2=.9$ için şok yerinin şematik gösterimi	60
4.3. $Oran_2=.7$ için şok yerinin şematik gösterimi	60
4.4. $Oran_2=.5$ için şok yerinin şematik gösterimi	61
4.5. $Oran_2=.3$ için şok yerinin şematik gösterimi	61
4.6. $Oran_2=.3$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	62
4.7. $Oran_2=.3$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi.....	62
4.8. $Oran_2=.4$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	63
4.9. $Oran_2=.4$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	63
4.10. $Oran_2=.5$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	64
4.11. $Oran_2=.5$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	64
4.12. $Oran_2=.6$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	65
4.13. $Oran_2=.6$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	65
4.14. $Oran_2=.7$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	66
4.15. $Oran_2=.7$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	66
4.18. $Oran_2=.85$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	67
4.19. $Oran_2=.85$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	67
4.20. $Oran_2=.9$ için yarıçapa bağlı M_1 değişimi	68
4.21. $Oran_2=.9$ için yarıçapa bağlı xsg değişimi	68
4.20. $k=1.4$ için $Oran_2$ değişiminin şok yerine etkisi ...	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Sekil	Sayfa
4.21 $k=1.35$ için Oran2 değişiminin şok yerine etkisi	70
4.22 $k=1.327$ için Oran2 değişiminin şok yerine etkisi ...	71
4.23 $k=1.4$ için lüle boyuna bağlı olarak çalışma basıncının değişimi	75
4.24 Pb/Po1 çalışma oranına bağlı olarak As/A* oranının değişimi	76
4.25 Çalışma basıncına bağlı olarak şokun ilerlemesi ..	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
3.1. Yakınsak-Iraksak lülenin çalışma karakteristikleri .	21
4.1. Öteleme mesafeleri	32
4.2. $k=1.4$ ve $Oran2=.1$ için x_s mesafesi	33
4.3. $k=1.35$ ve $Oran2=.1$ için x_s mesafesi	34
4.4. $k=1.327$ ve $Oran2=.1$ için x_s mesafesi	35
4.5. $k=1.4$ ve $Oran2=.2$ için x_s mesafesi	36
4.6. $k=1.35$ ve $Oran2=.2$ için x_s mesafesi	37
4.7. $k=1.327$ ve $Oran2=.2$ için x_s mesafesi	38
4.8. $k=1.4$ ve $Oran2=.3$ için x_s mesafesi	39
4.9. $k=1.35$ ve $Oran2=.3$ için x_s mesafesi	40
4.10. $k=1.327$ ve $Oran2=.3$ için x_s mesafesi	41
4.11. $k=1.4$ ve $Oran2=.4$ için x_s mesafesi	42
4.12. $k=1.35$ ve $Oran2=.4$ için x_s mesafesi	43
4.13. $k=1.327$ ve $Oran2=.4$ için x_s mesafesi	44
4.14. $k=1.4$ ve $Oran2=.5$ için x_s mesafesi	45
4.15. $k=1.35$ ve $Oran2=.5$ için x_s mesafesi	46
4.16. $k=1.327$ ve $Oran2=.5$ için x_s mesafesi	47
4.17. $k=1.4$ ve $Oran2=.6$ için x_s mesafesi	48
4.18. $k=1.35$ ve $Oran2=.6$ için x_s mesafesi	49
4.19. $k=1.327$ ve $Oran2=.6$ için x_s mesafesi	50
4.20. $k=1.4$ ve $Oran2=.7$ için x_s mesafesi	51
4.21. $k=1.35$ ve $Oran2=.7$ için x_s mesafesi	52
4.22. $k=1.327$ ve $Oran2=.7$ için x_s mesafesi	53
4.23. $k=1.4$ ve $Oran2=.85$ için x_s mesafesi	54
4.24. $k=1.35$ ve $Oran2=.85$ için x_s mesafesi	55
4.25. $k=1.327$ ve $Oran2=.85$ için x_s mesafesi	56
4.26. $k=1.4$ ve $Oran2=.9$ için x_s mesafesi	57
4.27. $k=1.35$ ve $Oran2=.9$ için x_s mesafesi	58
4.28. $k=1.327$ ve $Oran2=.9$ için x_s mesafesi	59
4.29. $k=1.4$ için kritik basınç oranları	72
4.30. $k=1.35$ için kritik basınç oranları	73
4.31. $k=1.327$ için kritik basınç oranları	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Ses hızı
U	Akım hızı
M	Mach sayısı
k	Akışkan katsayısı
R	Gaz sabiti
T	Sıcaklık
ao	Durma entalpisine karşılık gelen ses hızı
To	Durma noktasındaki sıcaklık
Po	Durma noktasındaki basınç
A	Kesit alanı
M1	Şoktan önceki Mach sayısı
M2	Şoktan sonraki Mach sayısı
Po1	Şoktan önceki durma basıncı
Po2	Şoktan sonraki durma basıncı
P1	Şoktan önceki normal basınç
P2	Şoktan sonraki normal basınç
S	Entropi
U1	Şoktan önceki akım hızı
U2	Şoktan sonraki akım hızı
At	Boyun kesiti
Ae	Çıkış kesiti
Me	Çıkış Mach sayısı
A*	Kritik kesit
m	Debi
Pe	Çıkış basıncı
Pb	Ortam basıncı
mmax	Max. debi
mc	Boğulma debisi
Mt	Boğaz kısmındaki Mach sayısı
mc*	Kritik koşullardaki boğulma debisi

As	Sokun dalgasının oluştuğu kesit
xs	Sok dalgasının oluştuğu x mesafesi
ys	Sok dalgasının oluştuğu y mesafesi
xsg	Ötelenmiş sok mesafesi
l	Lüle boyu
M1	1. çemberin merkezi
M2	2. çemberin merkezi
R1	1. çemberin yarıçapı
R2	2. çemberin yarıçapı
Ao	iki çemberin teğet olduğu lüle kesiti
xo	iki çemberin teğet olduğu x mesafesi
yo	iki çemberin teğet olduğu y mesafesi
Cph	Havanın sabit basınçtaki özgül ısısı
Cpw	Suyun sabit basınçtaki özgül ısısı
Cvh	Havanın sabit hacimdeki özgül ısısı
Cvw	Suyun sabit hacimdeki özgül ısısı
Δ	Öteleme miktarı
Oran1	A_e/A_t kesit oranı
Oran2	P_b/P_{o1} çalışma basınç oranı
Oran3	P_e/P_{o2} basınç oranı
Oran4	P_{o2}/P_{o1} durma basınçları oranı
Oran5	A_s/A_t kesit oranı
Oran6	P_2/P_1 basınç oranı

1. GİRİŞ

Bir gaz ortamla bir katı cisim arasındaki izafi hareketle oluşan nonlinear dalgalara "Şok dalgaları" denir. Sonuçta bir gürültü ve sarsıntı ile ani hız değişimi oluşur. Bu dalgalara, uygulamada iki örnek verebiliriz. Birincisi bir uçağın süpersonik uçuşunda meydana gelen ses dalgaları olup, bunlar birbirlerinin şiddetini arttıracak şekilde bir diğerine ulaşır ve eğer uçak yakınsa dalga geçerken hayli kuvvetli bir ses işitilir. Gerçekte bu şok dalgası okadar kuvvetli olmayıp zayıf bir şok dalgasıdır. Şok dalgalarına ikinci örnek olarak detonasyon veya patlamayla oluşan patlama dalgasını verebiliriz. Bu tip bir dalga son derece büyük bir basınç dalgası olarak karakterize edilir. Yıkıcı bir potansiyele sahiptir.

Bu çalışma yapılırken akımın lüle içinde sürtünmesiz aktığı gözönüne alınmıştır. Lüleye gazın bir depodan geldiği kabul edilmiştir. Depoda hız sıfır, basınç durma basıncında, sıcaklık durma sıcaklığında alınmıştır. Depo ise belli bir güçteki kompresörden beslenmektedir. Lüle dizaynı ise akışkan akımında arzu edilen değişimleri karşılayabilecek lüle geometrisinin seçiminden ibarettir. Bu işlemde sonra çeşitli çalışma şartlarına maruz sabit geometrili lülenin her kesitinde akım karakteristikleri tayin edilebileceği gibi, şok dalgalarının oluşum yerleri de araştırılabilir.

Sürtünmesiz bir lüle için arzu edilen kanal geometrisinin tayini yalnız kontrollü bir şekilde kanal dik kesit alanlarının elde edilmesini gerektirir. Lülenin lineer uzunluğu yani lüle boyu elde edilen alana göre istenilen uzunlukta alınabilir. Bir kanal içinde akan gerçek bir akışkan akımı kanal boyu ile kanal duvarlarının eğriliğine bağlıdır. Sürtünmesiz lüle kabul edildiği için burada yapılan çalışmaların sonuçları ortalama alınacaktır.

Bu araştırmamızda dairesel profilli ve dairesel kesitli yakısak-ıraksak lüle kullanılmıştır. Elde edilen bu özel dizaynlı lülede yine istenilen akış şartlarına göre şok dalgasının oluşum yeri araştırılmıştır. Akışkan olarak hava ve hava-subuharı karışımı kullanılarak, havanın içindeki nem miktarının şok dalgasının oluşum yerine etkisi incelenmiş olup, srekliplik, enerji, hareket denklemlerinden hareketle çıkarılan parametrik denklemlerden yararlanılmıştır. Konuyla ilgili olarak birçok referansla tablo değerleri ve bağıntıların burada verilmesi uygun görülmüştür.

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Biz bu çalışmamızda dairesel kesitli ve dairesel profilli lülelerde sesüstü akış halinde meydana gelecek şok olaylarını inceleyeceğiz. Fakat incelememize başlamadan daha önce bu konuda yapılan çalışmaların birkaçını gözden geçirmemizdeki amaç, konu ile ilgili olarak bugüne kadar yapılan çalışmalar hakkında genel bilgi sahibi olmaktır.

1) Konu: Yoğuşma ile lüledeki sesüstü akış halinde meydana gelen toplam basınç azalması. (Sayısal analiz)

Buhar veya nemli havanın sesüstü lüle'deki hızla genişlemesi sonucu yoğuşma meydana gelir. Akışın toplam basıncı oluşan dengesizlikle azalır. Bu çalışmada dairesel kesitli lülede nemli havanın genişlemesi ile toplam basınçta oluşan azalma sayısal olarak hesaplanmıştır.

Tersinmez dengesiz yoğuşma durumlarının sonucu olarak entropideki artış miktarından, toplam basınçtaki oluşacak azalma miktarı hesaplanır. Toplam basınçta nümerik olarak hesaplanan azalma miktarı deneysel sonuçlarla bulunanlardan daha küçüktür ve yaklaşık olarak yüzde iki ile beş değerindedir. Sonuç olarak, bu nümerik çalışmada lüle şeklinin ve nem miktarının toplam basıncın azalmasındaki etkisi bellidir ve hesaplanabilir.

Kwon, Soon Bum; Matsuo, Kazuyasu; Kawagoe, Shigetoshi; Matuso, Shigeru. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen v 53 n 489 May 1987 p 1516-1520.

2) Konu: Yoğuşma ile lüledeki sesüstü akış halinde meydana gelen toplam basınç azalması. (1. Rapor, Deneysel sonuçlar)

Buhar veya nemli havanın sesüstü lülede hızla

genişlemesi sonucu yoğuşmanın toplam basınçta meydana getirdiği azalma deneysel olarak saptanmıştır. Buna bağlı olarak havanın içindeki nem miktarının ve lüle şeklinin toplam basınçtaki bu azalmaya etkisi incelenmiştir.

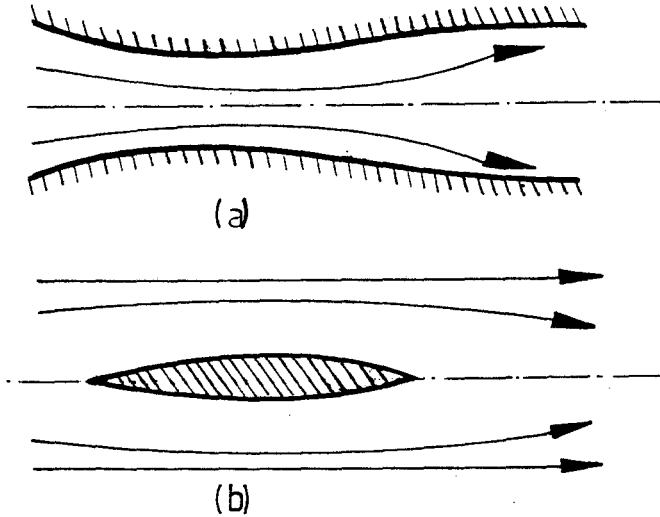
Düzenli yoğuşma ile toplam basıncın azaldığı bölgenin uzunluğu dengesiz yoğuşma haline göre daha büyüktür ve bu iki uzunluk arasındaki nemli havanın doyma haline yaklaştıkça artar.

Kwon, Soon Bum; Matsuo, Kazuyasu; Kawagoe, Shigetoshi, Toshiaki; Takiya, Toshio. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen v 52 n 480 Aug 1986 p 2860-2864.

3. KANAL VE LÜLELERDE BİR BOYUTLU AKIŞLAR HAKKINDA GENEL BİLGİ

Hareket halindeki bir akışkan kütlesi düşünüldüğünde eğer akışkan özellikleri belli bir doğrultuda diğerine nazaran çok büyük ölçülerde değişmelere uğruyorlarsa bu hareket "bir boyutlu akım" olarak adlandırılır. Yani bir tek parametreye bağlı olarak tamamen belirlenebilen akışkan hareketleri bir boyutlu akımlardır. Sıkıştırılabilir akışkan akımlarında ortaya çıkan çeşitli fiziksel olayları basit bir şekilde izah etmek, bunlara ait yaklaşık çözümleri bulmak ve daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacı ile bir boyutlu akım prensibine başvurulur.

Burada yapılan çalışmalarda kolaylığı sağlamak amacı ile gazın termodinamik ve kinematik olarak mükemmel olduğu ve sıkışmanın adiabatik olduğu kabul edilecektir. Şekil 3.1'de kanal ve lülelerde bir boyutlu akımlar gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bir boyutlu akımlar: a) Bir lülenin iki cidarı arasında lüle boyunca uzanan akım b) Bir profilin cidarı ile herhangi bir akım çizgisi arasındaki akım.

3.1. Ses Hızı Ve Mach Sayısı

Ses hızı akışkan içinde yaratılan sonsuz küçük bir tedirginliğin (disturbance) her doğrultudaki uniform yayılma hızı olarak kullanılır. Denklem 3.1'de görüldüğü gibi akışkanın termodinamik haline bağlıdır. Ses dalgalarının yayılması ile ilgisi yoktur. Bu yüzden akım alanında noktadan noktaya değişir.

$$a = \sqrt{kRT} \dots\dots\dots(3.1)$$

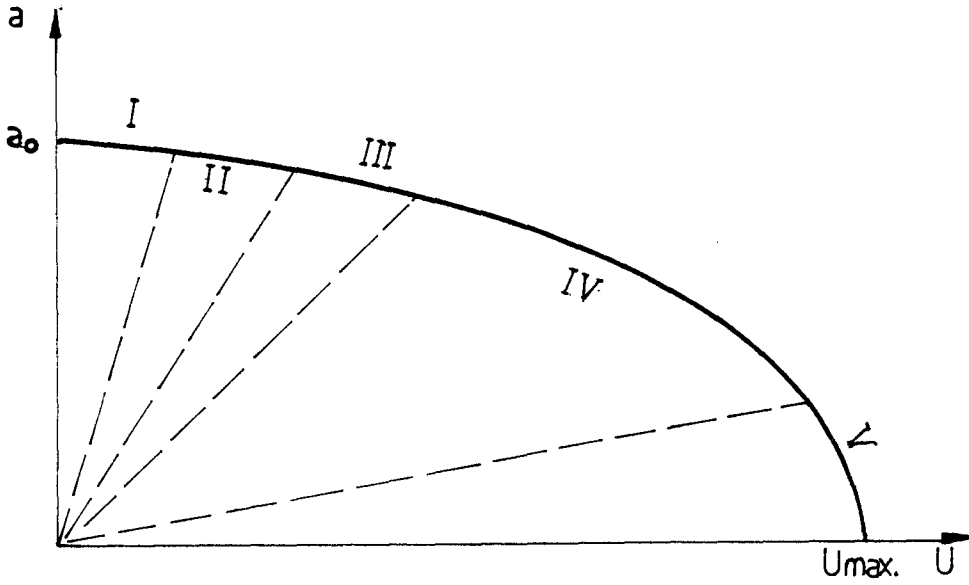
Sıkıştırılabilir akışkanlarda U akım hızı ile a ses hızının karşılaştırılması önemlidir. Bu karşılaştırma akım bölgelerinin tayininde önemli rol oynar. Böylece ortaya çıkan boyutsuz sayıya "Mach" sayısı denir ve akım hızının ses hızına oranıdır. Mach sayısına göre akım Denklem 3.2'deki gibi ifade edilebilir.

$$M = U/a \dots\dots\dots(3.2)$$

Ses hızının çok büyük olması Mach sayısının sıfıra gitmesi demektir. Bu tip akışkanlara "Sıkıştırılmaz akışkan" denir. Havaya yaklaşık 50 m/sn'lik hızlara kadar sıkıştırılmaz bir akışkan gözüyle bakılabilir. Aksine basınç değişimleri yoğunluk değişimleri ile mukayese edilebilir nitelikte ise bu tip akışkanlara sıkıştırılabilir akışkanlar denir. Şekil 3.2'deki geometrik gösterimde sıkıştırılabilir akışkanlar ile sıkıştırılmaz akışkanlar görülmektedir.

a) Sıkıştırılmaz akışkanlar: 1 bölgesi

b) Sıkıştırılabilir akışkanlar: 2, 3, 4, 5 bölgelerini kapsar ve b halindeki bölgeyi ayırt etmek için Mach sayısı kullanılır. Mach sayısına göre akım aşağıdaki şekilde ifade edilir.



Sekil 3.2. Akım bölgeleri

$M < 1$ ise subsonik (sesaltı) akış

$M = 1$ ise sonik akış

$M > 1$ ise süpersonik (sesüstü) akış diye adlandırılır.

Sonik akış halinde belirli bir sıcaklıkta U akım hızı a ses hızına eşittir. Bu duruma aynı zamanda kritik hal de denir. Şimdi de Mach sayısına bağlı olarak akım karakteristiklerinin değişimi ele alırsak adiabatik akımlar için enerji ifadesinden hareketle çıkartılan Denklem 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7 isentropik akışlar içindir ve $M=1$ için bu denklemler kritik durum için kullanılır.

$$a/a_0 = \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right]^{-1/2} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$T/T_0 = \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right]^{-1} \dots \dots \dots (3.4)$$

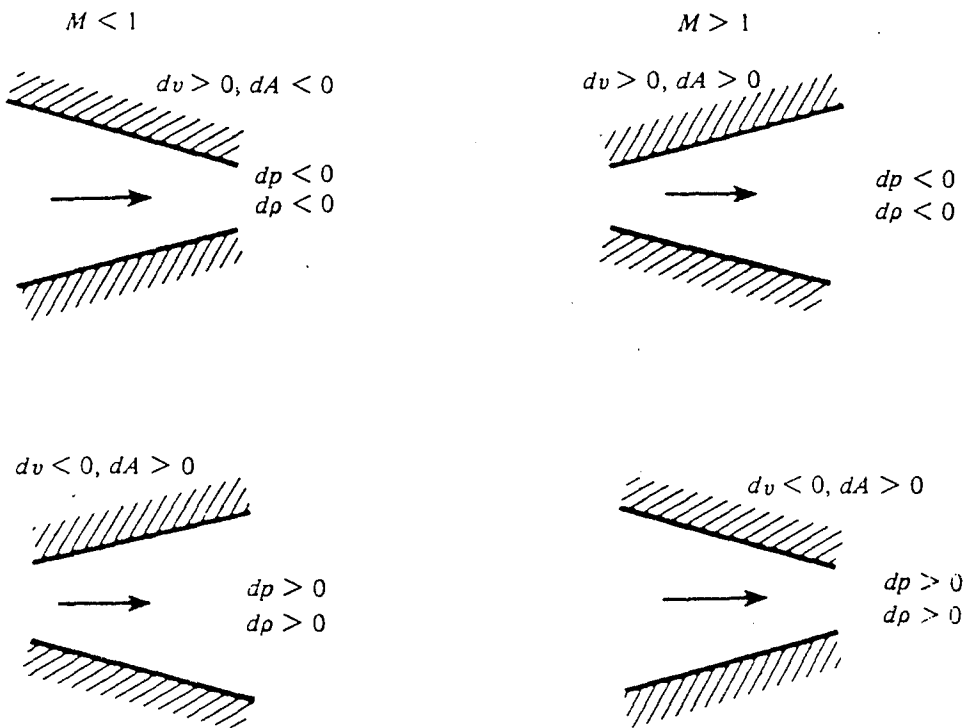
$$\rho/\rho_0 = \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right]^{-1/k-1} \dots \dots \dots (3.5)$$

$$P/P_0 = \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right]^{-k/k-1} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$U/a_0 = M \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (3.7)$$

3.2. Hugoniot Teoremi

Hugoniot teorisi lüle ve difüzörlerde akım çeşidine bağlı olarak hız ve basıncın değişimini göstermektedir ve denklem 3.8 şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 3.3 ise Hugoniot denkleminin şematik olarak açıklamasıdır. Buradaki yakınsak kanallara lüle, ıraksak kanallara ise difüzör denir.



Şekil 3.3. Hugoniot teoremi

$$dA/A = -(1-M^2) \cdot dU/U \dots \dots \dots (Ek2)(3.8)$$

— $M < 1$ ise akımın ivmelenmesi yani hızın artması için kesit alanı azalmaktadır. Böylece kanal kasiti akım istikametinde küçülecektir. Böylece elde edilen geometri lüledir.

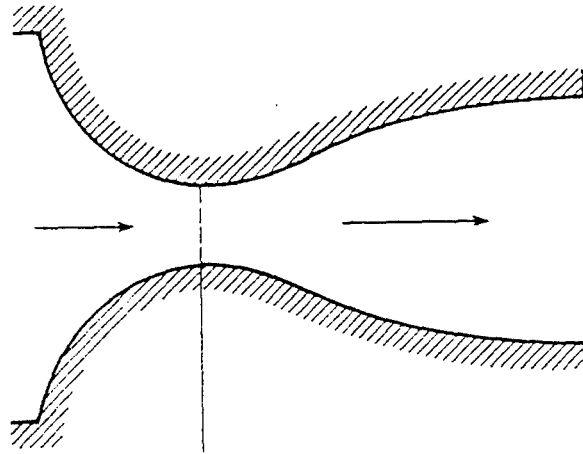
— $M < 1$ ise akımın frenlenmesi yani hızın azalması için

akım istikameti yönünde kanal kesiti büyümelidir. Böylece elde edilen geometri difüzördür.

— $M > 1$ ise akımın ivmelenmesi için kanal kesit alanının artması gerekir.

— $M < 1$ ise akımın frenlenmesi için kanal kesit alanının azalması gerekir.

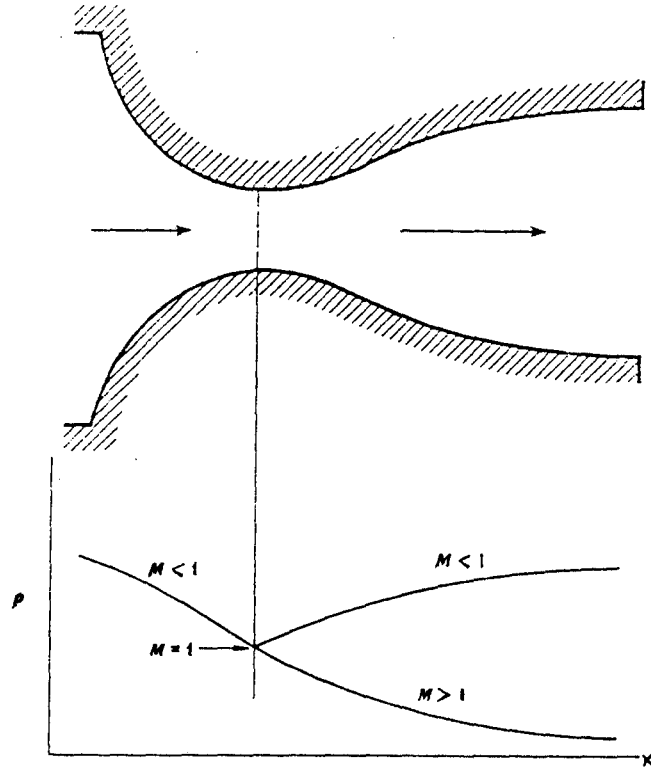
Sonuç olarak normal şok dalgasının oluşabilmesi için hızlanma kesitin sırası ile önce daraltılması ve sonra genişletilmesi mümkündür. Yani durgun bir akışkan kütlelerinin sesüstü hızlara ivmelendirilmesi için Şekil 3.4'de görüldüğü gibi sesaltı bölgede yakınsayan ve sesüstü bölgede iraksayan



Şekil 3.4. Yakınsak-İraksak lüle

bir lüleyi katetmesi gerekmektedir. Açıkça aradaki minimum kesitte ve ancak burada $M=1$ olacaktır. Depoda ki basınç çıkış kesitine konulan pompa aracılığı ile sabit tutulmaktadır.

Boyun noktası olan $M=1$ değerinden sonra iki çözüm vardır. Şekil 3.5'de görüleceği gibi, bunlardan biri sesaltı diğeri sesüstü akıştır.



Şekil 3.5. Lüle boyunca basınç değişimi

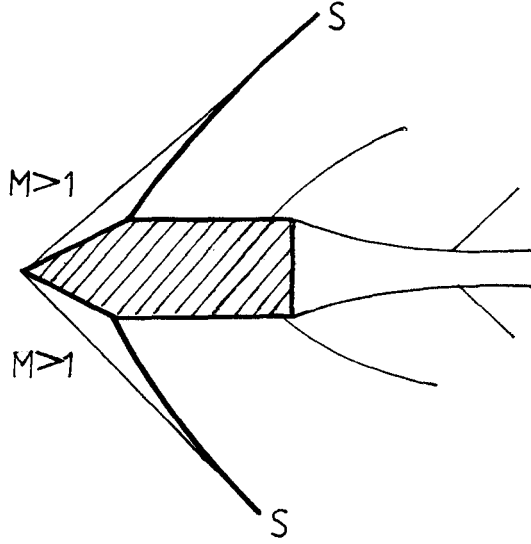
3.3. Şok Dalgaları

Duran bir cisim etrafındaki akım veya hareketsiz bir akışkan içerisindeki hareket eden bir cisim halinde ,katı cisimle akışkanın teması sonucu tedirginlikler (disturbances) meydana gelir. Bu tedirginlikler lineer ve nonlineer olabilir. Lineer tedirginliklerde süreksizliğe rastlanmaz. Nonlineer dalgalar süreksizlik oluşturup bunlara "Şok dalgaları" ismi verilir.

Şekil 3.6 sesüstü hızla hareket eden bir cisim etrafındaki akım gölge fotoğrafına bakılarak çizilmiştir (Howarth,1953).

Şekildeki SS çizgisine ait çok dar bölgede akışkan

yoğunluğu çevreye nazaran okadar yüksektir ki, bu bölgeye gelen ışınlar siyah bir leke olarak görülmektedir. SS üzerindeki basınçlar ani olarak yükselmekte ve dolayısı ile cisimle hareket eden bir ses dalgası oluşmaktadır.



Sekil 3.6. Şok dalgasının oluşum fotoğrafı

Bu olayın izahı için Mach dalgalarından yararlanılır. Hareketin başlangıcında sonsuz küçük genlikli bir basınç dalgası ses hızı ile henüz tedirgin olmamış bulunan ortam içerisinde yayılmaya başlar. Önünde ilerlemekte olan birinci dalganın ortam basıncında ve sıcaklığında meydana getirdiği artma nedeni ile ikinci dalganın yayılma hızı birinci dalganınkinden büyük olacaktır. Devam eden bu olaylar sonucunda dalgaların herbiri birinci dalgaya yetişerek ortam içerisinde ses hızından daha büyük bir hızla ilerleyen dik ve keskin bir süreksizlik oluşur. Süreksizliğin neden olduğu basınç artışı ne kadar fazla ise, yayılma hızı da o kadar büyüktür. Şok dalgasını kateden akışkan özelliklerinde sonlu değişmeler (süreksizlikler) meydana gelmesi yüzünden bu dar bölgede hal değişimleri artık tersinir kabul edilemez. Neticede termodinamiğin ikinci kanunu dolayısı ile her şok dalgası kendisini kateden akışkanın entropisinde belli bir artışa sebep olur.

Bir akış alanı içerisinde akış yönüne dik bir düzlem içerisinde meydana gelen şok dalgalarına "Normal şok dalgası" denir. Böyle dalgalara yakınsak-ıraksak lüenin ıraksak bölümünde veya küt burunlu cisimlerin ön tarafında rastlanabilir. Şok başlamadan evvel ve sonra akışkan özelliklerindeki ani değişme şok sürecinin tersinmez olduğunu göstermektedir. Entropide artmanın başlıca nedeni şok tarafından sıkıştırılmış ve sıcaklığı artmış bulunan gaz kütlelerinin şok düzlemi aracılığı ile iletilen ısı oluşturmaktadır. Dolayısı ile şokun iki tarafındaki durma noktası sıcaklığının aynı kalmasına ($T_{01}=T_{02}$) rağmen durma noktası basıncında az bir değişim olacaktır. Süreklilik, hareket, enerji denklemlerinden hareketle çıkartılan 3.9, 3.10, 3.11 denklemleri normal şok dalgalarının izahında kullanılırlar.

$$M_2 = \left[\frac{1+M_1^2(k-1)/2}{kM_1^2-(k-1)/2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$P_{02}/P_{01} = \left[\frac{M_1^2(k+1)/2}{1+M_1^2(k-1)/2} \right]^{k/k-1} \left[\frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \right]^{-1/k-1} \dots \dots (3.10)$$

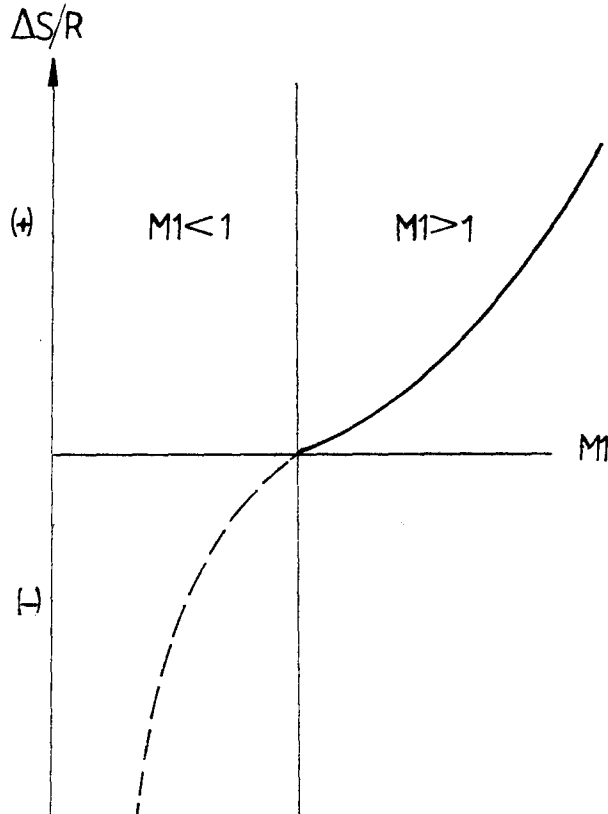
$$P_2/P_1 = \frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \dots \dots \dots (3.11)$$

Normal bir şok dalgasının oluşabilmesi için akımın önce sesüstü olması, şoktan sonra yine sesaltı bir akıma dönüşmesi gerekir. Bu olayı Denklem 3.12'de verilen Prandtl bağıntısı açıklamaktadır. Bu bağıntıya göre normal şokun önündeki ve arkasındaki akışkan hızlarının çarpımı kritik ses hızının karesine eşittir.

$$U_1 \cdot U_2 = k.R.T \dots\dots\dots (Ek3)(3.12)$$

Prandtl bağıntısına göre sayet akımın başlangıçta sesaltı ise şoktan sonra sesüstü, başlangıçta sesüstü ise şoktan sonra sesaltı olacağını gösterir. Fakat bu iki fikrinde doğru olması termodinamiğin ikinci kanunu ile çelişkiye düştüğü için mümkün değildir. Denklem 3.13'den hareketle Şekil 3.7 çizilmiştir. Buradan görülebileceği gibi $M_1 < 1$ durumundaki entropi azalması oluşmaktadır. Bu da bize

$$\Delta S/R = -\ln \frac{\left[\frac{(k+1) M_1^2}{k/(k-1)} \right]^{1/(k-1)}}{\left[1 + M_1^2(k-1)/2 \right]} : \left[M_1^2 \cdot 2k/(k+1) - (k-1)/(k+1) \right] \dots\dots (Ek4)(3.13)$$



Şekil 3.7. Entropinin M_1 ile değişimi

şok dalgasının oluşabilmesi için başlangıçta akımın sesüstü olması gerektiğini anlatır tersinmez bir olaydır. Yani bu dalgaları geçerken akım isentropik değildir. Ancak zayıf şok dalgaları halinde yani $P_2/P_1 \approx 1$ durumunda akış isentropik kabul edilebilir.

3.4. Lüle Geometrisinin Tayini

Verilen akış şartlarına göre lüle geometrisi tayin edilir. Alan olarak kanalın dik kesit alanı kullanılır. P_0 ve T_0 durma şartlarındaki m debisine sahip akışkanı P_e basıncına kadar adiabatik ve sürtünmesiz olarak hızlandırmak için gerekli lüle geometrisinin tayini şu şekilde olur.

$Me < 1$ için lüle basit bir yakınsak lüledir ve sadece A_e çıkış alanını hesaplamak yeterli olacaktır. $Me > 1$ için yakınsak-ıraksak kanal elde edilmeli ve A_e çıkış alanı ile birlikte A_t boyun kesiti alanı bulunmalıdır. ilkönce Me değerine bağlı olarak Denklem 3.14'dan A_e/A^* isentropik alanı hesaplanır. Ve eğer m , P_0 ve T_0 debisi biliniyorsa A_e kesiti Denklem 3.15'den bulunur.

$$A_e/A^* = 1/Me \left[\frac{1 + Me^2(k-1)/2}{(k+1)/2} \right]^{(k+1)/2(k-1)} \dots\dots\dots (Ek5)(3.14)$$

$$m/A_e = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{R}} \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{k-1}} \left[\frac{2/k}{(P/P_0)} - \frac{(k+1)/k}{(P/P_0)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3.15)$$

A_t boyun kesiti alanı ise Denklem 3.16'de A_e/A^* ve A_e değerlerinin yerine konması ile bulunur.

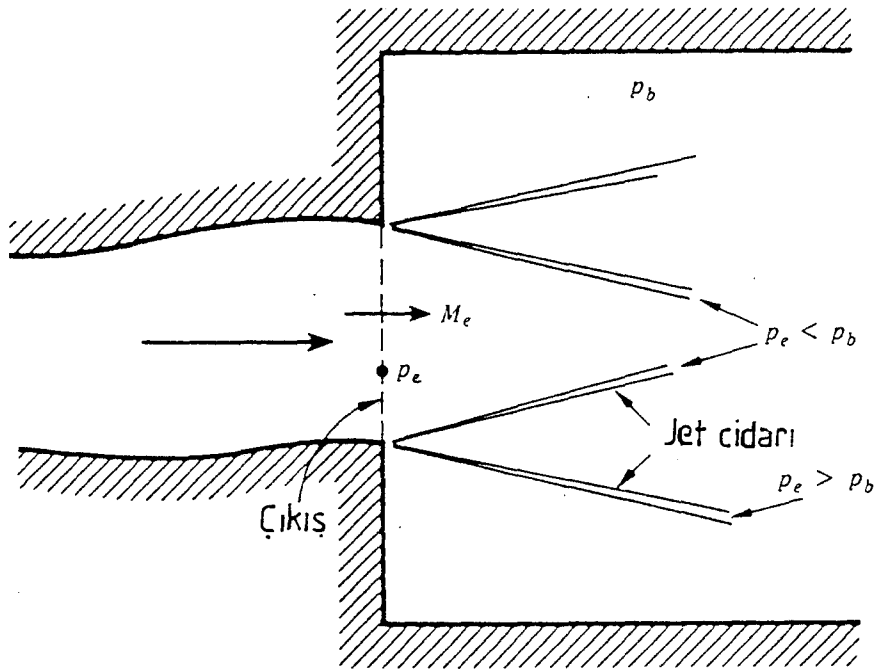
$$A_t = A_e (A^*/A_e) \dots\dots\dots(3.16)$$

3.4. Lüle Çıkış Basıncına Ortam Basıncının Tesiri

P_b ortam basıncının P_e çıkış basıncına etkisini belirlemek amacı ile şu prensip esas alınmaktadır.

- 1-) $M_e < 1$ ise $P_e = P_b$ olmalıdır.
- 2-) $M_e \approx 1$ veya $M_e > 1$ ise $P_e \neq P_b$ olabilir.

Şekil 3.8'den görüleceği gibi ikinci halde $P_e > P_b$ ise gaz jet cidarındaki P_b basıncına eşit oluncaya kadar genişleyecektir. $P_e < P_b$ ise ortam basıncı akışkan jetini sıkıştırarak, akım alanını daraltacaktır.



Şekil 3.8. P_e çıkış basıncının P_o ortam basıncına tesiri

Birinci halde yani $M_e < 1$ durumunda ise; $P_e > P_b$ olursa akım alanı çıkış düzleminden sonra basıncın artmasına yol açacaktır. Bu ise jet basıncının daha küçük ortam basıncına uymasına ters düşecektir. $P_e < P_b$ olması halinde çıkış

düzleminden sonra akım ivmelenecek ve P_e 'nin P_b 'den daha da küçük olmasına yol açacaktır. Bu da $P_e=P_b$ prensibine ters düşer.

Sonuç olarak; $Me < 1$ için fiziki olarak tek çözüm akımın çıkışta $P_e=P_b$ şartına uygun olarak lüleyi terk etmesidir. Ohalde bu durum için ortam basıncı çıkış düzlemindeki akım üzerine tesir eder. $Me > 1$ için ise $P_e=P_b$ olması gerekmez. Yani bu durum için çıkış basıncına ortam basıncının direkt tesiri yoktur.

3.6. Yakınsak Lülelerde Akım Karakteristikleri

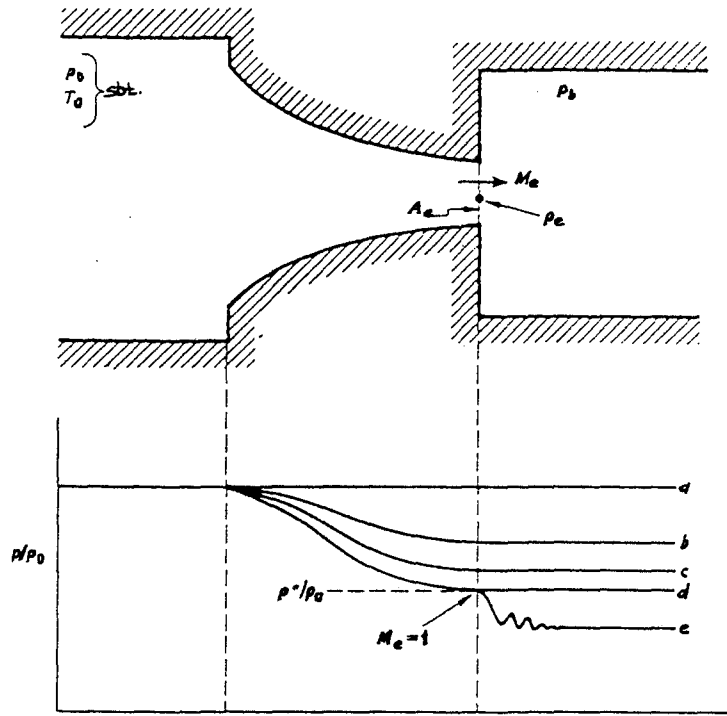
Bilinen P_o ve T_o durma özelliklerine sahip ideal bir gazla beslenen yakınsak bir lüle incelenecektir. A_e kesit alanı biliniyor ve sabit kabul edilecektir. P_b basıncı P_o 'dan sifıra azalırken ele alınacaktır.

Bu durumda lüle yakınsak kanal olup sıfır hızda bir gazla beslendiğine göre lülede sesüstü hızlara erişilmeyecek dolayısı ile şok dalgaları görülmeyecektir. Böylece akımın sürtünmesiz ve adiabatik olması isentropikliği temin edecektir. İlk anda P_b/P_o oranı lüle boyunca sabittir. Sesaltı akışlarda ve lülelerde akışkanın akmaya başladığı andan itibaren P_b ortam basıncı azalır.

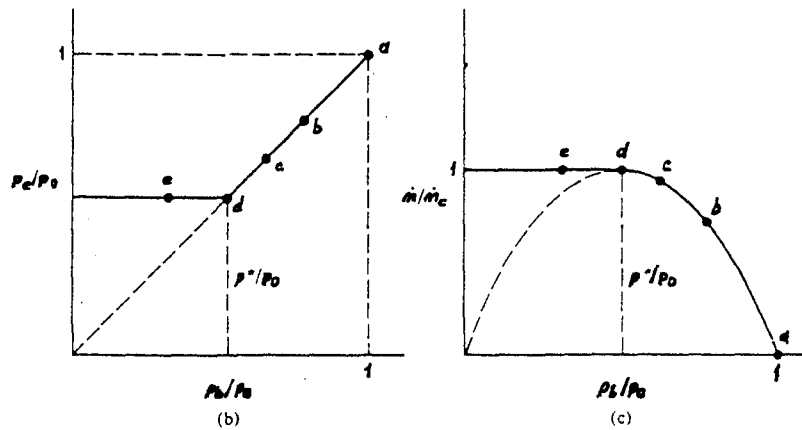
$$\left(\frac{m}{A}\right)_{\max} = \left(\frac{m}{A^*}\right) = \frac{P_o \sqrt{k}}{\sqrt{T_o} \sqrt{R}} \left[2 / (k+1) \right]^{(k+1)/2(k-1)} \dots \dots \dots (3.17) \quad (Ek5)$$

Denklem 3.17 lüle içinde herhangi bir yerde debinin $(m/A)_{\max}$ değerini geçmeyeceğini göstermektedir. A_e lüle içinde minimum alandır. Bu kesitte debi daima en büyük olacaktır, mc boğulma halindeki maksimum debiyi gösteriyorsa A_e kesitinde $Me=1$ olacaktır ve denklem 3.18'le gösterilir.

$$mc/Ae = \frac{k}{To} \frac{Po}{R} \left| \frac{(k+1)/2(k-1)}{2/(k+1)} \right| \dots \dots \dots (3.18)$$



(a)



(b)

(c)

Şekil 3.9. Yakınsak lülelerde akım karakteristiği

Şekil 3.9' un (b) bölümünde Pe/Po ile Pb/Po 'ın değişimi, (c) bölümünde ise m/mc 'nin Pb/Po ile değişimi gösterilmektedir. Başlangıçta Po basıncı Pb basıncına eşittir

ve lüle boyunca sabittir. Lüleden akım geçmeye başlayınca P_b düşer. Ve gaz lüle boyunca ivmelenir. A_e çıkış kesitinde $M_e < 1$ ise $P_e = P_b$ 'dir. Ve basınç dağılımı kolayca bulunabilir. Basınç dağılımının bulunmasından sonra Denklem 3.6'dan M_e ve 3.14 den A_e/A_t kesit oranı hesaplanabilir.

Şekil 3.9'un (a) bölümünde d indisi ile işaretlenen değere ulaşıldığı zaman P_b/P_o oranı P^*/P_o değerine eşit oluncaya kadar azaltılmıştır. Dolayısı ile $M_e = 1$ 'e kadar artmıştır, m debisi de A_e kesitinde maksimum değere yani boğulma değerine ulaşmıştır. Basıncın P_b/P_o 'dan daha fazla azalması M_e değerinin 1'den büyük olmasını gerektirecektir. Bu da basit yakınsak lülede mümkün değildir. Zira sesüstü akıslarda ve lülelerde basınç azalmaz artar. Onun için debi A_e kesitindeki değerinden daha büyük değer almaz. Kısaca yakınsak bir lüle için;

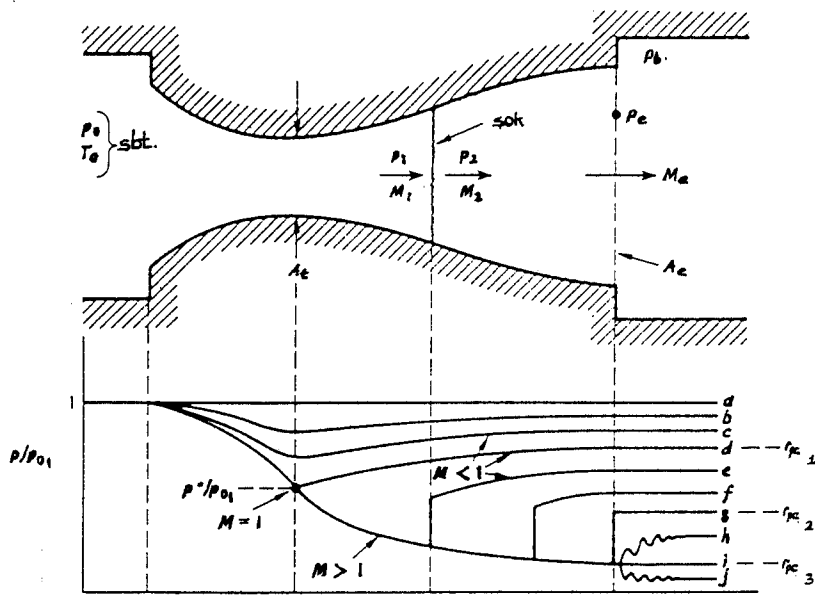
- 1) $P_b/P_o > P^*/P_o$ — $P_e/P_o = P_b/P_o$
 — $M_e < 1$ ve P_e/P_o 'ın fonksiyonu
 — $m/m_c = A^*/A_e$
 — P_e/P_o basınç dağılımı P_b/P_o 'ın fonksiyonu
- 2) $P_b/P_o \leq P^*/P_o$ — $P_e/P_o = P^*/P_o \geq P_b/P_o$
 — $M_e = 1$ sabit
 — $m = m_c$
 — Basınç dağılımı P_b/P_o oranından bağımsız

Denklem 3.15'de $P/P_o = 0$ için debinin sıfır olması gerekir. Fakat Şekil 3.9'in (c) bölümünde noktalı işaretlerde görüleceği gibi $M_e = 1$ 'deki debi değeri boğulma değerindedir. Ve basınç azalsa bile bu değer sabit kalır. Ayrıca denklem 3.15'de A alanı A_e alanı olarak alınırsa P/P_o 'ı P_e/P_o 'a eşit olması gerekir. Yapılan incelemede ise $P_b/P_o = 0$ olsa bile P_e/P_o 'ın P^*/P_o 'dan küçük olmayabileceğini göstermiştir. Bu yüzden $P^*/P_o > P_b/P_o > 0$; $P_e/P_o = P_b/P_o$ ve $P_e/P_o = P^*/P_o$

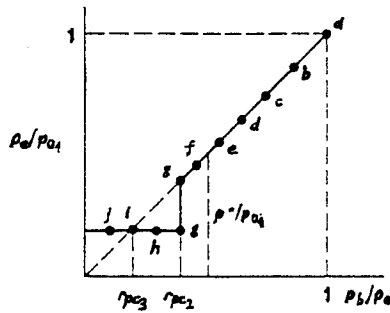
için Denklem 3.15 kullanılır ve Şekil 3.9'in (c) bölümünün noktalı kısmı hariç diğer kısmı bu denklem ile elde edilebilir.

3.7. Yakınsak-Iraksak Lülelerde Akım Karakteristikleri

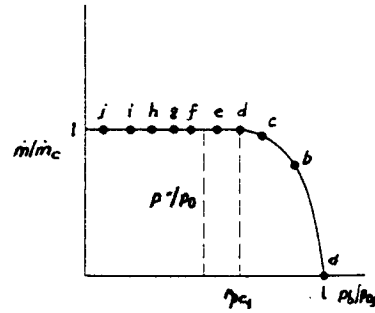
Yakınsak iraksak lülelerde minimum bir lüle kesit alanı olduğu için sesüstü akım oluşabilir ve şok dalgasının doğma ihtimali vardır. Akım isentropiklikten ayrılacaktır. At kesitindeki en büyük debi m_c ile gösterilmekte ve Denklem 3.19'den hesaplanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10. Yakınsak-Iraksak lülelerde akım karakteristkleri

$$m c^*/A t = \frac{P o_1}{T o} \frac{k}{R} \left| \frac{2}{k+1} \right| \frac{(k+1)/2(k-1)}{k+1} \dots\dots\dots (3.19)$$

$P_b/P_{o1} < 1$ olduğu zaman lülede akışkan akmaya başlar. Şekil 3.10'un (a) bölümünde a indisi ile gösterilen düz çizgi bize henüz akış olayının başlamadığını göstermektedir, b ve c eğrileri ise debinin boğaz kısmında henüz sonik akımı yakalayacak şekilde büyük bir değere ulaşmadığını gösterir. Ve burada $m/m_c < 1$ ve $M < 1$ olup, lülenin ıraksak kısmında da $M < 1$ 'dir ve basınç artar. Lüle çıkış kesitinde de akım sesaltı olduğundan çıkışta $P_b = P_e$ olacaktır. Denklem 3.6'dan P/P_o basınç oranı bulunur ve b ve c şartları altında debi iki şekilde Denklem 3.20 ve 3.21'deki gibi hesaplanır.

$$1-) m/A_e = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{R}} \frac{P_{o1}}{\sqrt{T_o}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{k-1}} \left[\frac{2/k}{(P_e/P_o)} - \frac{(k+1)/k}{(P_e/P_o)} \right]^{1/2} \dots\dots (3.20)$$

$$2-) m/A_e = \frac{A^* \sqrt{k}}{A_e \sqrt{R}} \frac{P_{o1}}{\sqrt{T_o}} \frac{(k+1)/2(k-1)}{[2/(k+1)]} \dots\dots\dots (3.21)$$

$$m/m_c^* = (A^*/A_e)(A_e/A_t) \dots\dots\dots (3.22)$$

Burada A^*/A_e , $(P_e/P_{o1} = P_b/P_{o1})$ 'in bir fonksiyonudur. A_e/A_t ise tespit edilen lüle geometrisinden bellidir. A_e , A_t boyun kesiti alanından daha küçük bir alandır. Debi m_c boğulma değerine kadar arttığı zaman $A_e = A_t$ olacaktır. Burada $M_t = 1$ olup $dA = 0$ 'dır. Bu noktadan sonra ıraksak lülede A_e/A_t değeri için sesaltı ve sesüstü iki çözüm vardır.

Şekil 3.10 'daki d ve i eğrileri iki isentropik çözümü gösterir, d eğrisine karşılık gelen çalışma basıncında

ırsaksak kanalda sesaltı akım elde edilir. i eğrisine karşılık gelen çalışma basıncında ırsaksak kanalda süpersonik akım elde edilir. Debi boyun noktasında boğulma değerindedir. d eğrisine karşılık gelen debi boğulma değerine ulaştığı zaman P_b/P_{o1} basınç oranına karşı gelir ve bu basınç oranından daha küçük basınç oranları için debi değişmez kalır. Buna $rpc1$ "Lülenin ilk kritik basınç oranı" denir. i eğrisine karşılık gelen basınç oranı sesüstü akımı oluşturarak $P_e=P_b$ olur. Buradaki P_b/P_{o1} basınç oranına $rpc3$ "Lülenin üçüncü kritik basınç oranı" denir.

$rpc1 > P_b/P_{o1} > rpc3$ olduğunda lülede isentropik akım çözümü mümkün değildir. Aradaki bu ortam basınç oranı verecek bir P_b ortam basıncı için ya lüle içinde normal bir şok dalgası olacak ya da lüle dışında bir dış sıkışma şoku oluşacaktır. Bu durumda akım ırsaksak kısma giriste sesüstü olacaktır. Şok lüle dışında olduğunda lüle içinde isentropik akım hali devam etmelidir. Ancak etmeyebilir. Basınç P_b ortam basıncına ulaşır, bundan sonra sesüstü akım normal şok dalgasına maruz kalır ve akım sesaltı olur, basıncı artar. A_e kesitindeki lüleyi $P_e=P_b$ olacak şekilde terkeder.

Lüle içinde şokun meydana geldiği yerde Mach sayısı M_2 değerine kadar azalır. Basıncıta P_2/P_1 olacak şekilde artar. Bu artış çıkışta $P_b=P_e$ olacak devam eder. Bu da Şekil 3.10'un (a) bölümünde e eğrisi ile gösterilmiştir. Çalışma basıncı f eğrisinden daha da düşük ise şok çıkışa yakın bir yerde meydana gelir. Buna göre şok dalgasının meydana geldiği Mach sayısını lülenin yakınsak kısmında hız gittikçe artacağından daha büyük olacak dolayısı ile daha büyük basınç yükselmesi oluşacaktır.

Şekil 3.10'un (a) bölümündeki g eğrisi ile gösterilen kısmında ise özel bir P_b/P_{o1} oranı için şok dalgası lüle çıkışında meydana gelir. Buradaki P_b/P_{o1} oranına $rpc2$

"Lülenin ikinci kritik basınç oranı" denir. Birinci ve ikinci kritik basınç oranları arasında kalan basınç oranları için lüle çıkışında akım sesaltıdır. Ve $P_b = P_e$ 'dir. Lülenin ikinci kritik oranında lülenin çıkışındaki basınç iki değerli olup az öncede belirtildiği gibi g indisi ile gösterilmiştir.

Çalışma basınç oranı ikinci kritik orandan daha az olduğu zaman şok dalgası lüle çıkış düzleminden dışarı doğru hareket eder ve lüle çıkışından sonra akım sesüstü olur. Bu durum h indisi ile gösterilmiştir. Lüle çıkışındaki şartlar ise üçüncü kritik oranındaki ile aynıdır. Akım sesüstü olduğundan $P_e = P_b$ olmayabilir. Onun için P_e kendinden büyük olan P_b 'ye uymaya çalışacaktır. Eğer basınç oranı üçüncü kritik orandan daha küçükse lüle çıkışındaki şartlar değişmez kalır ve akım genişleme dalgaları ile ortam basıncına uymaya çalışır.

Sonuç olarak yakınsak-ıraksak lüleler için üç kritik oran çok önemlidir. Çalışma karakteristikleri Tablo 3.1'de belirtilmiştir ve;

1) Birinci kritik orandan büyük bütün basınç oranları için debi boğulma değerindedir.

2) İkinci kritik oranın üstündeki bütün basınç oranları için dış akım ses altıdır.

3) Birinci ve ikinci kritik oranları arasındaki basınç oranları için normal şok lülenin ıraksak kısmında meydana gelir.

4) İkinci kritik basınç oranında normal şok lüle çıkışında oluşur.

5) Üçüncü kritikte $P_e = P_b$ olacak şekilde serbest sesüstü akım oluşur.

6) $rpc_2 = rpc_3$ (P_2/P_1) (3.23)
Denklem 3.23 ile ikinci kritik basınç oranı bulunur.

Tablo 3.1. Yakınsak-İraksak lülenin çalışma karakteristikleri

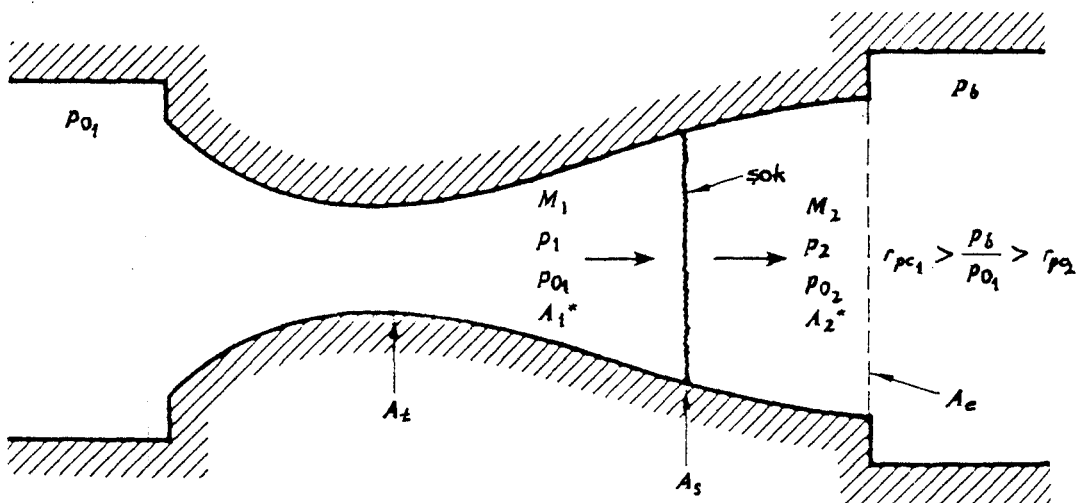
Pb/Po	Pe/Po1	Pt/Po1	Me	m/mc	Açıklama
$1 > \frac{Pb}{Po1} > rpc1$	$= \frac{Pb}{Po1}$	$> P^*/Po1$ $< Pb/Po1$	< 1 Pb/Po1'in fonksiyonu	< 1 Pb/Po1'in fonksiyonu	Lüle içinde tamamen sesaltı akım
$rpc1 > Pb/Po1$ $Pb/Po1 > rpc2$	$= \frac{Pb}{Po1}$	$= \frac{P^*}{Po1}$	< 1 $= Pb/Po1$ fonksiyonu	$= 1$ Pb/Po1'e bağlı değil	İraksak lülede normal şok
$rpc2 > Pb/Po1$ $Pb/Po1 > rpc3$	$= rpc3$	$= \frac{P^*}{Po1}$	> 1 sabit	$= 1$ Pb/Po1'e bağlı değil	İraksak lüle kısımında sesüstü akım ve lüle dışı sıkışma şoku ile ortam basıncına uyum
$rpc3 > Pb/Po1$	$= rpc3$	$= \frac{P^*}{Po1}$	> 1 sabit	$= 1$ Pb/Po1'e bağlı değil	İraksak lülede sesüstü akım ve lüle dışı genişleme dalgası ile ortam basıncına uyum

3.8. Yakınsak-İraksak Bir Lülede Normal Şokun Yeri

A_e/A_t lüle oranı tespit edildiği ve kritik basınç oranları bilindiği kabul edilecektir. Böyle bir lülede çalışma basınç oranı birinci ve ikinci kritik alan içinde olsun. Bu şartlar halinde lülenin ıraksak kısmında normal şok dalgası meydana gelecektir. Şekil 3.11 normal şok dalgasının yerini göstermektedir.

Şoktan sonra durma basıncı da değişeceğinden bunun kritik alana tesiri Denklem 3.23'den bulunur. Bu denkleme göre durma basıncı değişimine uygun olarak A^* kesit oranının boğulma oranında değiştiğini görülmektedir.

$$A_1^*/A_2^* = P_{o2}/P_{o1} \dots\dots\dots(3.23)$$



Şekil 3.11. Normal şok dalgası

Normal şokun yerini bulmak için Bölüm 3.3'de verilen bağıntılardan yararlanılabilir. Bunun için verilen çalışma basıncı oranı için çıkış Mach sayısının bulunması gerekir. Bu da denklem 3.24'den hesaplanabilir.

$$-k/(k-1)$$

$$P_e/P_{o2} = \left[\frac{1+Me^2(k-1)/2}{2} \right] \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\frac{P_b}{P_{o1}} = \frac{P_e}{P_{o1}} = \frac{P_e}{P_{o2}} \frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \frac{P_e}{P_{o2}} \frac{A1^*}{A2^*} \dots\dots\dots(3.25)$$

Sokun olduğu yere kadar isentropik bir değişme söz konusudur. Bu yüzden $A1^*=A_t$ 'dir.

$$\frac{P_b}{P_{o1}} = \frac{P_e}{P_{o2}} \frac{A_t}{A2} = \frac{P_e}{P_{o2}} \frac{A_t}{A_e} \frac{A_e}{A2^*} \dots\dots\dots(3.26)$$

$A_e/A2^*$ alan oranı Me 'ye bağlıdır. isentropik akım bağıntısı Denklem 3.26'da gösterildiği şekilde kullanılabilir.

$$A_e/A2^* = \frac{1}{Me} \left[\frac{1+Me^2(k-1)/2}{(k+1)/2} \right]^{(k+1)/2(k-1)} \dots\dots\dots(3.27)$$

$$\frac{P_b}{P_{o1}} \frac{A_e}{A_t} = \left[\frac{1+Me^2(k-1)/2}{2} \right]^{-k/(k-1)} \frac{1}{Me} \left[\frac{1+Me^2(k-1)/2}{(k+1)/2} \right]^{(k+1)/2(k-1)}$$

$$= \frac{1}{Me \left[\frac{1+Me^2(k-1)/2}{2} \right]^{1/2}} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/2(k-1)} \dots\dots\dots(3.28)$$

3.25, 3.26, 3.27 denklemlerinden 3.28 denklemi elde edilir.

$$Me^2 + \frac{2}{k-1} Me^2 - \left[\frac{Po1}{Pb} \right]^2 \left[\frac{Ae}{At} \right]^2 \frac{2}{k-1} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/(k-1)} = 0 \dots\dots\dots (3.29)$$

Denklem 3.29'dan Me çözümlenip pozitif kök alınır, Denklem 3.30

$$Me^2 = - \frac{1}{k-1} + \left[\frac{1}{(k-1)^2} + \left[\frac{Po1}{Pb} \right]^2 \left[\frac{Ae}{At} \right]^2 \frac{2}{k-1} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/(k-1)} \right]^{1/2} \dots (3.30)$$

oluşur. Böylece şok yerini bulmak için şu yöntem kullanılır:

1) Lüle geometrisi bilinen yani At/Ae alanı oranı belli, çalışma şartları bilinen yani Po1/Pe belli olduğunda Me Denklem 3.30'den bulunur.

2) Me belli olduğundan Pe/Po2 basınç oranı Denklem 3.24'den bulunur.

3) Pe/Po1 = Pb/Po1 ile Pe/Po2 basınç oranları bilindiğinden, Po2/Po1 basınç oranı Denklem 3.31'den bulunur.

$$Po2/Po1 = (Pe/Po1)(Po2/Pe) = (Pb/Po1)(Po2/Pe) \dots (3.31)$$

4) Elde edilen Po2/Po1 oranı kullanılarak Denklem 3.10 ile şoktan önceki M1 sayısı bulunur.

5) Elde edilen M1 sayısı yerine Me sayısı ve Ae yerine As konularak As/A = As/At şokun meydana geldiği kesit alan bulunur.

4. DAİRESEL KESİTLİ VE DAİRESEL PROFİLLİ LÜLE TEORİSİ

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi lüle geometrisi ve lüle boyu sesüstü akışlarda oluşabilecek şok dalgası için çok önemlidir. Bu çalışmada lüle geometrisi önceden seçilerek şok dalgasının oluşum yerleri akışkan olarak hava ve belli yüzdelerde hava-subuharı karışımı kullanılarak araştırıldı. İki hal arasında karşılaştırma yapma imkanı bulundu.

Bu çalışma yapılırken dairesel profilli ve dairesel kesitli lüle kullanılmıştır. R2 yarıçapı değiştirilerek At boyun kesiti alanı azaltılıyor. R1 yarıçapı yani Ae çıkış alanı sabit alındı. Böylece değişen Ae/At oranının xs şok dalgasının oluşum yerine, şoktan önce ve sonraki Mach sayısına etkisi incelendi. Tüm bu çalışmalar ilkönce Pb/Po1= .85 çalışma oranı için yapıldı. Lüle boyu 1, değişen At boyun kesitine bağlı olarak her kesit için farklı bir değer aldı. Daha sonra Pb/Po1 çalışma oranı değiştirilerek sonuçlara etkisi incelendi. Şimdi bu bölümde geliştirilen bu dairesel profilli ve dairesel kesitli lülenin geometrisi belirlenecek.

4.1. Çember Denklemlerinin Belirlenmesi

M1 ve M2 birbirlerine dik iki çemberdir. Bu bölümde iki çember denklemi belirlenecek olup, şokun meydana geldiği xs mesafesinin bulunmasında kullanılacaklardır.

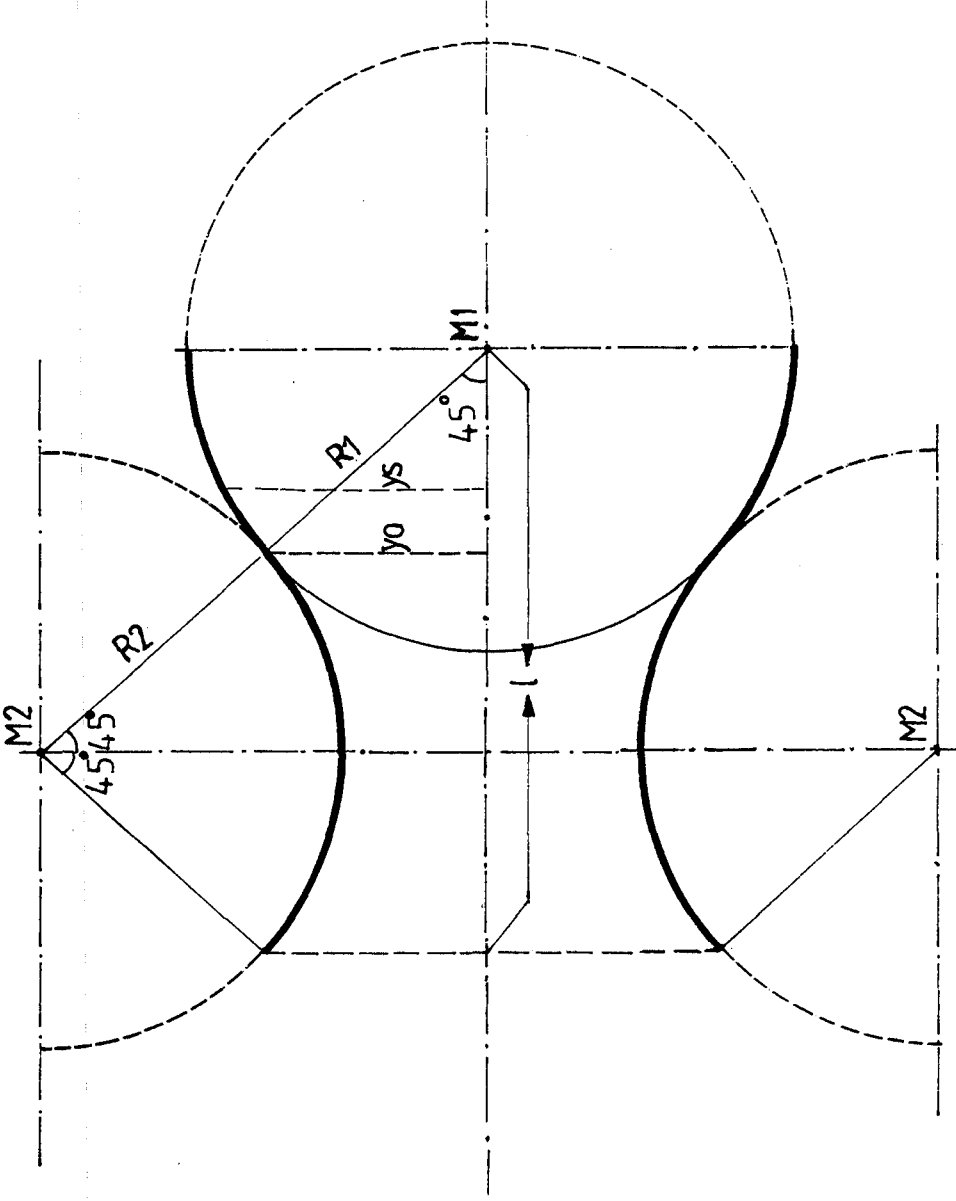
R1; M1 merkezli çemberin yarıçapıdır.

R2; M2 merkezli çemberin yarıçapıdır.

Geometriden $|OM1| = |OM2| = (R1+R2)/2$ 'dir. Buna göre;

M1 | 0; $(R1+R2)/\sqrt{2}$ | 1. Çemberin merkezi

M2 | $(R1+R2)/\sqrt{2}$; 0 | 2. Çemberin merkezi'dir.



Şekil 4.1. Dairesel profil ve dairesel kesiti tüle teorisi.

Kullanılan bu çember denklemleri ise şöyledir.

M1 merkezli çemberi için:

$$[x-x_1]^2 + [y-y_1]^2 = R_1^2$$

M2 merkezli çemberi için:

$$[x-x_1]^2 + [y-y_1]^2 = R_2^2$$

Denklemler düzenlendiğinde:

M1 merkezli çemberi için:

$$[y-0]^2 + [x-(R_1+R_2)/\sqrt{2}]^2 = R_1^2$$

M2 merkezli çemberi için:

$$[y+(R_1+R_2)/\sqrt{2}]^2 + x^2 = R_2^2$$

Denklemler düzenlendiğinde:

M1 merkezli çember için:

$$y = \left[R_1^2 - \left(x - \frac{R_1+R_2}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4.1)$$

M2 merkezli çember için:

$$y = \frac{R_1+R_2}{\sqrt{2}} - \left[R_2^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4.2)$$

iki çemberin teğet olduğu yo mesafesine göre kullanılırlar.

4.2. Lüle Şekillendirmesinde Gerekli Özel Alan ifadelerinin Bulunması

Daha öncede belirtildiği gibi değişen R2 yarıçapına bağlı olarak At boyun kesiti alanı da değişmekte idi. R2 yarıçaplı çember büyüdükçe At alanı küçülmektedir. Ayrıca R1 yarıçapı 20 cm alınmıştır. Böylece Ae/At oranı büyüyecektir.

1) At alanının bulunması

$$yt = (R1+R2)/\sqrt{2}-R2 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$At = 3.14 \left| (R1+R2)/\sqrt{2}-R2 \right|^2 \dots\dots\dots (4.4)$$

2) Ao alanının bulunması

$$yo = R1/\sqrt{2} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$xo = R2/\sqrt{2} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$Ao = 1.57 R2^2 \dots\dots\dots (4.7)$$

3) Lüle boyunun bulunması

Lüle boyu her R2 değeri için farklı bir değer almaktadır.

$$l = R1/\sqrt{2} + \sqrt{2} R2 \dots\dots\dots (4.8)$$

4) Ae alanının bulunması

$$R1 = 20 \quad Ae = 1256.6$$

Yapılan hesaplar Pb/Po1 oranınının 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.85; 0.9 değerleri için tekrarlanmıştır. Her basınç oranı için ayrı tablolar oluşturulmuştur.

4.3. Kullanılacak Olan Akışkanlara Ait k Sayısının Bulunması

Bu bölümde dizaynını gerçekleştirdiğimiz lülede akışkan olarak kullanacağımız havanın yanında çeşitli yüzdelerdeki hava-subuharı karışımını ele alındı. Bundaki amaçta havanın çeşitli yüzdelerdeki nemlendirilmiş halinin şok dalgasının oluşum yerine etkisini görmektir. Bu amaçla nem oranı farklı iki akışkanla çalışmalar tekrarlandı. Kullanılan bu akışkanlar şunlardır:

$$C_p = W_h C_{ph} + W_w C_{pw} \dots\dots\dots (4.9)$$

$$C_v = W_h C_{vh} + W_w C_{vw} \dots\dots\dots (4.10)$$

$$k = C_p/C_v \dots\dots\dots (4.11)$$

$$R = C_p - C_v$$

Hava ve su için C_{ph} , C_{pw} , C_{vh} , C_{vw} değerleri Eki'den alınmıştır.

$$C_{ph} = 1.0035 \text{ kJ/kgK} ; C_{vh} = .7165 \text{ kJ/kgK}$$

$$C_{pw} = 1.8723 \text{ kJ/kgK} ; C_{vw} = 1.4108 \text{ kJ/kgK}$$

1) $W_h = \%47 \text{ kg khava/kghava} ; W_w = \%53 \text{ kgnem/kghava}$

Denklem 4.9 ve 4.10'dan ;

$$C_p = 1.4602 \text{ kJ/kgK} ; C_v = 1.0817 \text{ kJ/kgK}$$

$$k = 1.35 ; R = .3785 \text{ kJ/kgK}$$

2) $W_h = \%0.4 \text{ kg khava/kghava} ; W_w = \%99.6 \text{ kgnem/kghava}$

Denklem 4.9 ve 4.10'dan ;

$$C_p = 1.8688 \text{ kJ/kgK} ; C_v = 1.4080 \text{ kJ/kgK}$$

$$k = 1.327 ; R = .4608 \text{ kJ/kgK}$$

3) $k = 1.4 ; R = .287 \text{ kJ/kgK}$ olan kuru hava

Şok dalgasının yerini bulmak için bilgisayar programı geliştirilmiş olup Ek açıklamalar-A bölümünde verilmiştir.

4.4. Şok Dalgasının Yerini Bulmada Kullanılacak Yöntem

Şok dalgasının yerini bulmamız için ilk önce gerekli birtakım ifadeleri bulmamız gerekecektir. Bunlar sırası ile At kesit alanı, A_e/A_t oranı, Me Mach sayısı, P_e/P_{o2} basınç oranı, P_{o2}/P_{o1} basınç oranı, M1 Mach sayısı, A_s/A_t oranı, A_s kesit alanı, y_s mesafesi, x_s mesafesi, x_{sg} mesafesi'dir.

- 1) Denklem 3.30'dan Me Mach sayısı bulunur.
- 2) Denklem 3.6'dan P_e/P_{o2} basınç oranı bulunur.
- 3) Denklem 3.31'den P_{o2}/P_{o1} basınç oranı bulunur.
- 4) Denklem 3.10'dan M1 Mach sayısı bulunur.
- 5) Denklem 3.14' de A_e yerine A_s ve Me yerine M1 konularak A_s alanı bulunur.
- 6) Dairesel profilli olduğundan A_s alanından y_s mesafesi bulunur.
- 7) y_s mesafesi y_o 'dan büyükse Denklem 4.1, y_s mesafesi y_o 'dan küçükse Denklem 4.2 kullanılarak x_s mesafesi bulunur.
- 8) R_2 yarıçapının en büyük değerinin oluşturduğu çemberin merkezini orijin kabul ederek x_s mesafesinin ötelenmesi sonucu x_{sg} mesafesi oluşur. Bu öteleme miktarları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Öteleme mesafeleri

R1	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Δ	7.07	6.36	5.66	4.95	4.24	3.54	2.83	2.12	1.41	0.71	0

Buna göre çeşitli basınç oranları için yapılan çalışmalar sonucunda Tablo 2'den 29'a kadar belirtilmiştir. Bu tablolardan alınan sonuçlara göre Bölüm 4'ün sonunda verilen şekiller çıkartılmıştır. Böylece havanın içine katılan nem miktarının, çalışma basıncının, lüle geometrisinin, şok

Tablo= 4.2. K= 1.4 ve Oran2= .1 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	1.5081	0.2692	0.3715	2.856	3.692	1457.5	Lüle dışı sok	
11	374.46	3.35	1.4481	0.2935	0.3407	2.957	4.065	1522.1	Lüle dışı sok	
12	354.64	3.54	1.3882	0.3195	0.3130	3.055	4.463	1582.7	Lüle dışı sok	
13	335.36	3.75	1.3284	0.3472	0.2881	3.152	4.892	1640.7	Lüle dışı sok	
14	316.62	3.97	1.2688	0.3765	0.2656	3.245	5.343	1691.7	Lüle dışı sok	
15	298.42	4.21	1.2094	0.4073	0.2455	3.336	5.821	1737.1	Lüle dışı sok	
16	280.76	4.47	1.1503	0.4397	0.2274	3.424	6.326	1776.1	Lüle dışı sok	
17	263.63	4.76	1.0916	0.4733	0.2113	3.509	6.849	1805.5	Lüle dışı sok	
18	247.05	5.08	1.0333	0.5079	0.1969	3.591	7.390	1825.8	Lüle dışı sok	
19	231.00	5.44	0.9755	0.5434	0.1840	3.669	7.939	1834.0	Lüle dışı sok	
20	215.50	5.83	0.9184	0.5795	0.1726	3.744	8.502	1832.2	Lüle dışı sok	

Oran1 = Ae/At

Oran3 = $Pe/Po2$

Oran4 = $Po2/Po1$

Oran5 = As/At

Tablo= 4.3. K= 1.35 ve Oran2= .1 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	1.5383	0.2628	0.3806	2.764	3.637	1436.1	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	1.4762	0.2876	0.3477	2.863	4.028	1508.1	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	1.4142	0.3143	0.3182	2.958	4.444	1576.1	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	1.3524	0.3427	0.2918	3.051	4.894	1641.1	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	1.2908	0.3727	0.2683	3.140	5.368	1699.7	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	1.2295	0.4044	0.2473	3.227	5.870	1751.8	Lüle dışı şok	
16	280.76	4.47	1.1686	0.4375	0.2286	3.309	6.394	1795.1	Lüle dışı şok	
17	263.63	4.76	1.1082	0.4720	0.2119	3.389	6.942	1830.0	Lüle dışı şok	
18	247.05	5.08	1.0483	0.5074	0.1971	3.465	7.506	1854.3	Lüle dışı şok	
19	231.00	5.44	0.9890	0.5437	0.1839	3.539	8.089	1868.7	Lüle dışı şok	
20	215.50	5.83	0.9304	0.5804	0.1723	3.607	8.677	1869.8	Lüle dışı şok	

Oran1=Ae/At

Oran3=Pe/Po2

Oran4= Po2/Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.4. K= 1.327 ve Oran2= .1 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	1.5531	0.2595	0.3854	2.721	3.607	1424.0	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	1.4899	0.2846	0.3513	2.819	4.005	1499.9	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	1.4269	0.3116	0.3209	2.914	4.433	1572.2	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	1.3641	0.3403	0.2938	3.005	4.889	1639.7	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	1.3015	0.3708	0.2697	3.093	5.376	1702.1	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	1.2393	0.4029	0.2482	3.177	5.888	1757.1	Lüle dışı şok	
16	280.76	4.47	1.1775	0.4364	0.2291	3.258	6.428	1804.7	Lüle dışı şok	
17	263.63	4.76	1.1162	0.4712	0.2122	3.336	6.989	1842.6	Lüle dışı şok	
18	247.05	5.08	1.0555	0.5071	0.1972	3.410	7.568	1869.7	Lüle dışı şok	
19	231.00	5.44	0.9954	0.5437	0.1839	3.480	8.161	1885.2	Lüle dışı şok	
20	215.50	5.83	0.9362	0.5807	0.1722	3.546	8.757	1887.2	Lüle dışı şok	

Oran1=Ae/At

Oran3 =Pe/Po2

Oran4=Po2/Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.5. K= 1.4 ve Oran2= .2 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.8502	0.6234	0.3208	3.027	4.343	1714.8	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.8110	0.6489	0.3082	3.073	4.541	1700.5	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.7722	0.6741	0.2967	3.117	4.735	1679.2	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.7340	0.6989	0.2862	3.159	4.927	1652.2	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.6964	0.7232	0.2765	3.199	5.115	1619.4	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	0.6594	0.7469	0.2678	3.236	5.299	1581.3	Lüle dışı şok	
16	280.76	4.47	0.6231	0.7697	0.2598	3.271	5.474	1536.9	Lüle dışı şok	
17	263.63	4.76	0.5874	0.7917	0.2526	3.303	5.643	1487.7	Lüle dışı şok	
18	247.05	5.08	0.5525	0.8127	0.2461	3.333	5.809	1435.1	Lüle dışı şok	
19	231.00	5.44	0.5184	0.8326	0.2402	3.361	5.963	1377.5	Lüle dışı şok	
20	215.50	5.83	0.4852	0.8513	0.2349	3.386	6.104	1315.5	Lüle dışı şok	

$$\text{Oran1} = Ae/At$$

$$\text{Oran3} = Pe/Po2$$

$$\text{Oran4} = Po2/Po1$$

$$\text{Oran5} = As/At$$

Tablo= 4.6. $K= 1.35$ ve $Oran2= .2$ için x_s mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	x_s	x_{sg}
10	394.81	3.18	0.8606	0.6250	0.3200	2.952	4.417	1744.0	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.8205	0.6508	0.3073	2.995	4.619	1729.8	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.7809	0.6763	0.2957	3.036	4.820	1709.3	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.7420	0.7013	0.2852	3.075	5.018	1682.7	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.7036	0.7258	0.2756	3.112	5.212	1650.1	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	0.6660	0.7495	0.2668	3.146	5.401	1611.7	Lüle dışı şok	
16	280.76	4.47	0.6290	0.7724	0.2589	3.177	5.580	1566.5	Lüle dışı şok	
17	263.63	4.76	0.5928	0.7944	0.2518	3.208	5.756	1517.4	Lüle dışı şok	
18	247.05	5.08	0.5574	0.8153	0.2453	3.235	5.919	1462.3	Lüle dışı şok	
19	231.00	5.44	0.5228	0.8351	0.2395	3.260	6.078	1404.1	Lüle dışı şok	
20	215.50	5.83	0.4891	0.8537	0.2343	3.284	6.227	1341.9	Lüle dışı şok	

$Oran1=Ae/At$

$Oran3=Pe/Po2$

$Oran4=Po2/Po1$

$Oran5=As/At$

Tablo= 4.7. K= 1.327 ve Oran2= .2 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.8655	0.6257	0.3196	2.918	4.454	1758.6	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.8250	0.6517	0.3069	2.960	4.659	1744.7	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.7851	0.6773	0.2953	3.000	4.862	1724.4	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.7457	0.7025	0.2847	3.037	5.062	1697.7	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.7071	0.7270	0.2751	3.072	5.258	1664.9	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	0.6691	0.7508	0.2664	3.105	5.449	1626.0	Lüle dışı şok	
16	280.76	4.47	0.6318	0.7737	0.2585	3.136	5.633	1581.5	Lüle dışı şok	
17	263.63	4.76	0.5953	0.7957	0.2514	3.164	5.809	1531.5	Lüle dışı şok	
18	247.05	5.08	0.5596	0.8166	0.2449	3.191	5.977	1476.7	Lüle dışı şok	
19	231.00	5.44	0.5248	0.8363	0.2391	3.215	6.135	1417.3	Lüle dışı şok	
20	215.50	5.83	0.4909	0.8548	0.2340	3.237	6.282	1353.8	Lüle dışı şok	

Oran1= Ae/At

Oran3= Pe/ P02

Oran4= P02/ P01

Oran5 = As/At

Tablo= 4.8. K= 1.4 ve Oran2= .3 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.5865	0.7922	0.3787	2.833	3.613	1426.3	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.5580	0.8094	0.3706	2.858	3.699	1385.2	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.5300	0.8259	0.3632	2.882	3.785	1342.5	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.5025	0.8416	0.3565	2.904	3.866	1296.4	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.4756	0.8565	0.3503	2.925	3.942	1248.1	22.45	26.69
15	298.42	4.21	0.4493	0.8706	0.3446	2.944	4.014	1197.9	20.45	23.98
16	280.76	4.47	0.4237	0.8839	0.3394	2.961	4.082	1146.0	19.54	22.37
17	263.63	4.76	0.3986	0.8963	0.3347	2.978	4.145	1092.7	18.95	21.07
18	247.05	5.08	0.3742	0.9078	0.3305	2.993	4.205	1038.8	18.55	19.97
19	231.00	5.44	0.3505	0.9186	0.3266	3.006	4.259	983.9	18.27	18.98
20	215.50	5.83	0.3275	0.9284	0.3231	3.019	4.310	928.8	18.08	18.08

Oran1=Ae/At

Oran3= Pe/Po2

Oran4 = Po2/Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.9. $K= 1.35$ ve Oran2= .3 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.5919	0.7949	0.3774	2.773	3.672	1449.7	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.5629	0.8121	0.3694	2.796	3.760	1408.0	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.5345	0.8285	0.3621	2.818	3.846	1364.0	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.5067	0.8441	0.3554	2.838	3.928	1317.4	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.4794	0.8589	0.3493	2.857	4.006	1268.5	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	0.4528	0.8729	0.3437	2.875	4.080	1217.5	21.25	24.78
16	280.76	4.47	0.4269	0.8860	0.3386	2.891	4.148	1164.6	20.06	22.89
17	263.63	4.76	0.4015	0.8982	0.3340	2.906	4.211	1110.3	19.35	21.47
18	247.05	5.08	0.3769	0.9096	0.3298	2.920	4.273	1055.5	18.88	20.29
19	231.00	5.44	0.3529	0.9202	0.3260	2.932	4.328	999.8	18.54	19.25
20	215.50	5.83	0.3297	0.9299	0.3226	2.943	4.377	943.3	18.31	18.31

Oran1= Ae/At

Oran3= Pe/Pb

Oran4 = Po2/ Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.1 . K= 1.327 ve Oran2= .3 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.5944	0.7962	0.3768	2.745	3.701	1461.1	Lüle dışı şok	
11	374.46	3.35	0.5652	0.8133	0.3689	2.768	3.792	1419.8	Lüle dışı şok	
12	354.64	3.54	0.5366	0.8297	0.3616	2.789	3.877	1375.0	Lüle dışı şok	
13	335.36	3.75	0.5086	0.8453	0.3549	2.808	3.959	1327.5	Lüle dışı şok	
14	316.62	3.97	0.4812	0.8600	0.3488	2.827	4.037	1278.2	Lüle dışı şok	
15	298.42	4.21	0.4545	0.8739	0.3433	2.844	4.111	1226.7	21.69	25.23
16	280.76	4.47	0.4283	0.8870	0.3382	2.859	4.179	1173.3	20.32	23.15
17	263.63	4.76	0.4029	0.8992	0.3336	2.874	4.245	1119.2	19.56	21.68
18	247.05	5.08	0.3781	0.9105	0.3295	2.886	4.304	1063.4	19.04	20.45
19	231.00	5.44	0.3541	0.9210	0.3257	2.898	4.361	1007.3	18.68	19.38
20	215.50	5.83	0.3307	0.9306	0.3224	2.909	4.411	950.5	18.42	18.42

$$\text{Oran1} = Ae/At$$

$$\text{Oran3} = Pe / Po2$$

$$\text{Oran4} = Po2/Po1$$

$$\text{Oran5} = As/At$$

Tablo= 4.11. K= 1.4 ve Oran2= .4 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.4460	0.8724	0.4585	2.604	2.907	1147.7	15.34	22.41
11	374.46	3.35	0.4238	0.8838	0.4526	2.620	2.951	1105.2	14.99	21.35
12	354.64	3.54	0.4021	0.8946	0.4471	2.635	2.993	1061.3	14.75	20.41
13	335.36	3.75	0.3808	0.9048	0.4421	2.649	3.032	1016.8	14.61	19.56
14	316.62	3.97	0.3601	0.9143	0.4375	2.661	3.068	971.4	14.52	18.76
15	298.42	4.21	0.3398	0.9232	0.4333	2.673	3.102	925.8	14.49	18.03
16	280.76	4.47	0.3201	0.9314	0.4294	2.683	3.134	879.8	14.51	17.34
17	263.63	4.76	0.3010	0.9391	0.4259	2.693	3.163	833.9	14.57	16.69
18	247.05	5.08	0.2823	0.9461	0.4228	2.702	3.189	788.0	14.66	16.08
19	231.00	5.44	0.2642	0.9526	0.4199	2.711	3.215	742.7	14.79	15.50
20	215.50	5.83	0.2467	0.9585	0.4173	2.718	3.237	697.7	14.95	14.95

Oran1=Ae/At

Oran3=Pb/Po2

Oran4=Po2/Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.12. K= 1.35 ve Oran2= .4 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.4494	0.8746	0.4574	2.557	2.948	1163.7	15.79	22.86
11	374.46	3.35	0.4270	0.8859	0.4515	2.572	2.992	1120.2	15.34	21.71
12	354.64	3.54	0.4050	0.8966	0.4461	2.586	3.033	1075.6	15.05	20.70
13	335.36	3.75	0.3835	0.9066	0.4412	2.599	3.073	1030.4	14.86	19.81
14	316.62	3.97	0.3626	0.9160	0.4367	2.610	3.109	984.5	14.74	18.99
15	298.42	4.21	0.3422	0.9248	0.4325	2.621	3.143	937.9	14.68	18.22
16	280.76	4.47	0.3223	0.9329	0.4288	2.631	3.175	891.4	14.68	17.51
17	263.63	4.76	0.3029	0.9404	0.4254	2.640	3.205	844.8	14.72	16.84
18	247.05	5.08	0.2842	0.9473	0.4222	2.648	3.231	798.2	14.80	16.21
19	231.00	5.44	0.2659	0.9537	0.4194	2.656	3.256	752.2	14.91	15.62
20	215.50	5.83	0.2483	0.9595	0.4169	2.663	3.280	706.7	15.06	15.06

Oran1= Ae/At

Oran3= Pe/Po2

Oran4= Po2 Po1

Oran5= As/At

Tablo= 4.13. $K= 1.327$ ve Oran2= .4 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.4511	0.8756	0.4568	2.536	2.967	1171.5	16.03	23.10
11	374.46	3.35	0.4285	0.8869	0.4510	2.551	3.012	1127.8	15.53	21.90
12	354.64	3.54	0.4064	0.8975	0.4457	2.564	3.054	1083.0	15.20	20.86
13	335.36	3.75	0.3848	0.9075	0.4408	2.576	3.093	1037.2	14.99	19.94
14	316.62	3.97	0.3638	0.9168	0.4363	2.587	3.130	991.0	14.85	19.10
15	298.42	4.21	0.3433	0.9255	0.4322	2.597	3.164	944.1	14.78	18.32
16	280.76	4.47	0.3233	0.9335	0.4285	2.607	3.196	897.2	14.77	17.59
17	263.63	4.76	0.3039	0.9410	0.4251	2.616	3.225	850.3	14.80	16.92
18	247.05	5.08	0.2850	0.9479	0.4220	2.623	3.252	803.3	14.86	16.28
19	231.00	5.44	0.2667	0.9542	0.4192	2.630	3.276	756.7	14.97	15.67
20	215.50	5.83	0.2490	0.9599	0.4167	2.637	3.298	710.8	15.11	15.11

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pb/Pb2

Oran4 = Pb2/Pb1

Oran5 = As/At

Tablo= 4.14. $K= 1.4$ ve Oran2= .5 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.3592	0.9147	0.5466	2.385	2.369	935.5	11.11	18.18
11	374.46	3.35	0.3411	0.9226	0.5419	2.396	2.394	896.5	11.22	17.58
12	354.64	3.54	0.3234	0.9301	0.5376	2.406	2.417	857.2	11.36	17.01
13	335.36	3.75	0.3062	0.9371	0.5336	2.416	2.438	817.7	11.52	16.47
14	316.62	3.97	0.2894	0.9435	0.5299	2.425	2.458	778.3	11.71	15.95
15	298.42	4.21	0.2730	0.9495	0.5266	2.433	2.477	739.1	11.92	15.45
16	280.76	4.47	0.2570	0.9551	0.5235	2.440	2.493	700.1	12.15	14.98
17	263.63	4.76	0.2415	0.9602	0.5207	2.447	2.509	661.4	12.40	14.52
18	247.05	5.08	0.2265	0.9649	0.5182	2.453	2.523	623.4	12.68	14.09
19	231.00	5.44	0.2119	0.9692	0.5159	2.458	2.536	585.9	12.97	13.68
20	215.50	5.83	0.1978	0.9731	0.5138	2.463	2.548	549.1	13.28	13.28

Oran1= Ae/At

Oran3= Pe/Po2

Oran4= Po2/ Pol

Oran5 = As/At

Tablo= 4.15. $K= 1.35$ ve $Oran2= .5$ için x_s mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	x_s	x_{sg}
10	394.81	3.18	0.3617	0.9164	0.5456	2.349	2.396	946.0	11.28	18.35
11	374.46	3.35	0.3435	0.9242	0.5410	2.360	2.420	906.3	11.37	17.73
12	354.64	3.54	0.3256	0.9315	0.5367	2.370	2.444	866.7	11.49	17.15
13	335.36	3.75	0.3082	0.9384	0.5328	2.378	2.465	826.7	11.64	16.59
14	316.62	3.97	0.2912	0.9448	0.5292	2.386	2.485	786.7	11.82	16.06
15	298.42	4.21	0.2747	0.9507	0.5260	2.394	2.503	746.9	12.02	15.55
16	280.76	4.47	0.2587	0.9561	0.5230	2.401	2.520	707.5	12.24	15.07
17	263.63	4.76	0.2430	0.9611	0.5202	2.407	2.536	668.5	12.48	14.61
18	247.05	5.08	0.2279	0.9657	0.5178	2.413	2.550	630.1	12.75	14.17
19	231.00	5.44	0.2132	0.9699	0.5155	2.418	2.563	592.1	13.04	13.74
20	215.50	5.83	0.1990	0.9737	0.5135	2.422	2.575	554.8	13.34	13.34

Oran1=Ae/At

Oran3=Pe/Po2

Oran4 =Po2/Po1

Oran5=As/At

Tablo= 4.16. K= 1.327 ve Oran2= .5 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.3629	0.9172	0.5452	2.333	2.409	951.1	11.36	18.43
11	374.46	3.35	0.3446	0.9249	0.5406	2.343	2.433	911.1	11.44	17.80
12	354.64	3.54	0.3266	0.9322	0.5364	2.353	2.457	871.3	11.56	17.22
13	335.36	3.75	0.3092	0.9390	0.5325	2.361	2.478	831.0	11.70	16.65
14	316.62	3.97	0.2921	0.9453	0.5289	2.369	2.497	790.7	11.87	16.11
15	298.42	4.21	0.2755	0.9512	0.5257	2.376	2.516	750.8	12.06	15.60
16	280.76	4.47	0.2594	0.9566	0.5227	2.383	2.533	711.1	12.28	15.11
17	263.63	4.76	0.2437	0.9615	0.5200	2.389	2.549	672.0	12.53	14.65
18	247.05	5.08	0.2285	0.9661	0.5176	2.395	2.563	633.2	12.79	14.20
19	231.00	5.44	0.2138	0.9702	0.5153	2.399	2.576	595.0	13.07	13.78
20	215.50	5.83	0.1996	0.9740	0.5133	2.404	2.588	557.8	13.37	13.37

Oran1 = Ae/At

Oran3=Pe/ Pö2

Oran4 = Pö2 / Pö1

Oran5= As/At

Tablo= 4.17. K= 1.4 ve Oran2= .6 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	XS	XSG
10	394.81	3.18	0.3005	0.9393	0.6388	2.177	1.964	775.4	8.84	15.91
11	374.46	3.35	0.2852	0.9451	0.6349	2.185	1.979	740.9	9.11	15.48
12	354.64	3.54	0.2704	0.9505	0.6313	2.193	1.993	706.7	9.40	15.06
13	335.36	3.75	0.2559	0.9555	0.6279	2.200	2.006	672.6	9.70	14.65
14	316.62	3.97	0.2417	0.9602	0.6249	2.207	2.018	638.8	10.02	14.26
15	298.42	4.21	0.2280	0.9645	0.6221	2.213	2.029	605.4	10.35	13.89
16	280.76	4.47	0.2146	0.9684	0.6196	2.219	2.039	572.4	10.70	13.53
17	263.63	4.76	0.2016	0.9721	0.6172	2.224	2.048	539.9	11.06	13.18
18	247.05	5.08	0.1890	0.9754	0.6151	2.229	2.057	508.1	11.44	12.85
19	231.00	5.44	0.1768	0.9784	0.6132	2.233	2.064	476.8	11.82	12.53
20	215.50	5.83	0.1650	0.9812	0.6115	2.237	2.072	446.4	12.23	12.23

Oran1= Ae/At

Oran3 =Pe/Po2

Oran4 =Po2/Po1

Oran5 =As /At

Tablo= 4.18. $K= 1.35$ ve Oran2= .6 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.3025	0.9406	0.6379	2.151	1.982	782.4	8.93	16.00
11	374.46	3.35	0.2871	0.9463	0.6341	2.159	1.997	747.7	9.20	15.56
12	354.64	3.54	0.2721	0.9516	0.6305	2.166	2.010	713.0	9.48	15.13
13	335.36	3.75	0.2575	0.9565	0.6273	2.173	2.024	678.6	9.77	14.72
14	316.62	3.97	0.2432	0.9610	0.6243	2.180	2.035	644.5	10.09	14.33
15	298.42	4.21	0.2294	0.9653	0.6216	2.185	2.047	610.8	10.41	13.95
16	280.76	4.47	0.2159	0.9691	0.6191	2.191	2.057	577.4	10.75	13.58
17	263.63	4.76	0.2028	0.9727	0.6168	2.195	2.066	544.6	11.11	13.23
18	247.05	5.08	0.1902	0.9760	0.6148	2.200	2.074	512.5	11.48	12.90
19	231.00	5.44	0.1779	0.9789	0.6129	2.204	2.082	481.0	11.87	12.57
20	215.50	5.83	0.1660	0.9816	0.6112	2.207	2.089	450.1	12.26	12.26

Oran1 = A_e / A_t

Oran3 = P_e / P_o2

Oran4 = P_o2 / P_o1

Oran5 = A_s / A_t

Tablo= 4.19. K= 1.327 ve Oran2= .6 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.3034	0.9412	0.6375	2.139	1.990	785.8	8.98	16.05
11	374.46	3.35	0.2880	0.9468	0.6337	2.147	2.005	750.8	9.24	15.60
12	354.64	3.54	0.2729	0.9521	0.6302	2.154	2.019	716.1	9.51	15.17
13	335.36	3.75	0.2582	0.9569	0.6270	2.161	2.032	681.5	9.81	14.76
14	316.62	3.97	0.2439	0.9615	0.6240	2.167	2.044	647.1	10.12	14.36
15	298.42	4.21	0.2300	0.9656	0.6213	2.173	2.055	613.3	10.44	13.98
16	280.76	4.47	0.2165	0.9695	0.6189	2.178	2.065	579.9	10.78	13.61
17	263.63	4.76	0.2034	0.9730	0.6166	2.182	2.074	546.8	11.13	13.26
18	247.05	5.08	0.1907	0.9762	0.6146	2.187	2.083	514.6	11.50	12.92
19	231.00	5.44	0.1784	0.9792	0.6128	2.190	2.091	482.9	11.89	12.59
20	215.50	5.83	0.1665	0.9818	0.6111	2.193	2.097	451.9	12.28	12.28

Oran1 =Ae/ At

Oran3=Pe/Po2

Oran4 =Po2/Po1

Oran5 =As/At

Tablo= 4.2 . K= 1.4 ve Oran2= .7 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xS	xSg
10	394.81	3.18	0.2582	0.9547	0.7332	1.973	1.651	651.7	7.34	14.41
11	374.46	3.35	0.2450	0.9591	0.7299	1.981	1.661	621.9	7.71	14.07
12	354.64	3.54	0.2322	0.9632	0.7268	1.987	1.670	592.2	8.09	13.74
13	335.36	3.75	0.2197	0.9669	0.7239	1.994	1.678	562.9	8.48	13.43
14	316.62	3.97	0.2075	0.9704	0.7213	1.999	1.686	533.9	8.88	13.12
15	298.42	4.21	0.1957	0.9737	0.7189	2.004	1.693	505.3	9.29	12.82
16	280.76	4.47	0.1842	0.9766	0.7168	2.009	1.700	477.3	9.71	12.54
17	263.63	4.76	0.1730	0.9793	0.7148	2.013	1.706	449.7	10.14	12.26
18	247.05	5.08	0.1622	0.9818	0.7130	2.017	1.712	422.9	10.58	12.00
19	231.00	5.44	0.1517	0.9841	0.7113	2.020	1.716	396.5	11.03	11.74
20	215.50	5.83	0.1416	0.9861	0.7099	2.024	1.721	370.9	11.49	11.49

Oran1 = Ae / At

Oran3 = Pe / Pb2

Oran4 = Pb2 / Pb1

Oran5 = As / At

Tablo= 4.21. K= 1.35 ve Oran2= .7 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2598	0.9557	0.7324	1.956	1.663	656.5	7.40	14.47
11	374.46	3.35	0.2465	0.9600	0.7292	1.963	1.672	626.2	7.76	14.12
12	354.64	3.54	0.2336	0.9640	0.7261	1.969	1.681	596.3	8.13	13.79
13	335.36	3.75	0.2210	0.9677	0.7234	1.975	1.690	566.8	8.52	13.47
14	316.62	3.97	0.2088	0.9711	0.7208	1.980	1.698	537.5	8.91	13.16
15	298.42	4.21	0.1969	0.9743	0.7185	1.985	1.705	508.7	9.32	12.86
16	280.76	4.47	0.1853	0.9772	0.7164	1.989	1.711	480.5	9.74	12.57
17	263.63	4.76	0.1740	0.9798	0.7144	1.993	1.717	452.8	10.17	12.29
18	247.05	5.08	0.1631	0.9822	0.7127	1.997	1.723	425.7	10.61	12.02
19	231.00	5.44	0.1526	0.9844	0.7111	2.000	1.728	399.2	11.06	11.77
20	215.50	5.83	0.1424	0.9864	0.7096	2.003	1.732	373.3	11.52	11.52

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pe/Po2

Oran4 = Po2/Po1

Oran5 = As/At

Tablo= 4.22. $K= 1.327$ ve $Oran2= .7$ için x_s mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	x_s	x_{sg}
10	394.81	3.18	0.2606	0.9562	0.7321	1.948	1.669	658.8	7.42	14.49
11	374.46	3.35	0.2473	0.9604	0.7288	1.955	1.678	628.5	7.78	14.15
12	354.64	3.54	0.2343	0.9644	0.7258	1.961	1.687	598.3	8.15	13.81
13	335.36	3.75	0.2217	0.9681	0.7231	1.966	1.695	568.6	8.54	13.49
14	316.62	3.97	0.2094	0.9714	0.7206	1.971	1.703	539.3	8.93	13.18
15	298.42	4.21	0.1974	0.9746	0.7183	1.976	1.710	510.4	9.34	12.88
16	280.76	4.47	0.1858	0.9774	0.7162	1.980	1.717	482.1	9.76	12.59
17	263.63	4.76	0.1745	0.9800	0.7143	1.984	1.723	454.2	10.18	12.30
18	247.05	5.08	0.1636	0.9824	0.7125	1.988	1.729	427.0	10.62	12.04
19	231.00	5.44	0.1530	0.9846	0.7109	1.991	1.734	400.5	11.07	11.78
20	215.50	5.83	0.1428	0.9866	0.7095	1.994	1.738	374.5	11.53	11.53

$Oran1 = Ae/At$

$Oran3 = Pe/Po2$

$Oran4 = Po2/Po1$

$Oran5 = As/At$

Tablo= 4.23. K= 1.4 ve Oran2= .85 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2130	0.9689	0.8773	1.647	1.289	509.1	5.79	12.86
11	374.46	3.35	0.2022	0.9719	0.8746	1.654	1.295	485.1	6.25	12.62
12	354.64	3.54	0.1915	0.9747	0.8720	1.660	1.301	461.4	6.72	12.38
13	335.36	3.75	0.1812	0.9774	0.8697	1.666	1.306	438.0	7.19	12.14
14	316.62	3.97	0.1711	0.9798	0.8676	1.671	1.311	415.0	7.68	11.92
15	298.42	4.21	0.1613	0.9820	0.8656	1.676	1.315	392.5	8.17	11.70
16	280.76	4.47	0.1518	0.9840	0.8638	1.680	1.319	370.4	8.66	11.49
17	263.63	4.76	0.1426	0.9859	0.8622	1.684	1.323	348.8	9.17	11.29
18	247.05	5.08	0.1337	0.9876	0.8607	1.688	1.326	327.6	9.68	11.09
19	231.00	5.44	0.1250	0.9891	0.8593	1.691	1.330	307.1	10.19	10.90
20	215.50	5.83	0.1167	0.9905	0.8581	1.694	1.332	287.1	10.72	10.72

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pe/Po2

Oran4 = Po2/Po1

Oran5 = As/ At

Tablo= 4.24. K= 1.35 ve Oran2= .85 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2143	0.9696	0.8767	1.639	1.295	511.2	5.81	12.88
11	374.46	3.35	0.2034	0.9726	0.8740	1.646	1.301	487.1	6.27	12.64
12	354.64	3.54	0.1927	0.9753	0.8715	1.652	1.306	463.3	6.74	12.40
13	335.36	3.75	0.1823	0.9779	0.8692	1.658	1.312	439.9	7.21	12.16
14	316.62	3.97	0.1721	0.9802	0.8671	1.663	1.317	416.8	7.69	11.94
15	298.42	4.21	0.1623	0.9824	0.8652	1.667	1.321	394.1	8.18	11.72
16	280.76	4.47	0.1527	0.9844	0.8635	1.672	1.325	372.0	8.68	11.51
17	263.63	4.76	0.1434	0.9862	0.8619	1.675	1.328	350.2	9.18	11.30
18	247.05	5.08	0.1344	0.9879	0.8604	1.679	1.332	329.0	9.69	11.10
19	231.00	5.44	0.1257	0.9894	0.8591	1.682	1.335	308.3	10.20	10.91
20	215.50	5.83	0.1173	0.9908	0.8579	1.684	1.337	288.2	10.73	10.73

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pe / Po2

Oran4 = Po2/Po1

Oran5 = As/At

Tablo= 4.25. K= 1.327 ve Oran2= .85 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2150	0.9699	0.8764	1.636	1.298	512.3	5.82	12.89
11	374.46	3.35	0.2039	0.9729	0.8737	1.642	1.303	488.1	6.28	12.65
12	354.64	3.54	0.1932	0.9756	0.8713	1.648	1.309	464.2	6.75	12.40
13	335.36	3.75	0.1828	0.9781	0.8690	1.654	1.314	440.7	7.22	12.17
14	316.62	3.97	0.1726	0.9805	0.8669	1.659	1.319	417.6	7.70	11.94
15	298.42	4.21	0.1627	0.9826	0.8650	1.663	1.323	394.9	8.19	11.72
16	280.76	4.47	0.1531	0.9846	0.8633	1.667	1.327	372.6	8.68	11.51
17	263.63	4.76	0.1438	0.9864	0.8617	1.671	1.331	350.8	9.18	11.31
18	247.05	5.08	0.1348	0.9880	0.8603	1.675	1.334	329.6	9.69	11.11
19	231.00	5.44	0.1261	0.9895	0.8590	1.677	1.337	308.9	10.21	10.92
20	215.50	5.83	0.1176	0.9909	0.8578	1.680	1.340	288.7	10.73	10.73

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pe/ Po2

Oran4 = Po2/Po1

Oran5 = As/ At

Tablo= 4.26. K= 1.4 ve Oran2= .9 için xs mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2013	0.9721	0.9258	1.513	1.185	467.8	5.37	12.44
11	374.46	3.35	0.1910	0.9749	0.9232	1.520	1.190	445.7	5.86	12.22
12	354.64	3.54	0.1810	0.9774	0.9208	1.527	1.195	423.8	6.35	12.00
13	335.36	3.75	0.1712	0.9798	0.9186	1.534	1.200	402.4	6.85	11.80
14	316.62	3.97	0.1617	0.9819	0.9166	1.540	1.204	381.3	7.35	11.59
15	298.42	4.21	0.1524	0.9839	0.9147	1.546	1.208	360.6	7.86	11.40
16	280.76	4.47	0.1434	0.9857	0.9130	1.550	1.212	340.2	8.38	11.21
17	263.63	4.76	0.1347	0.9874	0.9115	1.555	1.215	320.4	8.90	11.02
18	247.05	5.08	0.1263	0.9889	0.9101	1.559	1.218	300.9	9.43	10.84
19	231.00	5.44	0.1181	0.9903	0.9088	1.563	1.221	282.0	9.97	10.67
20	215.50	5.83	0.1102	0.9915	0.9077	1.566	1.223	263.6	10.51	10.51

Oran1 = Ae/At

Oran3 = Pe/ Po2

Oran4 = Po2/ Po1

Oran5= As /At

Tablo= 4.27. $K= 1.35$ ve $Oran2= .9$ için x_s mesafesi

R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	x_s	x_{sg}
10	394.81	3.18	0.2025	0.9728	0.9252	1.508	1.188	469.2	5.38	12.46
11	374.46	3.35	0.1922	0.9755	0.9226	1.516	1.194	447.2	5.87	12.24
12	354.64	3.54	0.1820	0.9779	0.9203	1.523	1.199	425.3	6.36	12.02
13	335.36	3.75	0.1722	0.9802	0.9181	1.530	1.204	403.8	6.86	11.81
14	316.62	3.97	0.1626	0.9823	0.9162	1.535	1.208	382.5	7.36	11.60
15	298.42	4.21	0.1533	0.9843	0.9144	1.540	1.212	361.7	7.87	11.41
16	280.76	4.47	0.1443	0.9861	0.9127	1.545	1.216	341.3	8.39	11.22
17	263.63	4.76	0.1355	0.9877	0.9112	1.549	1.219	321.3	8.91	11.03
18	247.05	5.08	0.1270	0.9892	0.9098	1.553	1.222	301.9	9.44	10.85
19	231.00	5.44	0.1188	0.9905	0.9086	1.556	1.225	282.9	9.97	10.68
20	215.50	5.83	0.1108	0.9918	0.9075	1.560	1.227	264.5	10.51	10.51

Oran1 = Ae/At

Oran3 = $Pe/Pb2$

Oran4 = $Pb2/Pb1$

Oran5 = As/At

Tablo= 4.28. K= 1.327 ve Oran2= .9 için xs mesafesi

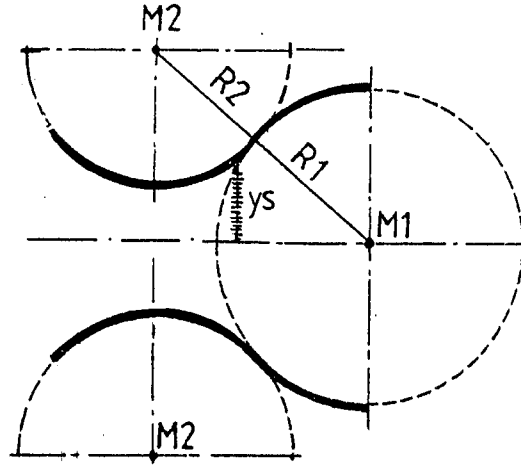
R2	At	ORAN1	Me	ORAN3	ORAN4	M1	ORAN5	As	xs	xsg
10	394.81	3.18	0.2031	0.9731	0.9249	1.507	1.191	470.1	5.39	12.46
11	374.46	3.35	0.1927	0.9757	0.9224	1.514	1.196	447.9	5.88	12.24
12	354.64	3.54	0.1825	0.9782	0.9201	1.521	1.201	425.9	6.37	12.03
13	335.36	3.75	0.1727	0.9805	0.9179	1.527	1.206	404.3	6.87	11.82
14	316.62	3.97	0.1631	0.9826	0.9160	1.532	1.210	383.1	7.37	11.61
15	298.42	4.21	0.1537	0.9845	0.9142	1.538	1.214	362.2	7.88	11.41
16	280.76	4.47	0.1447	0.9862	0.9126	1.542	1.217	341.8	8.39	11.22
17	263.63	4.76	0.1359	0.9878	0.9111	1.546	1.221	321.8	8.91	11.04
18	247.05	5.08	0.1273	0.9893	0.9097	1.550	1.224	302.3	9.44	10.86
19	231.00	5.44	0.1191	0.9906	0.9085	1.553	1.226	283.3	9.98	10.68
20	215.50	5.83	0.1111	0.9919	0.9074	1.557	1.229	264.8	10.52	10.52

Oran1 = Ae / At

Oran3 = Pe / Po2

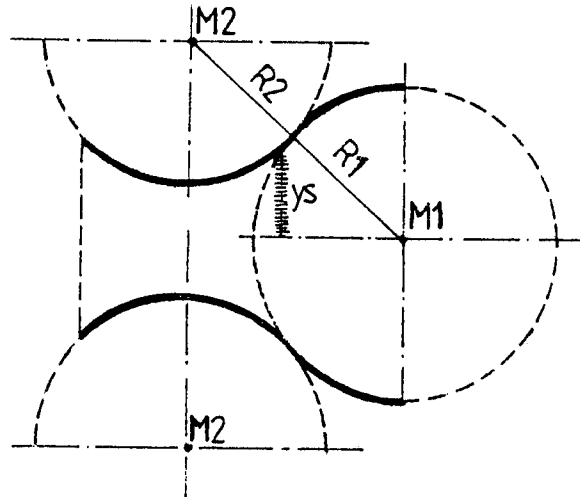
Oran4 = Po2 / Po1

Oran5 = As / At



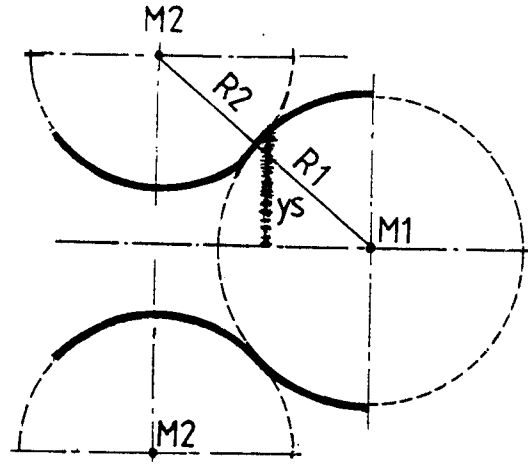
$k=1.4$ ve $R_2=18$ cm.

Sekil 4.2. Oran2=.9 için şok yerinin şematik gösterimi.



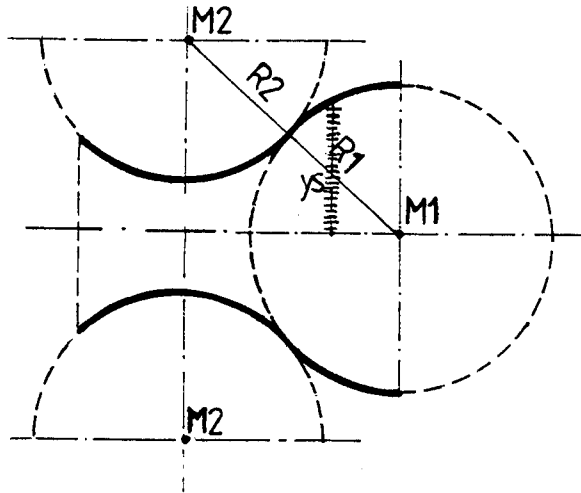
$k=1.4$ ve $R_2=18$ cm.

Sekil 4.3. Oran2=.7 için şok yerinin şematik gösterimi.



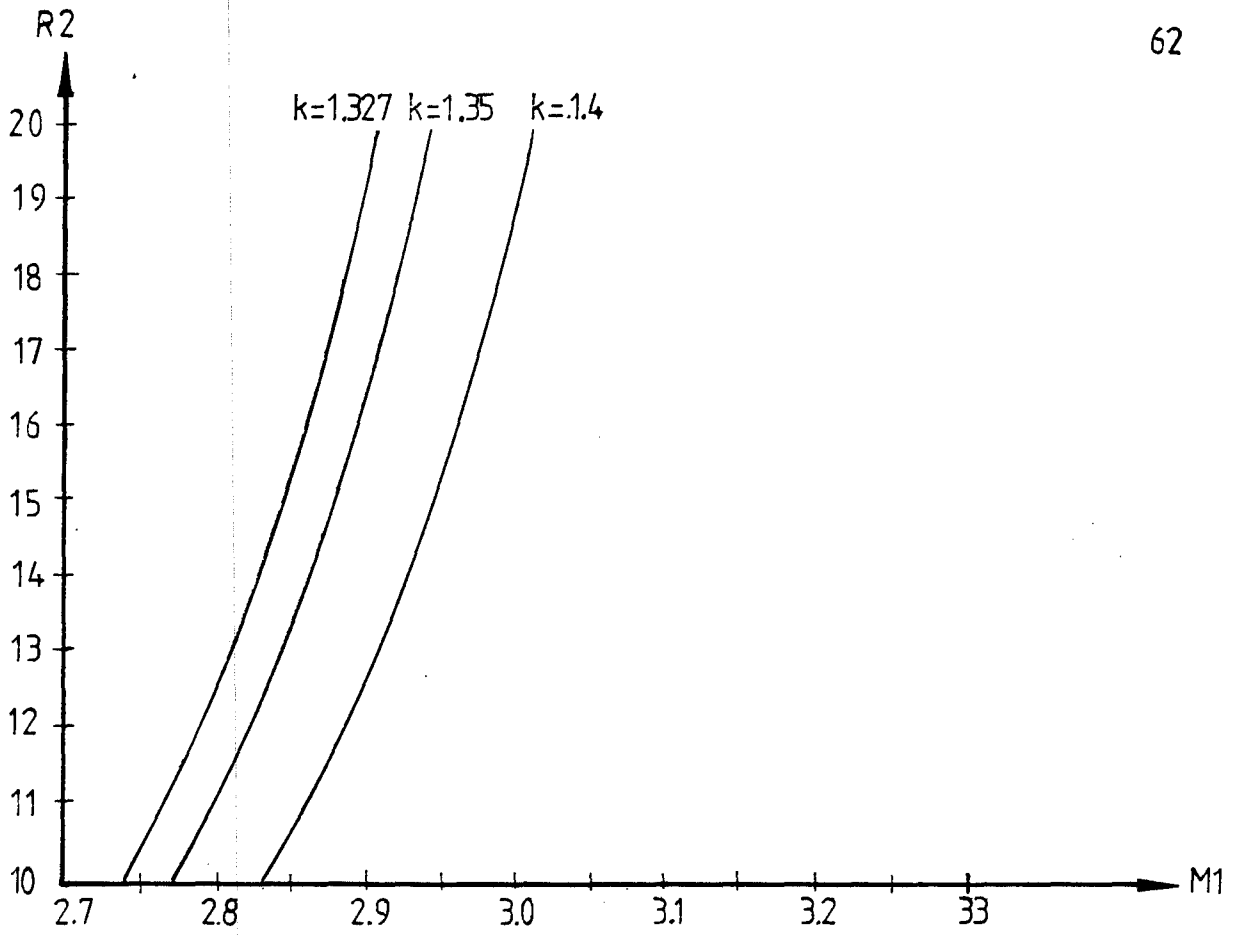
$k=1.4$ ve $R_2 = 18$ cm.

Şekil 4.4. Oran2=.5 için şok yerinin şematik gösterimi.

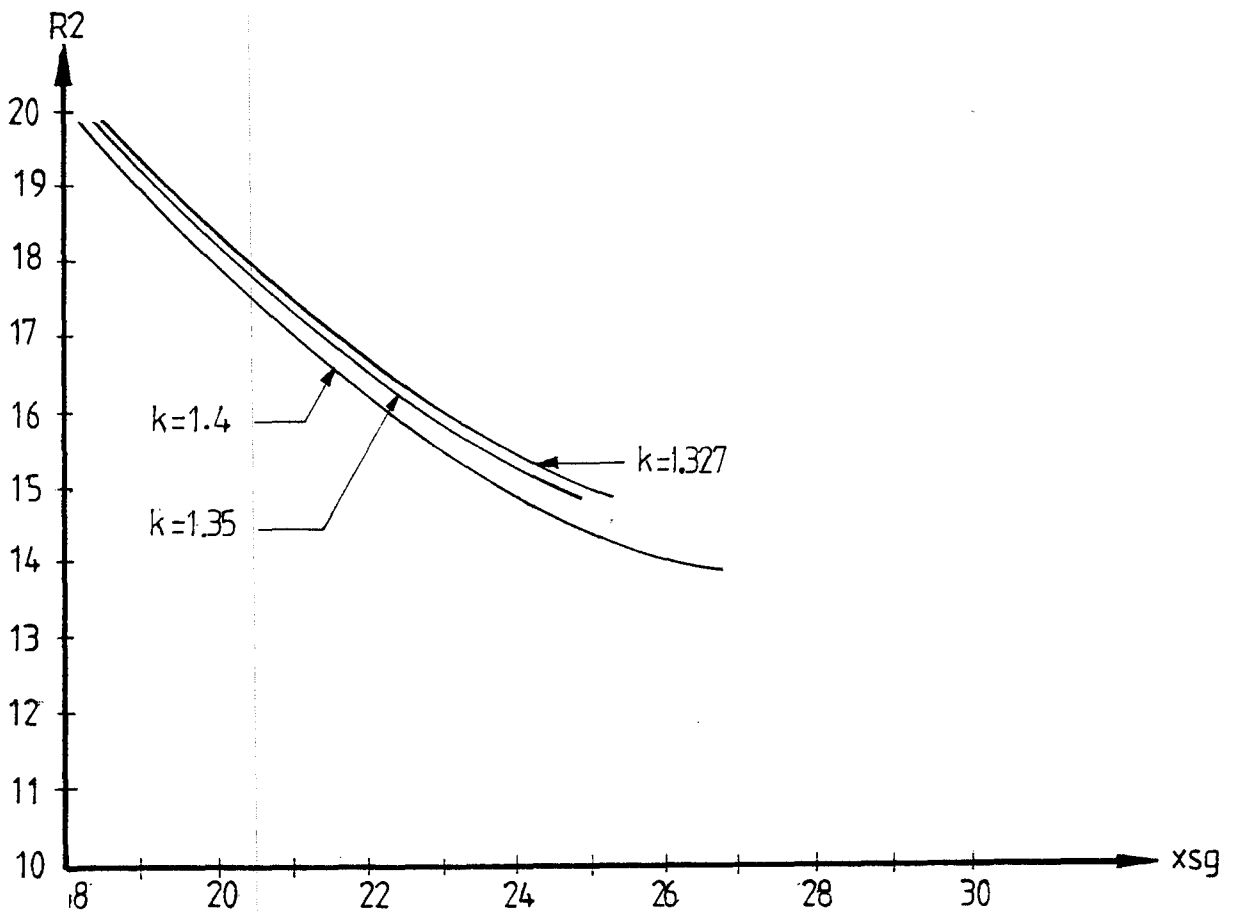


$k=1.4$ ve $R_2 = 18$ cm.

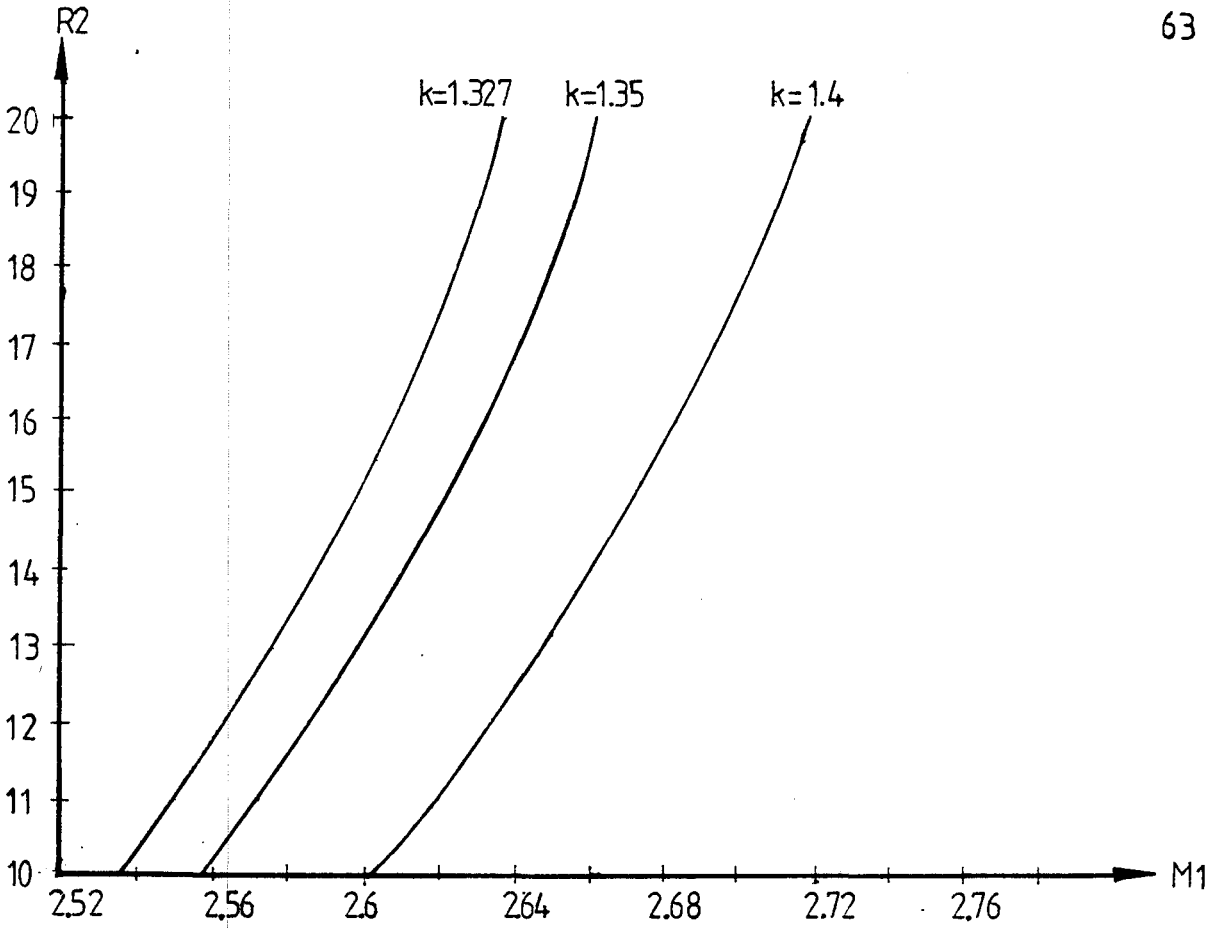
Şekil 4.5. Oran2=.3 için şok yerinin şematik gösterimi.



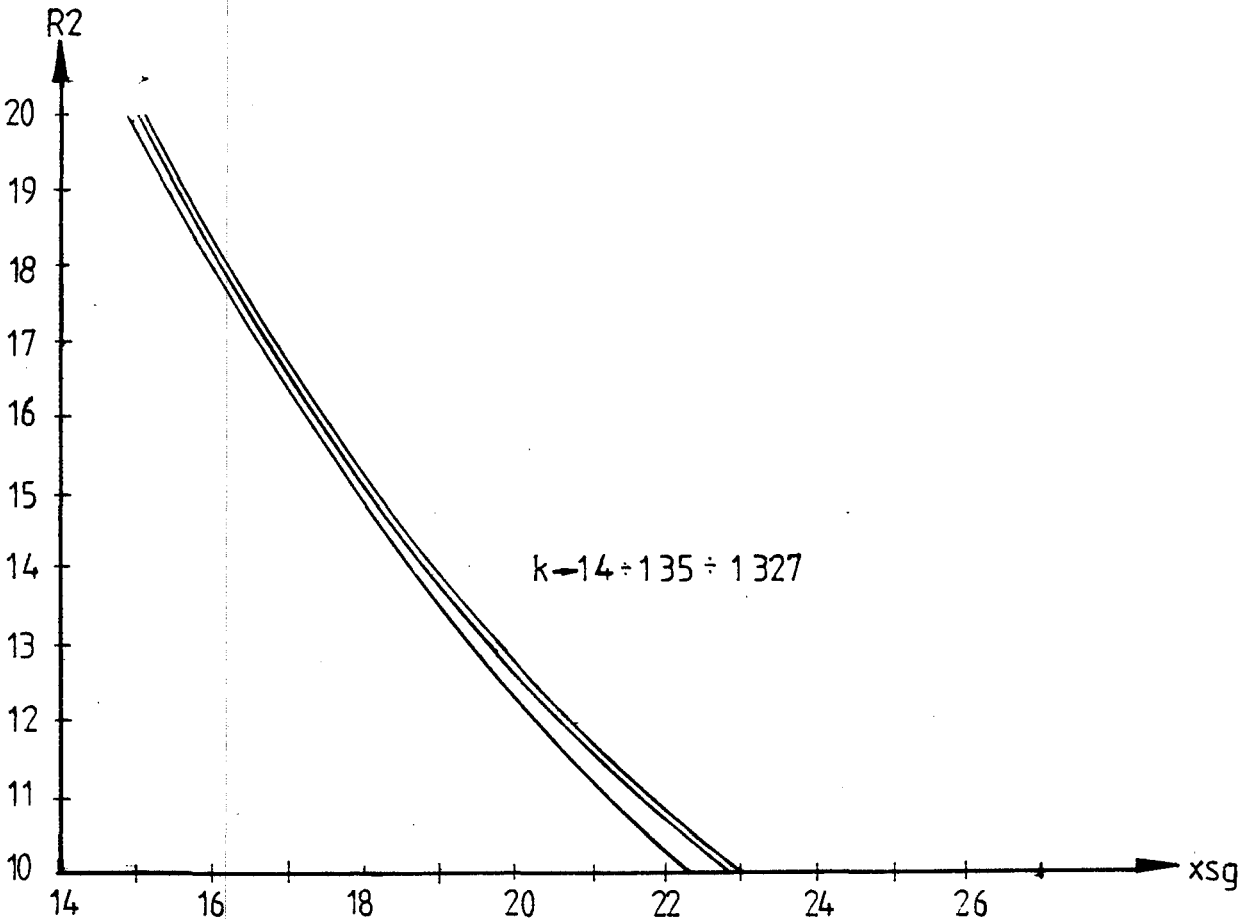
Şekil 4.6. Oran2=.3 için yarıçapa bağlı M1 değişimi.
Pb/Pb1



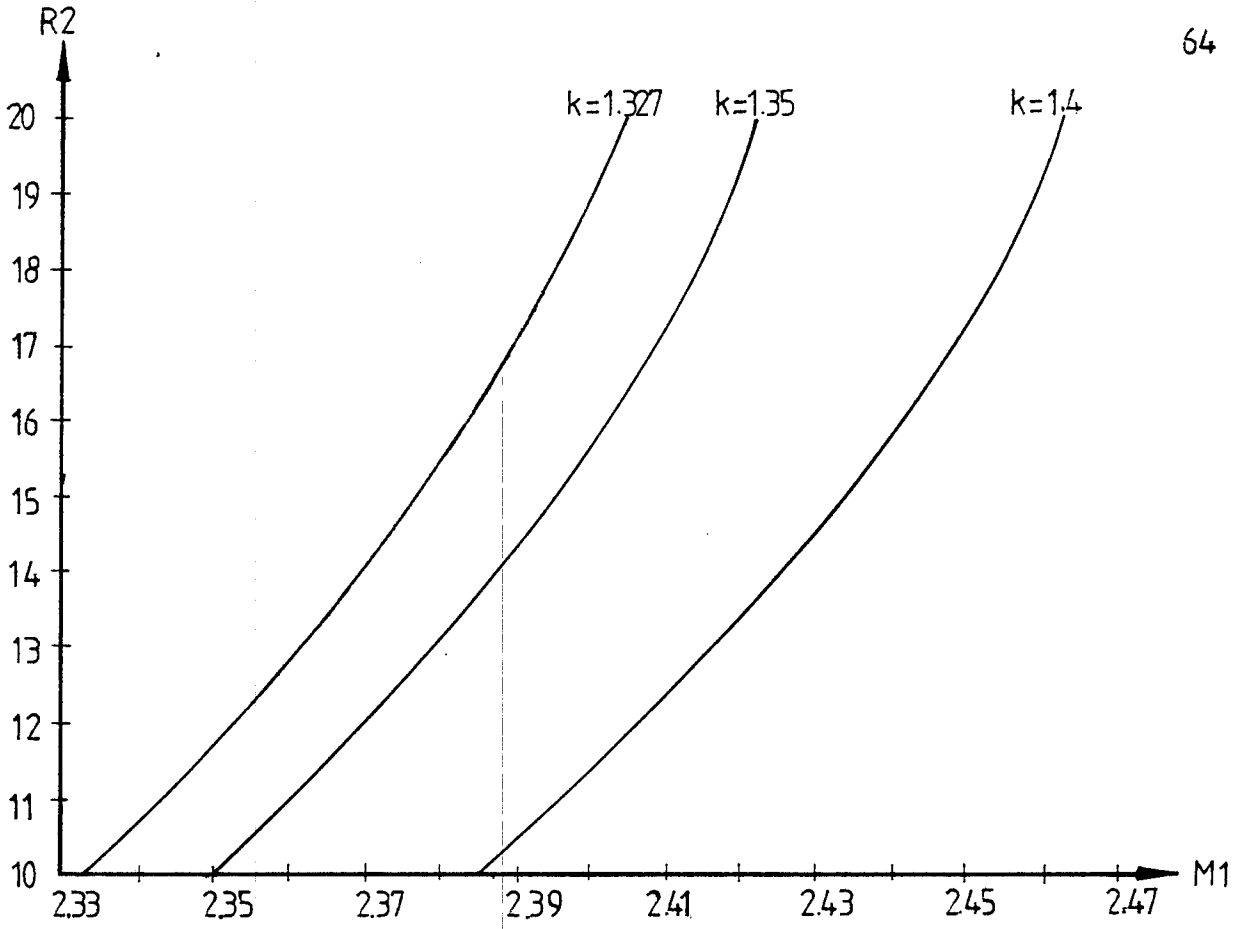
Şekil 4.7. Oran2=.3 için yarıçapa bağlı xsg değişimi.
Pb/Pb1



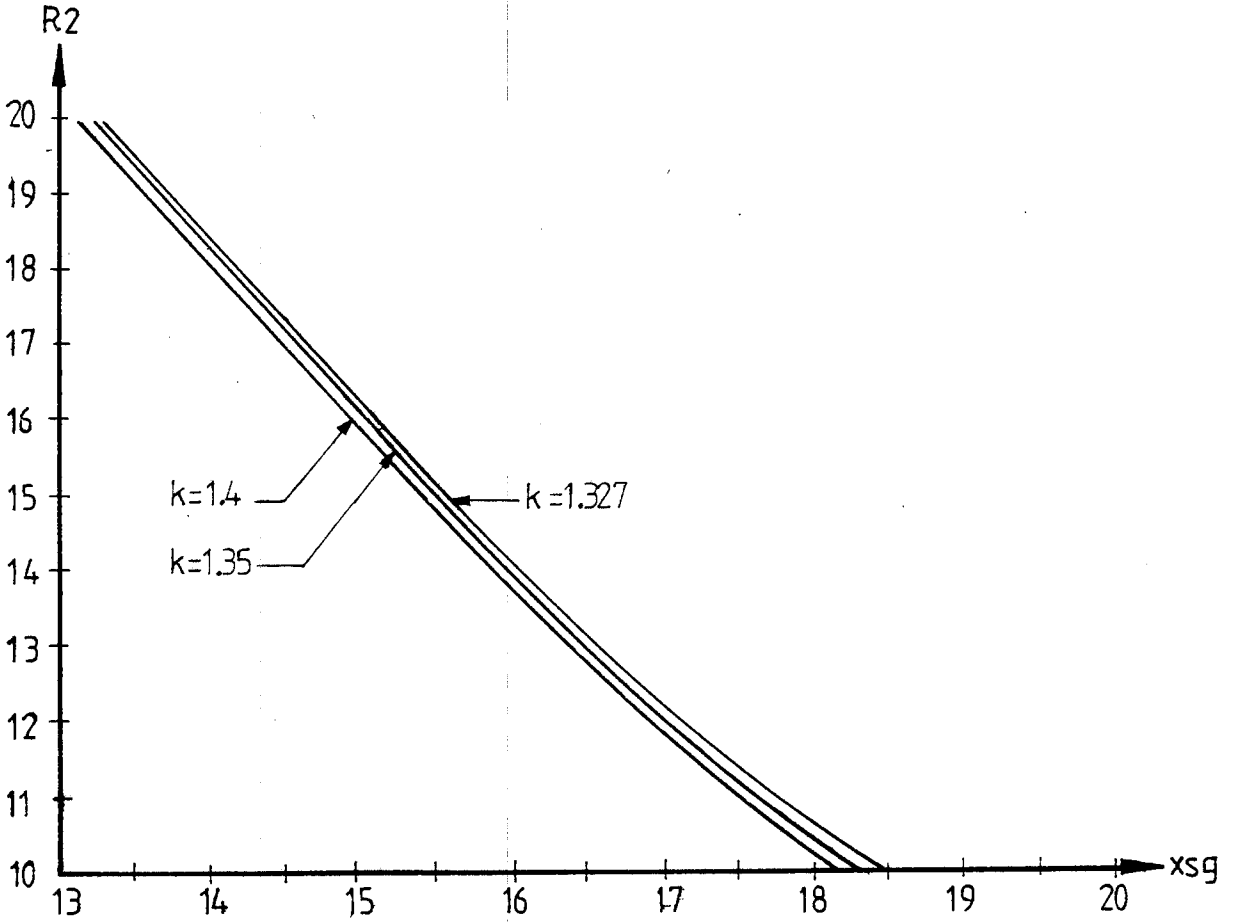
Şekil 4.8. Oran2=.4 için yarıçapa bağlı M1 değişimi.
Pb/Pb1



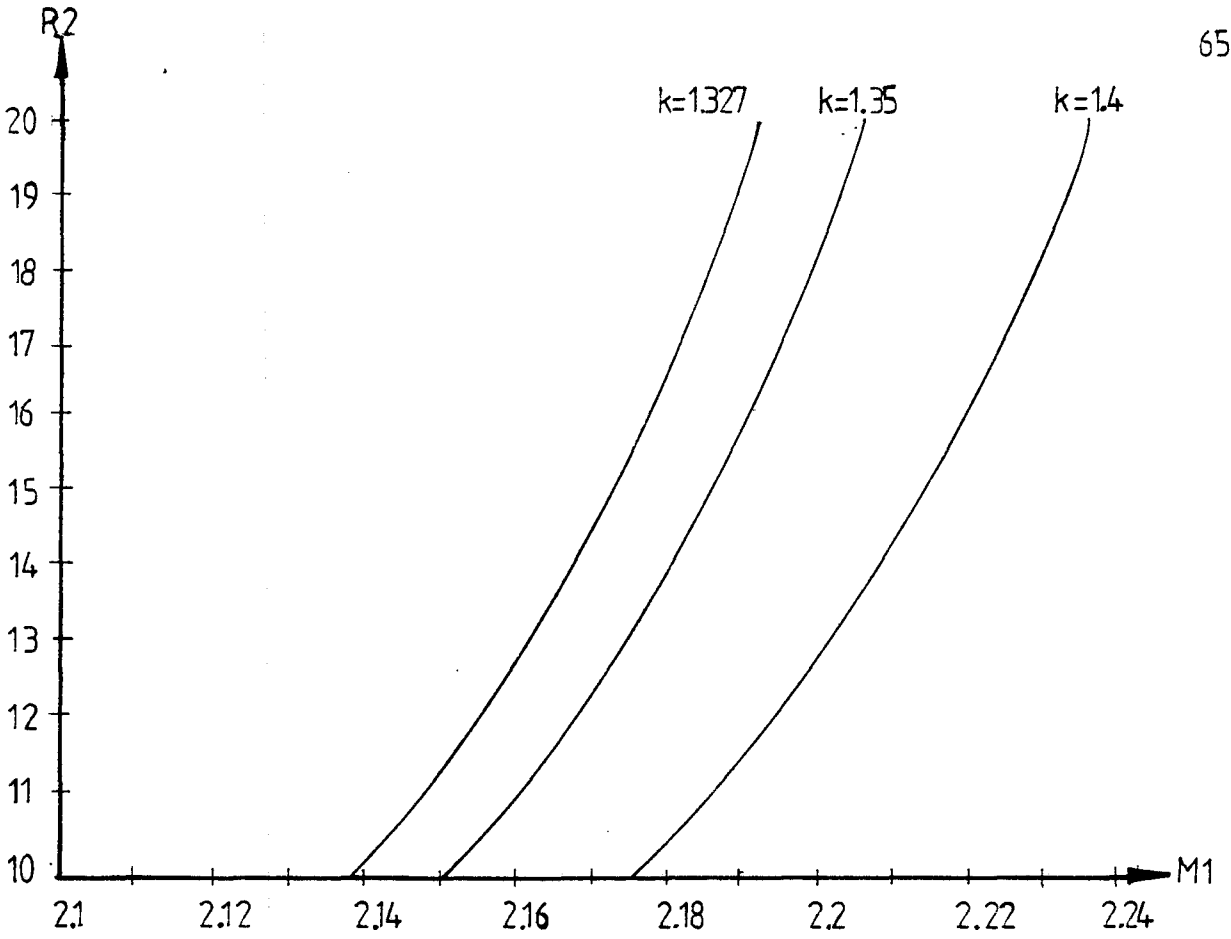
Şekil 4.9. Oran2=.4 için yarıçapa bağlı xsg değişimi.
Pb/Pb1



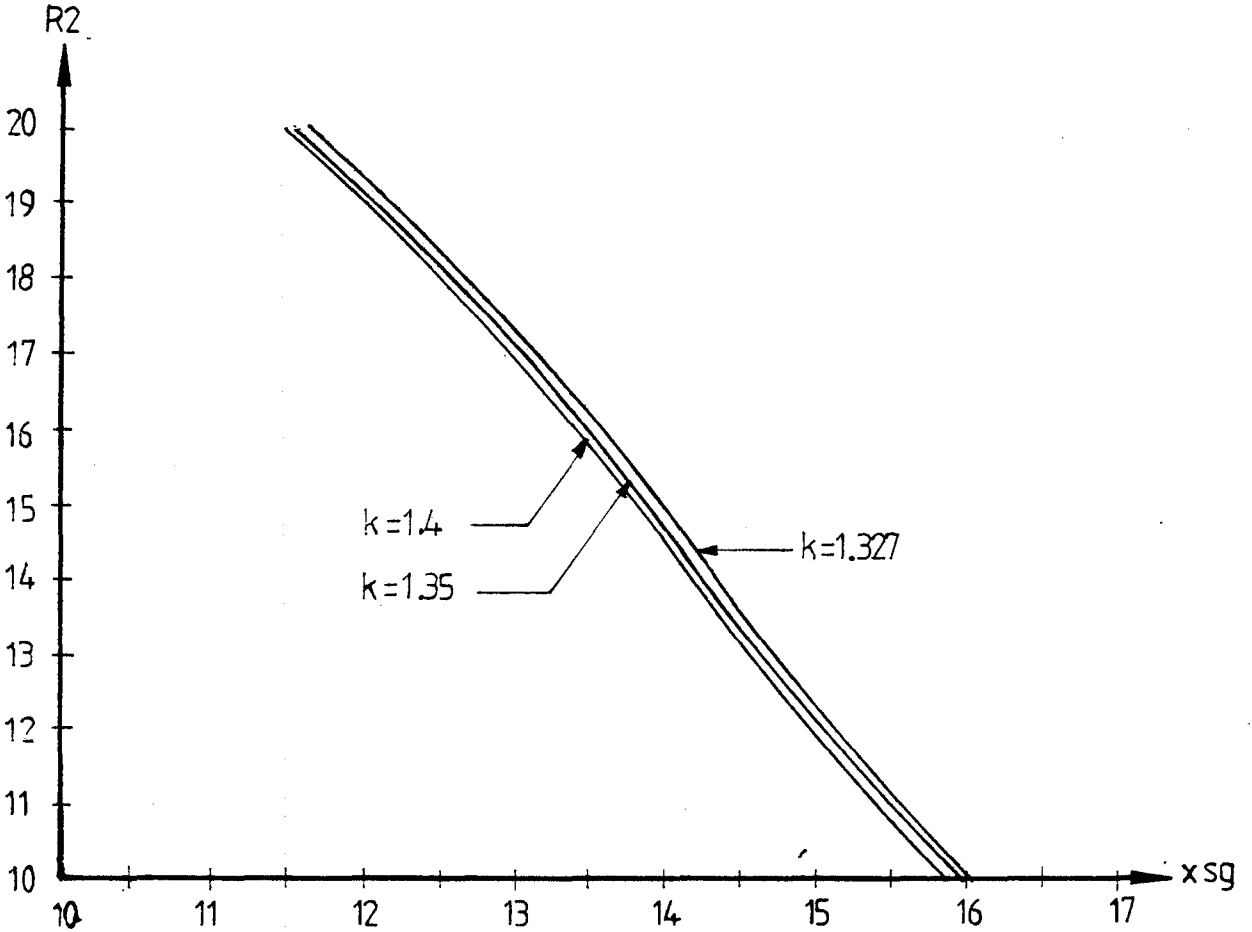
Şekil 4.10. Oran2=.5 için yarıçapa bağlı M1 değişimi.
Pb/Po1



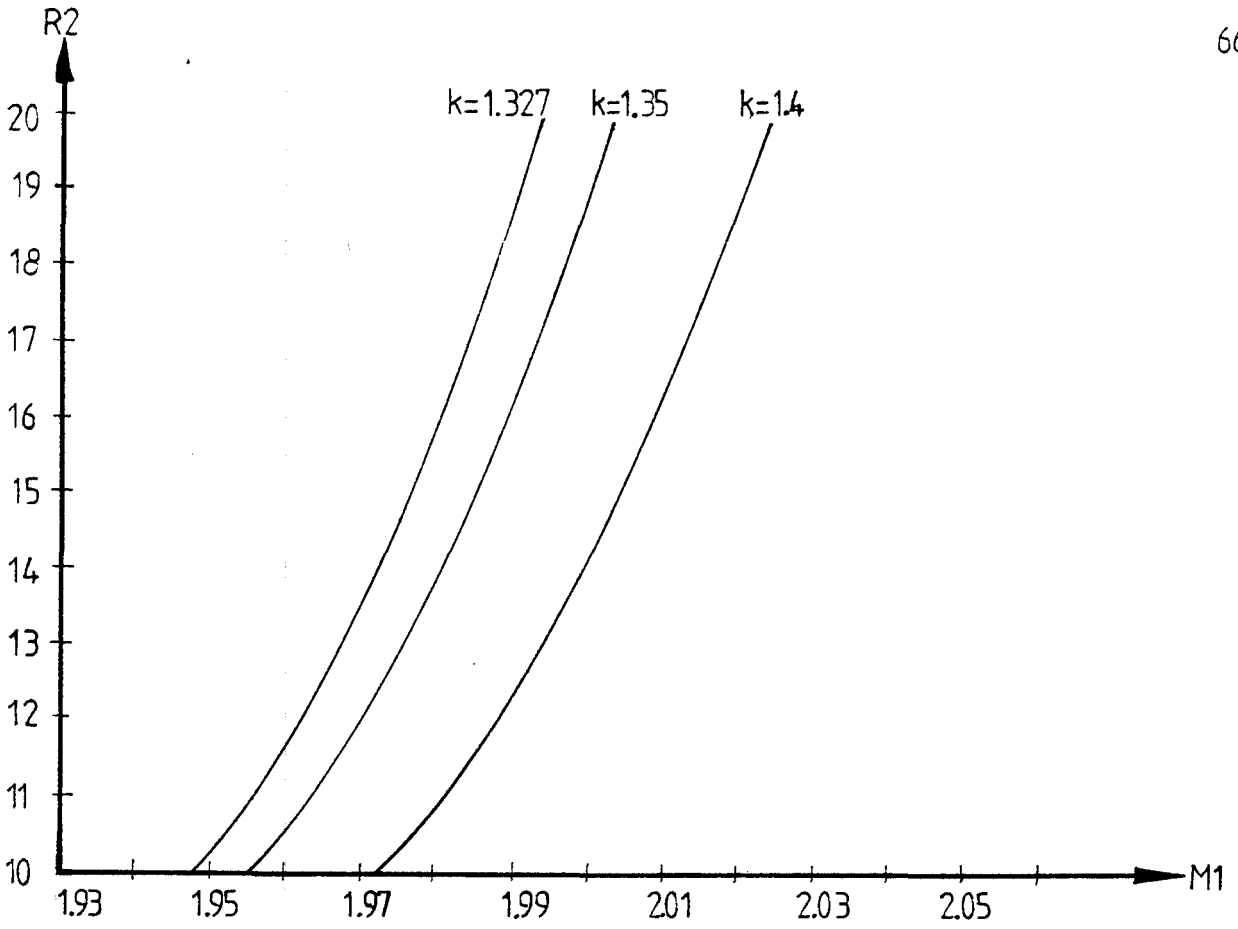
Şekil 4.11. Oran2=.5 için yarıçapa bağlı xsg değişimi.
Pb/Po1



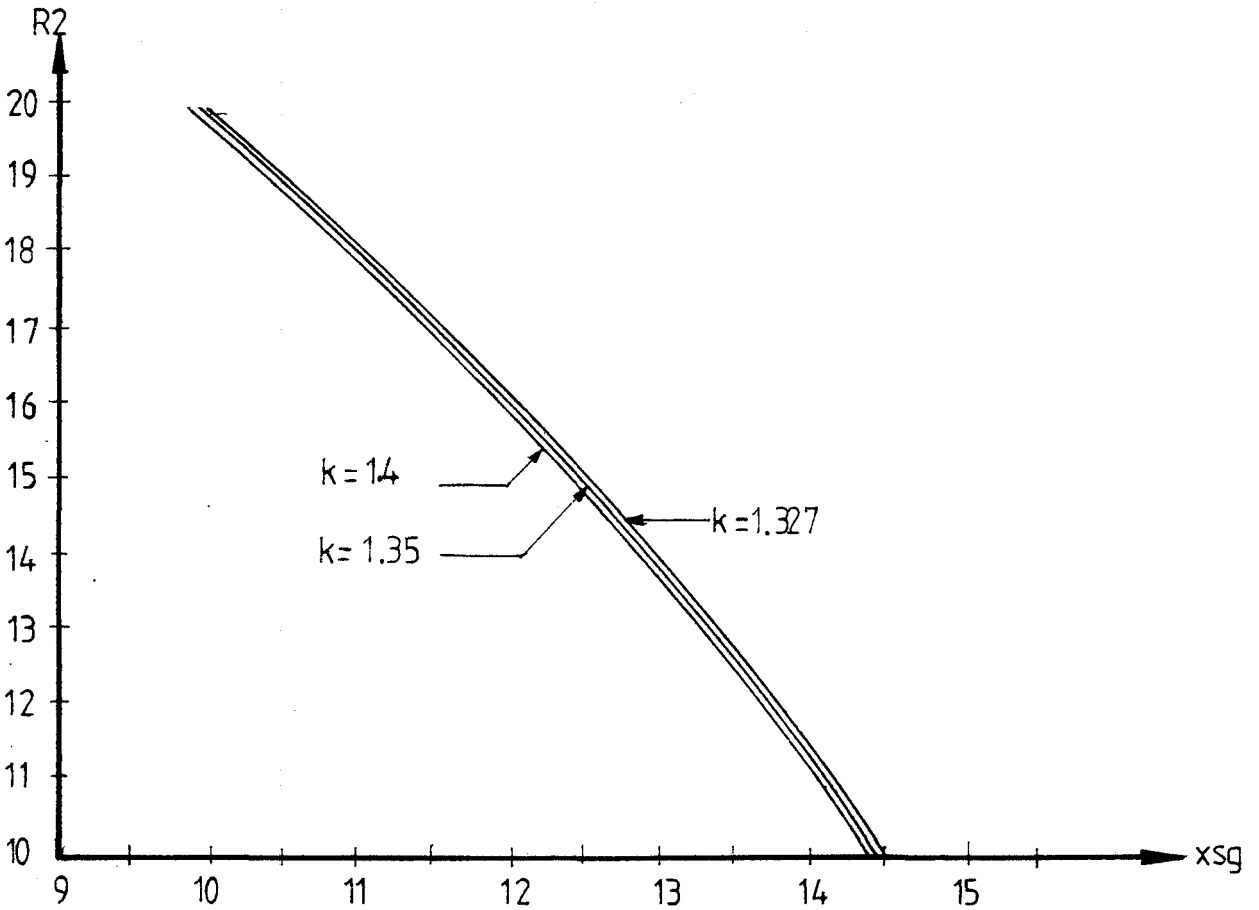
Şekil 4.12. Oran₂=.6 için yarıçapa bağlı M_1 değişimi.
 P_b/P_{o1}



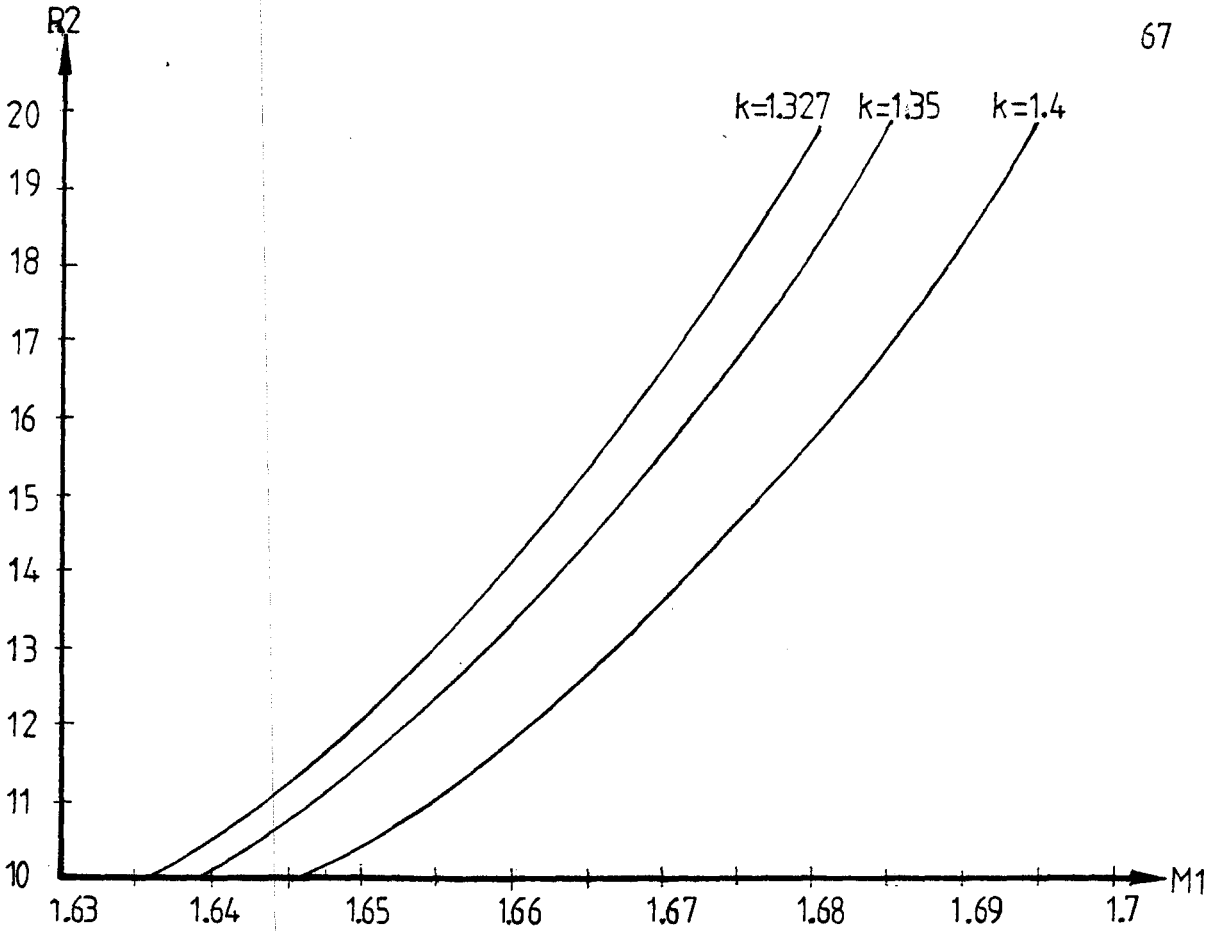
Şekil 4.13. Oran₂=.6 için yarıçapa bağlı x_{sg} değişimi.
 P_b/P_{o1}



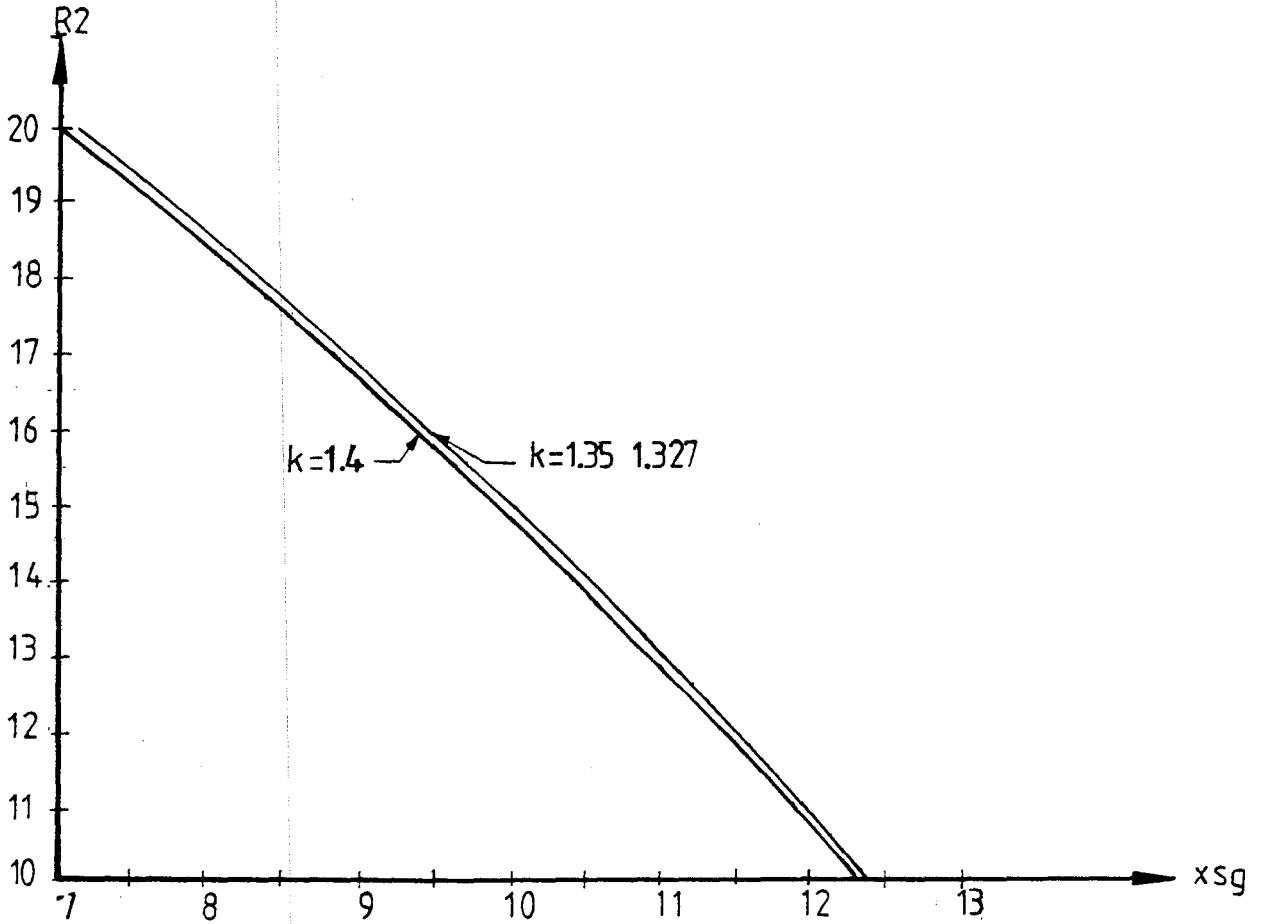
Şekil 4.14. Oran2=.7 için yarıçapa bağlı M_1 değişimi.
 P_b/P_{o1}



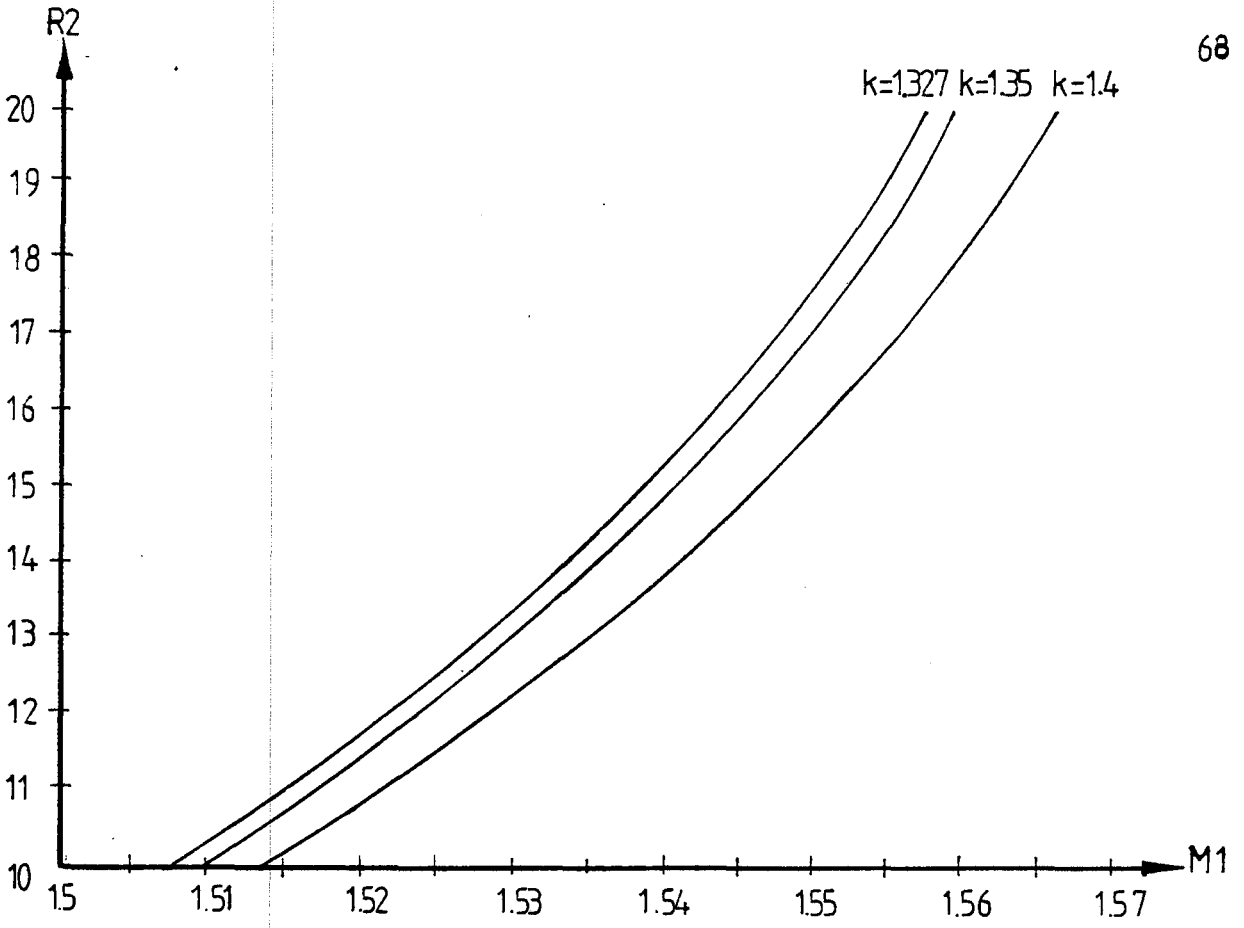
Şekil 4.15. Oran2=.7 için yarıçapa bağlı x_{sg} değişimi.
 P_b/P_{o1}



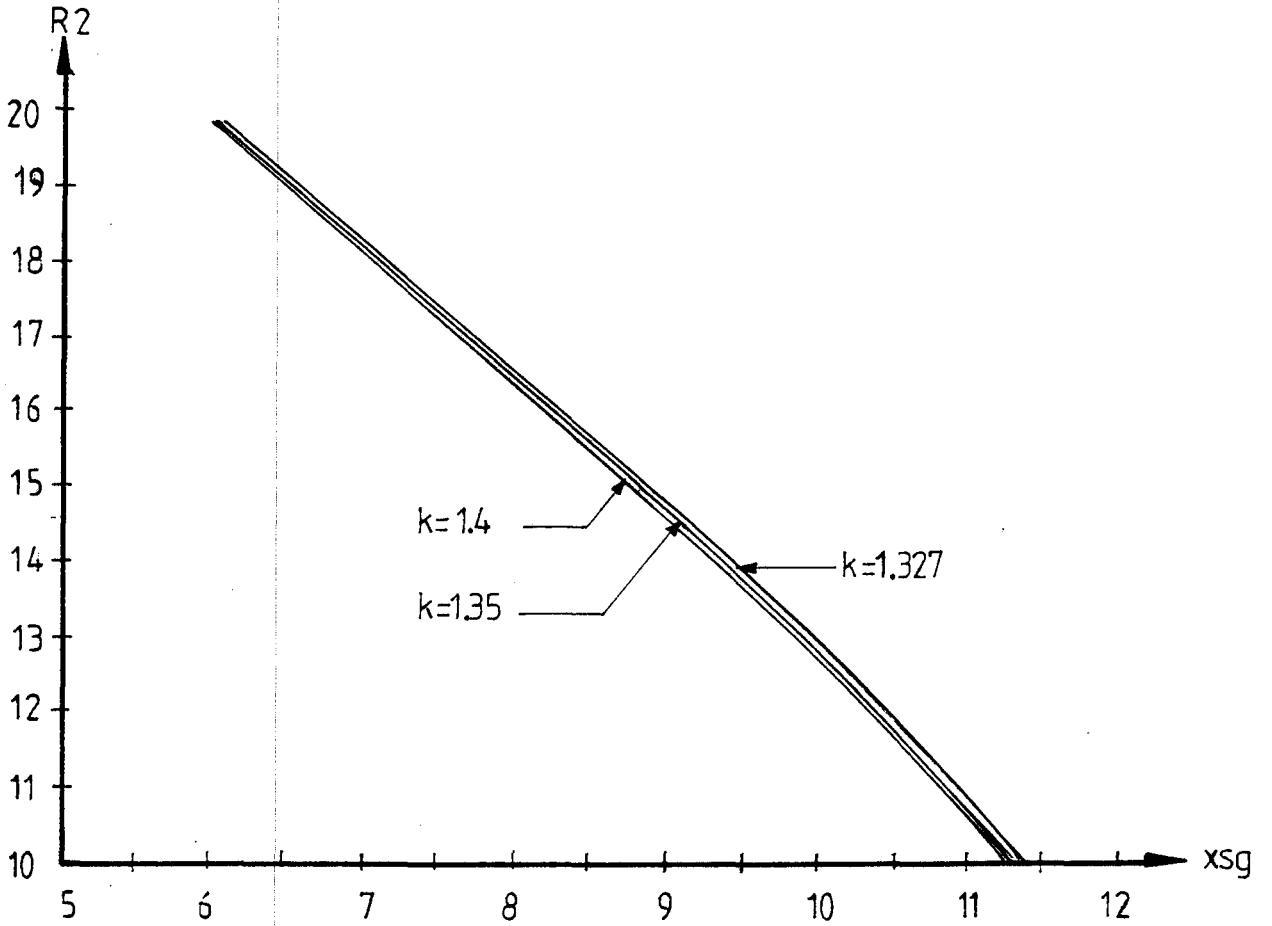
Şekil 4.16. Oran₂=.85 için yarıçapa bağlı M_1 değişimi.
 P_b/P_{o1}



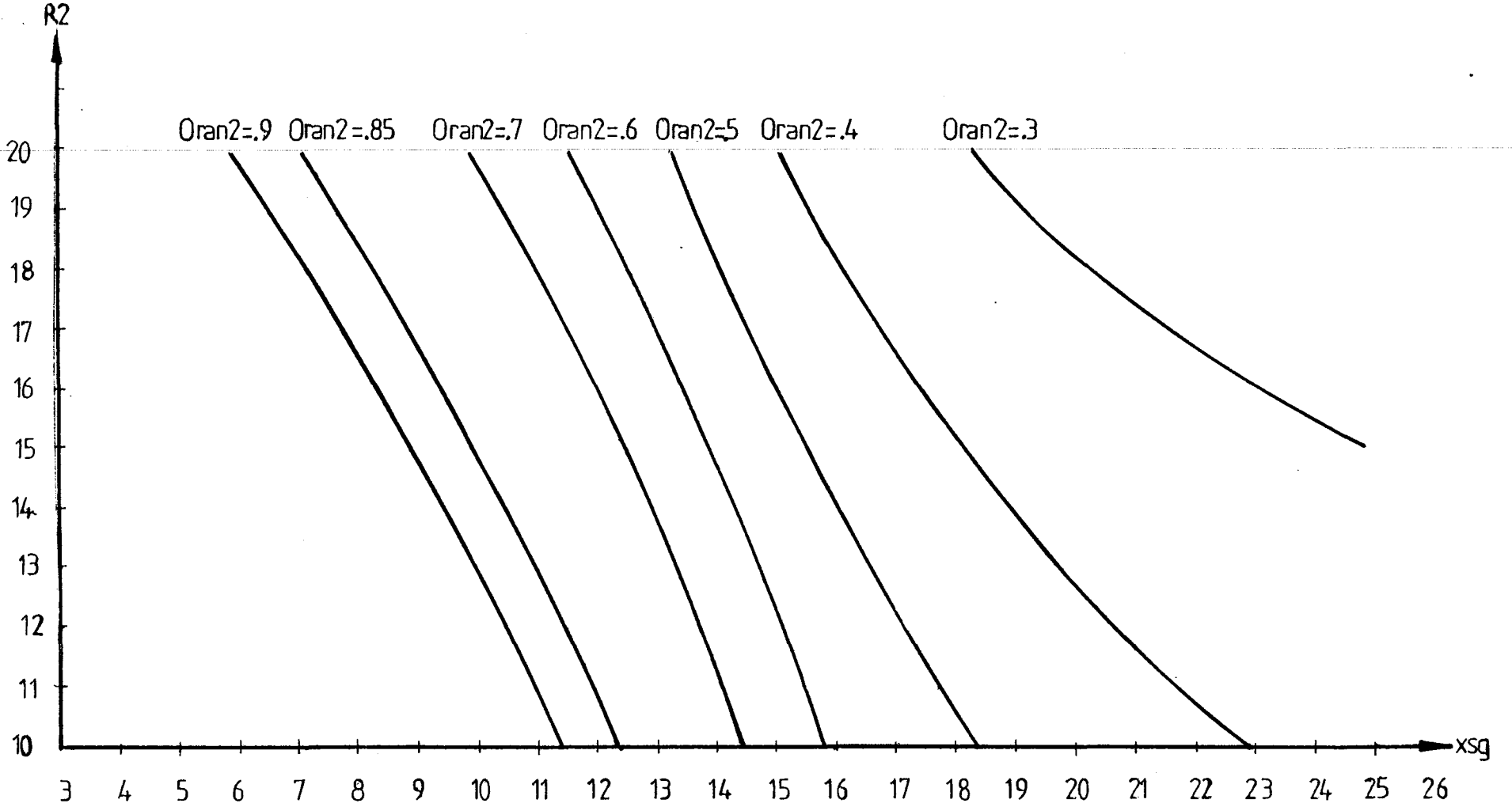
Şekil 4.17. Oran₂=.85 için yarıçapa bağlı x_{sg} değişimi.
 P_b/P_{o1}



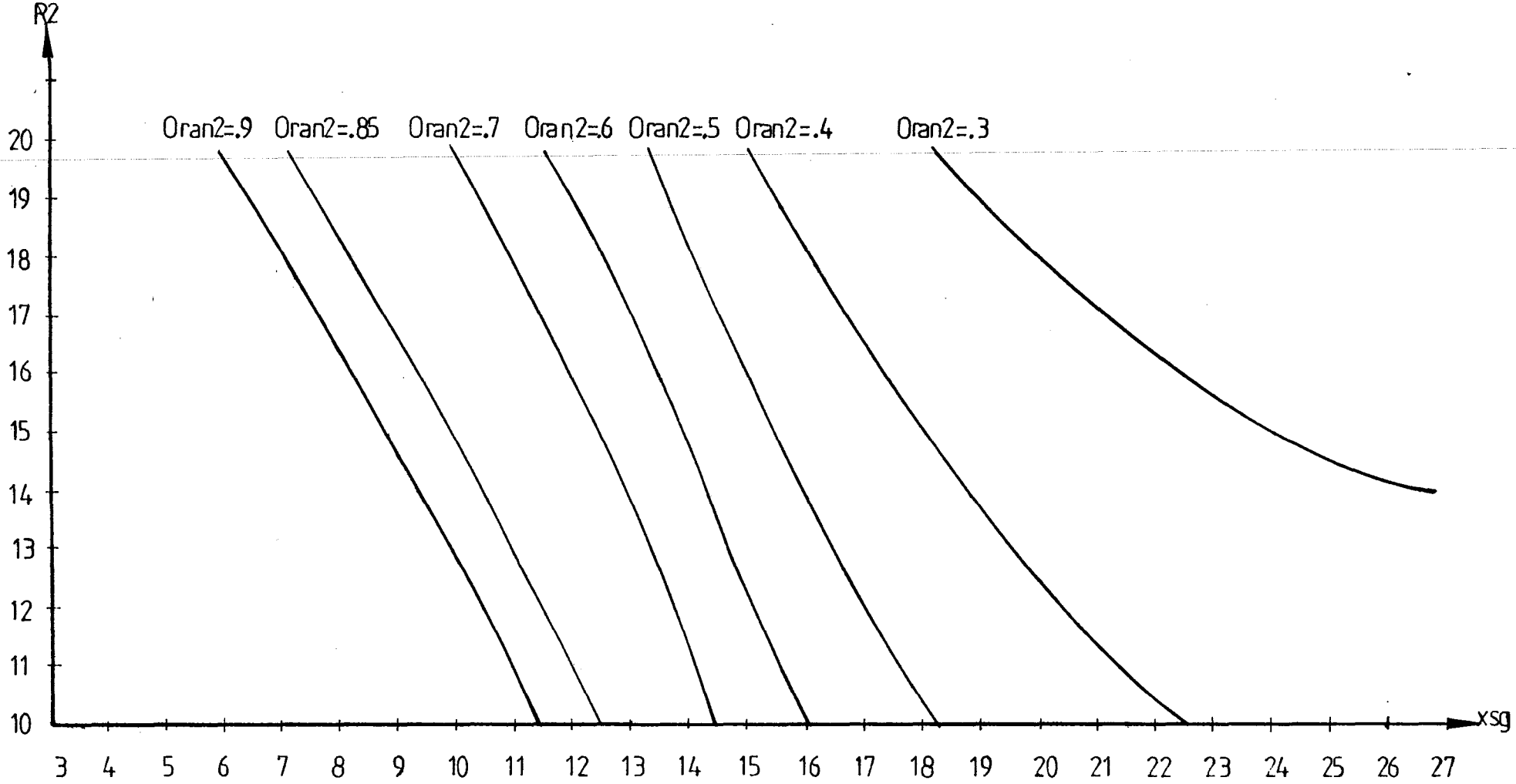
Şekil 4.18. Oran2=.9 için yarıçapa bağlı M_1 değişimi.
 P_b/P_{b1}



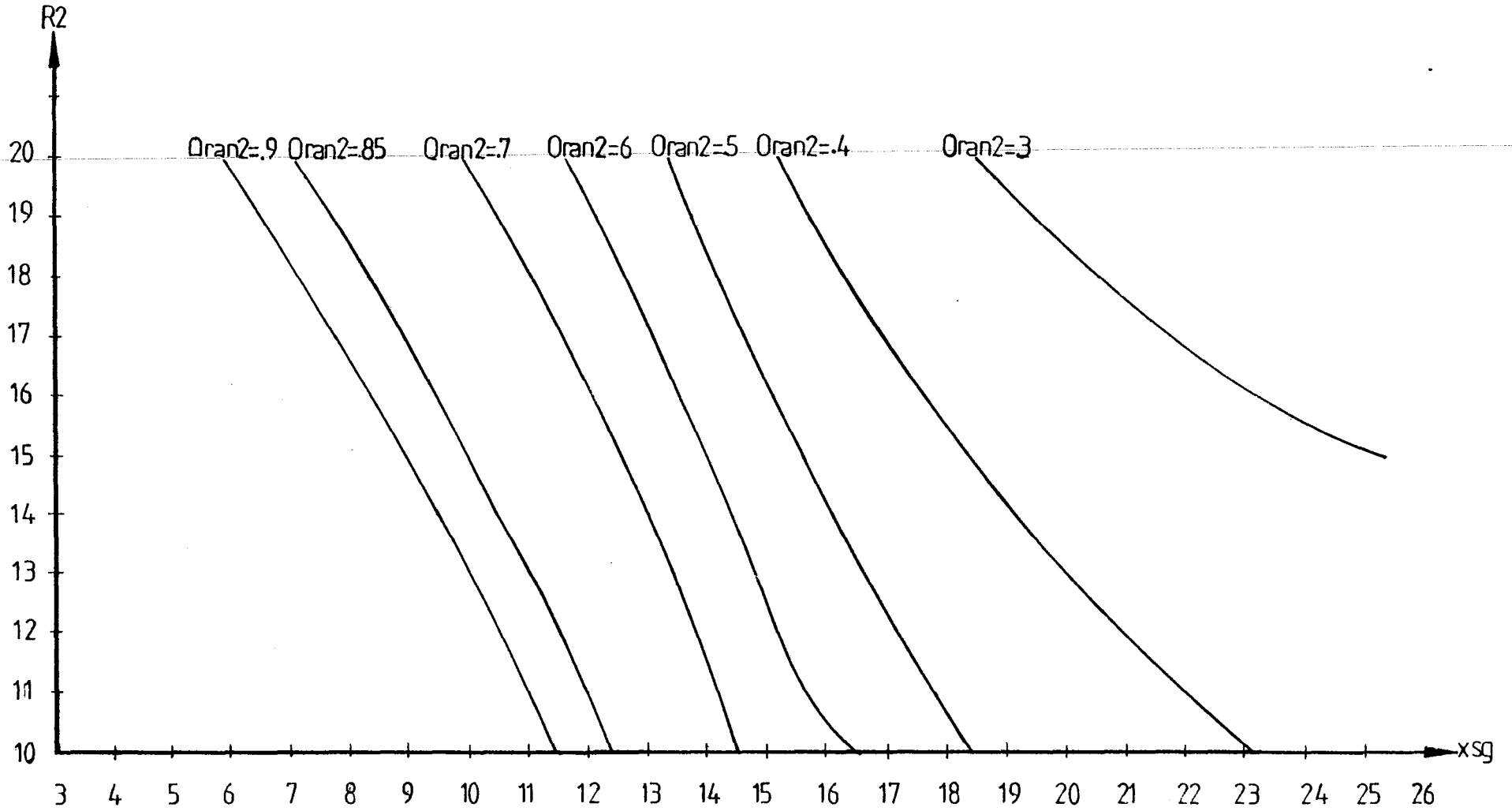
Şekil 4.19. Oran2=.9 için yarıçapa bağlı x_{sg} değişimi.
 P_b/P_{b1}



Sekil 4.20. $k=1.4$ için $Oran_2$ değişiminin şok yerine etkisi.
(P_b/P_{b1})



Sekil 4.21. $k=1.35$ için Oran2 değişiminin şok yerine etkisi.
(P_b/P_{b1})



Şekil 4.22. $k=1.327$ için $Oran_2$ değişiminin şok yerine etkisi.
(P_b/P_{o1})

Tablo 4.29. $k = 1.4$ için kritik basınç oranları

R2	At	ORAN1	Me2	Me1	rpc1	rpc3	ORAN6	rpc2
10	394.8	3.18	0.186	2.699	0.9762	0.0430	8.333	0.3584
11	374.5	3.35	0.176	2.758	0.9787	0.0393	8.706	0.3422
12	354.6	3.54	0.166	2.811	0.9809	0.0363	9.049	0.3281
13	335.4	3.75	0.157	2.869	0.9829	0.0332	9.437	0.3130
14	316.6	3.97	0.148	2.934	0.9849	0.0301	9.874	0.2970
15	298.4	4.21	0.139	2.992	0.9866	0.0275	10.279	0.2831
16	280.8	4.47	0.130	3.057	0.9882	0.0250	10.734	0.2685
17	263.6	4.76	0.123	3.124	0.9895	0.0226	11.219	0.2539
18	247.0	5.08	0.115	3.191	0.9908	0.0205	11.716	0.2400
19	231.0	5.44	0.107	3.262	0.9920	0.0185	12.245	0.2263
20	215.5	5.83	0.100	3.338	0.9930	0.0165	12.832	0.2123

Oran1 = A_e / A_t

Oran6 = P_2 / P_1

Tablo 4.3 . k = 1.35 için kritik basınç oranları

R2	At	ORAN1	Me2	Me1	rpc1	rpc3	ORAN6	rpc2
10	394.8	3.18	0.187	2.635	0.9768	0.0466	7.827	0.3644
11	374.5	3.35	0.177	2.688	0.9792	0.0428	8.149	0.3486
12	354.6	3.54	0.167	2.740	0.9814	0.0393	8.478	0.3333
13	335.4	3.75	0.158	2.793	0.9834	0.0361	8.814	0.3185
14	316.6	3.97	0.148	2.846	0.9853	0.0332	9.155	0.3042
15	298.4	4.21	0.140	2.904	0.9869	0.0303	9.542	0.2889
16	280.8	4.47	0.131	2.963	0.9885	0.0276	9.937	0.2743
17	263.6	4.76	0.123	3.024	0.9898	0.0251	10.360	0.2596
18	247.0	5.08	0.115	3.086	0.9911	0.0228	10.792	0.2456
19	231.0	5.44	0.108	3.153	0.9922	0.0205	11.275	0.2310
20	215.5	5.83	0.100	3.221	0.9932	0.0185	11.769	0.2172

Oran1 = Ae/ At

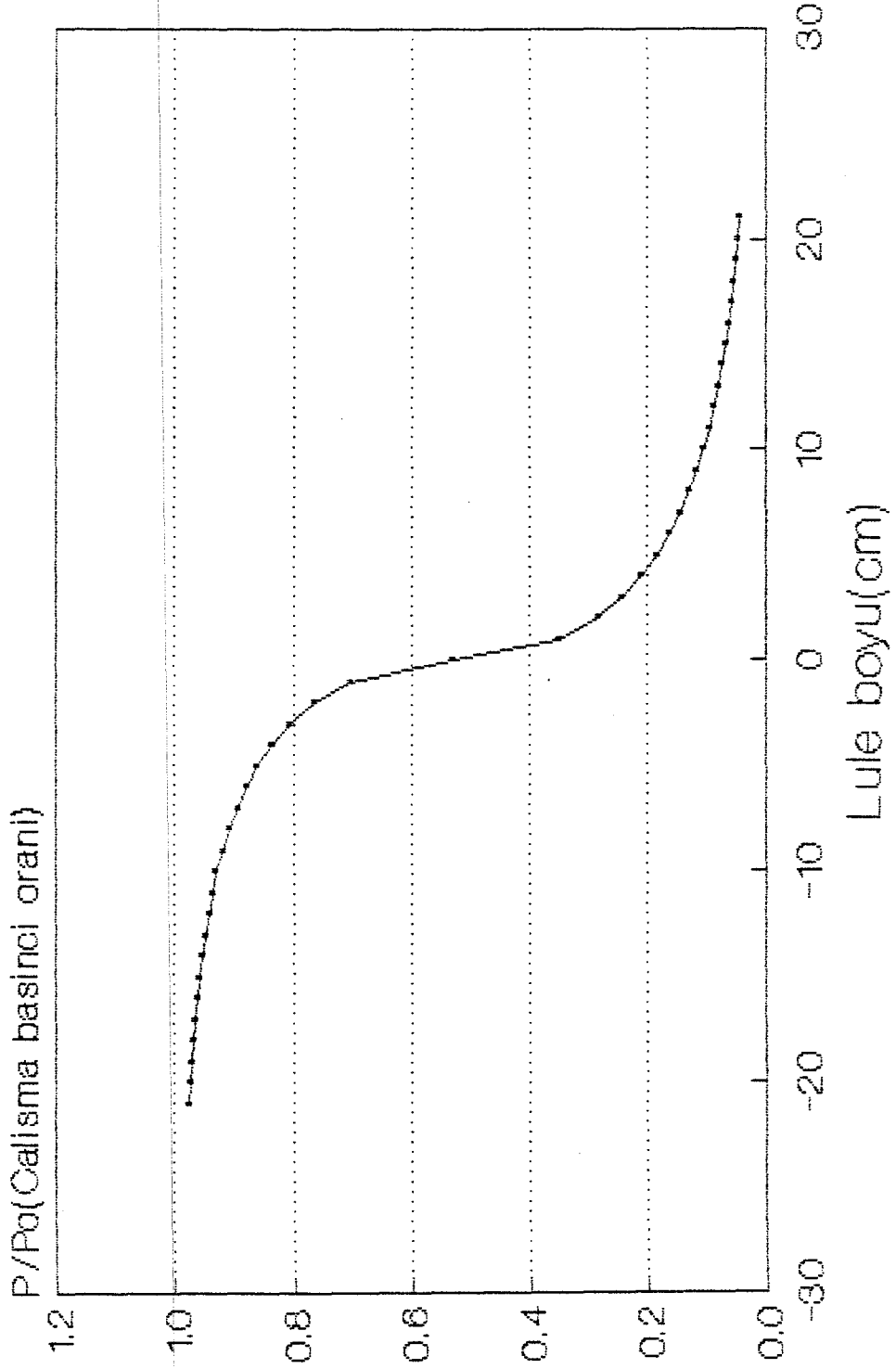
Oran6 = P2/ P1

Tablo 4.31. $k = 1.327$ için kritik basınç oranları

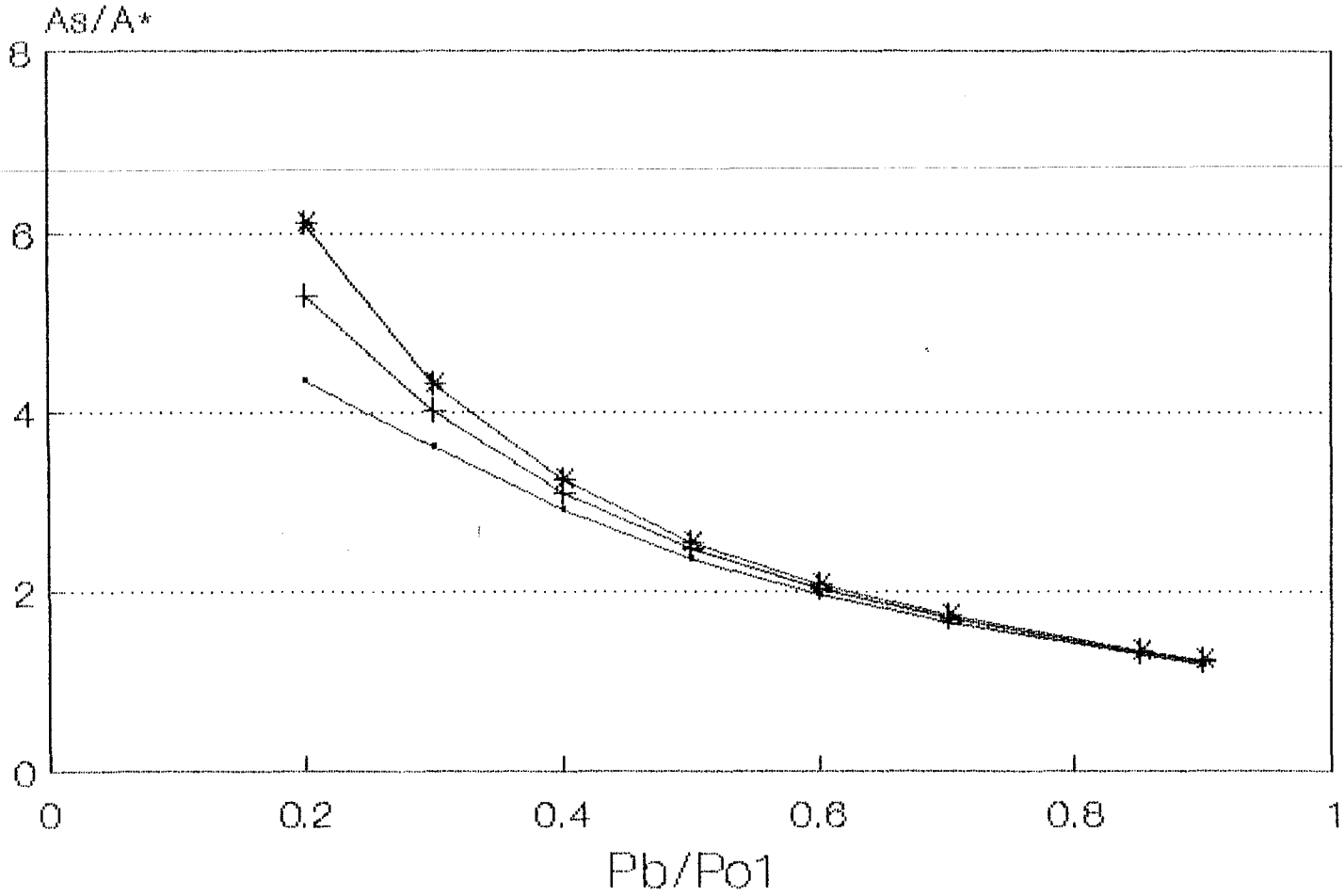
R2	At	ORAN1	Me2	Me1	rpc1	rpc3	ORAN6	rpc2
10	394.8	3.18	0.188	2.605	0.9770	0.0483	7.602	0.3673
11	374.5	3.35	0.177	2.652	0.9794	0.0447	7.883	0.3527
12	354.6	3.54	0.167	2.705	0.9817	0.0410	8.205	0.3368
13	335.4	3.75	0.158	2.758	0.9836	0.0377	8.534	0.3214
14	316.6	3.97	0.149	2.811	0.9854	0.0346	8.869	0.3065
15	298.4	4.21	0.140	2.866	0.9871	0.0316	9.229	0.2914
16	280.8	4.47	0.132	2.922	0.9885	0.0288	9.597	0.2768
17	263.6	4.76	0.123	2.980	0.9900	0.0262	9.991	0.2622
18	247.0	5.08	0.116	3.039	0.9912	0.0239	10.393	0.2482
19	231.0	5.44	0.108	3.104	0.9923	0.0215	10.845	0.2336
20	215.5	5.83	0.101	3.168	0.9933	0.0194	11.306	0.2197

Oran1 = A_e / A_t

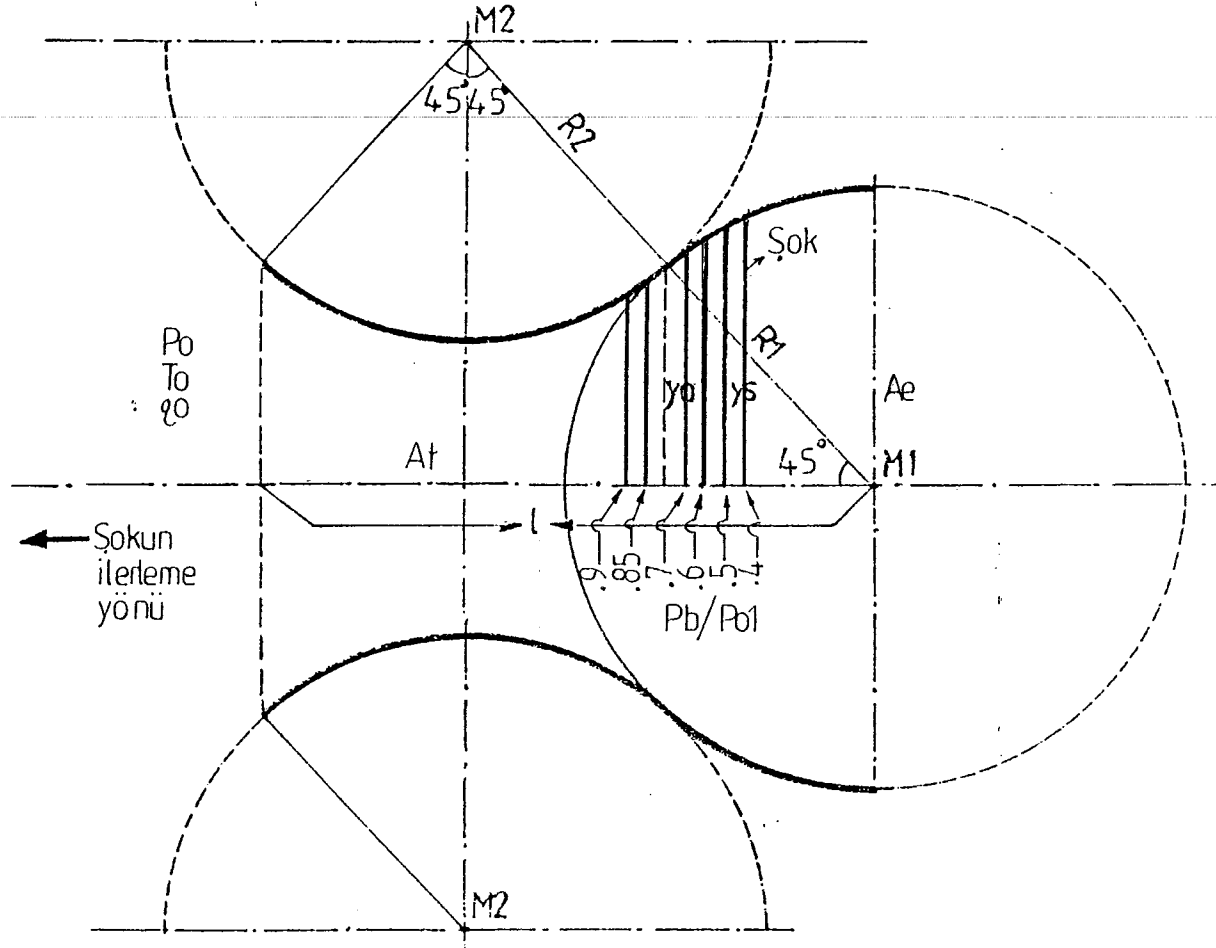
Oran6 = P_2 / P_1



Şekil 4.23 k=1.4 için lüle boyuna bağlı olarak çalışma basıncının değişimi



—•— Series A $A_e/A_t=31.9$ —+— Series B $A_e/A_t=4.21$ —*— Series C $A_e/A_t=5.83$
 Şekil 4.24 Pb/Po1 çalışma oranına bağlı olarak As/A* oranının değişimi



Şekil 4.25 Çalışma basıncına bağlı olarak şokun ilerlemesi

5. SONUÇ

Buraya kadar yapılan çalışmalarda belirttiğimiz gibi, geliştirdiğimiz dairesel kesitli ve dairesel profilli lülede sesüstü akış ve şok olayının incelenmesi için farklı nem oranına sahip hava-subuharı karışımları kullanılmıştır. Bunlara ait "k" sayıları sırası ile 1.4, 1.35, 1.327'dir. Aynı zamanda çalışma basınçları için farklı değerler alınarak havanın içindeki nem miktarının ve çalışma basıncının şokun oluşum yerine etkisi incelenmiştir.

Tablo 4.30, 4.31, 4.32' da lülenin kritik basınç oranları bulunmuştur. Buna göre rpc_2 (lülenin ikinci kritik oranı)'den daha düşük basınç oranları için şok dalgasının lüle dışında olduğu görülmüştür. Bu oluşturulan tablolarda "lüle dışı" ifadesi ile belirtilmiş olup, P_b/P_{o2} çalışma basıncı oranının .1, .2, .3, değerlerine karşılık gelmektedir. Bu değerler için lülede şok meydana gelmez ve lülenin iraksak kısmında sesüstü akış mevcuttur. Buradan da anlaşılacağı gibi çalışma basınç oranı düştükçe şok daha büyük Mach sayılarında oluşmakta, bunun sonucu olarak da gittikçe lüle dışına doğru hareket etmektedir. Böylece akım lüle çıkış düzleminden sonra sesüstü olur. Bu yüzden çıkış düzlemindeki basıncın ortam basıncına uyması gerekmez.

Yapılan çalışmalar sonucunda oluşturulan tablolardan görüleceği gibi birinci ve ikinci kritik basınç oranları arasındaki çalışma basıncı oranları için şok lülenin iraksak kısmında oluşmakta olup, çalışma basıncı oranının .3 değerinden daha büyük değerlerinde görülmektedir. Ayrıca lülenin birinci kritik oranından daha büyük çalışma basınç oranları kullanılmadığından lülede tamamen sesaltı akış oluşmamıştır.

Sabit bir basınç oranında havanın içine farklı

yüzdelerde katılan nem miktarı oluşturulan tablolardan hareketle çıkarılan şekillerden görüleceği gibi şok dalgasının lüle dışına doğru ilerlemesine yol açmaktadır. Yani akışkan olarak $k=1.35$ olan hava-subuharı kullanılması sonucu oluşan şok dalgası, $k=1.4$ olan hava kullanılması sonucu oluşan şok dalgasından ileridir. Yani lüle çıkış düzlemine daha yakın olup, nem miktarı arttıkça şok dalgası ilerleyerek lüle çıkışına doğru hareket eder.

Çalışmada kullanılan özel dizaynlı dairesel kesitli ve dairesel profilli yakınsak-ıraksak lülede sabit A_e çıkış kesitine karşılık, A_t boyun kesiti alanı gittikçe küçültülmüştür. Böylece farklı lüle dizaynları elde edilmiş olup, lüle dizaynının şokun oluşum yerine etkisi belirlenmiştir. Sonuç olarak, A_e/A_t kesit oranı arttıkça şok dalgası lülenin boyun kesitine yaklaşmaktadır. Bir başka deyişle A_t boyun kesitinin artması şok dalgasının lüle dışına doğru hareket etmesini sağlar.

Sonuçların daha kesin ortaya çıkması için bilgisayar destekli yapılan ve yukarıda çeşitli açılardan değerlendirilen bu çalışmamız şok dalgasının oluşum yerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Zira şokun oluşum yeri yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak değişmektedir. İleride bu çalışma esas alınarak sonuçların genelleştirilmesi yoluna gidilebilir.

EK AÇIKLAMALAR-A

```
10 REM "Sokun olusum yerini bulur"
20 CLS
30 LOCATE 22,1:INPUT "Tablo nosunu giriniz";TABNO
40 LOCATE 22,1:INPUT"Akiskanin k katsayisini giriniz ";K
50 LOCATE 22,1:PRINT SPC(79)
60 LOCATE 22,1:INPUT"Calisma basinci oranini giriniz";ORAN2
70 LOCATE 22,1:PRINT SPC(79)
80 LOCATE 1,2:PRINT "Tablo=";TABNO
90 LOCATE 1,13:PRINT" . k=";K
100 LOCATE 1,24:PRINT" ve "
110 LOCATE 1,27:PRINT " Oran2";ORAN2
120 LOCATE 1,39:PRINT "icin xs mesafesi"
130 LOCATE 5,2:PRINT"R2"
140 LOCATE 5,8:PRINT "At"
150 LOCATE 5,14:PRINT "ORAN1"
160 LOCATE 5,23:PRINT "Me"
170 LOCATE 5,29:PRINT "ORAN3"
180 LOCATE 5,37:PRINT "ORAN4"
190 LOCATE 5,46:PRINT "M1"
200 LOCATE 5,51:PRINT "ORAN5"
210 LOCATE 5,60:PRINT "As"
220 LOCATE 5,67:PRINT "xs"
230 LOCATE 5,73:PRINT "xsg"
240 LOCATE 21,2:PRINT STRING$(76,196)
250 LOCATE 3,2:PRINT STRING$(76,196)
260 LOCATE 7,2:PRINT STRING$(76,196)
270 O$=CHR$(179)
280 Y$=CHR$(194)
290 M$=CHR$(193)
300 N$=CHR$(191)
310 P$=CHR$(192)
320 H$=CHR$(217)
330 L$=CHR$(218)
340 FOR I=7 TO 20
350 LOCATE 7,1:PRINT L$
```

360 LOCATE 7,78:PRINT N\$
370 LOCATE 21,1:PRINT P\$
380 LOCATE 21,78:PRINT H\$
390 LOCATE 3,1:PRINT L\$
400 LOCATE 3,78:PRINT N\$
410 LOCATE I,5:PRINT O\$
420 LOCATE I,13:PRINT O\$
430 LOCATE I,19:PRINT O\$
440 LOCATE I,27:PRINT O\$
450 LOCATE I,35:PRINT O\$
460 LOCATE I,43:PRINT O\$
470 LOCATE I,50:PRINT O\$
480 LOCATE I,57:PRINT O\$
490 LOCATE I,64:PRINT O\$
500 LOCATE I,71:PRINT O\$
510 LOCATE 7,5:PRINT Y\$
520 LOCATE 7,13:PRINT Y\$
530 LOCATE 7,19:PRINT Y\$
540 LOCATE 7,27:PRINT Y\$
550 LOCATE 7,35:PRINT Y\$
560 LOCATE 7,43:PRINT Y\$
570 LOCATE 7,50:PRINT Y\$
580 LOCATE 7,57:PRINT Y\$
590 LOCATE 7,64:PRINT Y\$
600 LOCATE 7,71:PRINT Y\$
610 LOCATE 21,5:PRINT M\$
620 LOCATE 21,13:PRINT M\$
630 LOCATE 21,19:PRINT M\$
640 LOCATE 21,27:PRINT M\$
650 LOCATE 21,35:PRINT M\$
660 LOCATE 21,43:PRINT M\$
670 LOCATE 21,50:PRINT M\$
680 LOCATE 21,57:PRINT M\$
690 LOCATE 21,64:PRINT M\$
700 LOCATE 21,71:PRINT M\$

```

710 NEXT I
720 FOR Z=4 TO 20
730 LOCATE Z,1:PRINT O$
740 LOCATE Z,78:PRINT O$
750 NEXT Z
760 R1=20
770 YO=14.14
780 AE=3.14*R1^2
790 FOR I=1 TO 11
800 READ R2
810 AT=3.14*((R1+R2)/((2)^(1/2))-R2)^2
820 ORAN1=AE/AT
830 ME=(((-1)/(K-1)) + (((1/(K-1))^2) + (2/(K-1)) *
      ((2/(K+1)) ^ ((K+1)/(K-1))) * ((1)/(ORAN1)^2) *
      ((1)/(ORAN2)^2)) ^ .5) ^ .5
840 ORAN3=(1+((K-1)/2)*ME^2)^((-K)/(K-1))
850 ORAN4=ORAN2/ORAN3
860 M1A=1
870 M1B=4
880 'LOCATE 22,1:INPUT "M1>1 Sartini sagliyacak ve fonksiyonu
      (-)yapan M1 degerini giriniz";M1
890 'F(M1)=ORAN4 - (((K+1)/2) * ((M1)^2)) / (1+((K-1)/2)
      * ((M1)^2))) ^ ((K)/(K-1)) * (((2*K)/(K+1)) * ((M1)^2)
      - ((K-1) / (K+1))) ^ ((-1)/(K-1))
900 'IF F(M1)<.0001 AND F(M1)>-.0001 THEN GOTO 280
910 'IF F(M1)>0 THEN GOTO 200
920 'M1A=M1
930 'LOCATE 22,1:INPUT "M1>1 sartini sagliyacak ve
      fonksiyonu(+)yapan M1 degerini giriniz";M1
940 'F(M1)=ORAN4 - (((K+1)/2) * ((M1)^2)) / (1+((K-1)/2)
      * ((M1)^2))) ^ ((K)/(K-1)) * (((2*K)/(K+1)) * ((M1)^2)
      -((K-1) / (K+1))) ^ ((-1)/(K-1))
950 'IF F(M1)<.0001 AND F(M1)>-.0001 THEN GOTO 380
960 'IF F(M1)<0 THEN GOTO 250
970 'M1B=M1

```

```

980 M1=(M1A+M1B)/2
990 F(M1)=ORAN4 - (((K+1)/2) * ((M1)^2)) / (1+((K-1)/2)
      * ((M1)^2)) ^ ((K)/(K-1)) * (((2*K)/(K+1)) * ((M1)^2)
      -((K-1) / (K+1))) ^ ((-1)/(K-1))
1000 IF F(M1)<.0001 AND F(M1)>-.0001 THEN GOTO 1060
1010 IF F(M1)<0 THEN GOTO 1040
1020 M1B=M1
1030 GOTO 980
1040 M1A=M1
1050 GOTO 980
1060 ORAN5=(1/(M1)) * (((1+((K-1)/2) * (M1)^2)) / ((K+1)/2))
      ^((K+1)/(2*(K-1)))
1070 AS=ORAN5*AT
1080 YS=(AS/3.14)^(.5)
1090 IF YS>20 THEN GOTO 1190
1100 IF YS<Y0 THEN GOTO 1120 ELSE GOTO 1160
1110 GOTO 1310
1120 S=(YS-((R1+R2)/2^(.5)))^2-R2^2
1130 IF S<0 THEN S=S*(-1)
1140 XS=S^(.5)
1150 GOTO 1170
1160 XS=(R1+R2)/(2^(.5))-(R1^2-YS^2)^(.5)
1170 REM"Gercek xsg Mesafesinin bulunmasi"
1180 XSG=(11-I)/(2^(.5))+XS
1190 LOCATE 8+I,2:PRINT USING"##";R2
1200 LOCATE 8+I,6:PRINT USING "###.##";AT
1210 LOCATE 8+I,14:PRINT USING"#.##";ORAN1
1220 LOCATE 8+I,20:PRINT USING"#.####";ME
1230 LOCATE 8+I,28:PRINT USING"#.###";ORAN3
1240 LOCATE 8+I,36:PRINT USING"#.####";ORAN4
1250 LOCATE 8+I,44:PRINT USING"#.###";M1
1260 LOCATE 8+I,51:PRINT USING"#.###";ORAN5
1270 LOCATE 8+I,58:PRINT USING"####.#";AS
1280 IF YS>20 THEN 1290 ELSE 1300
1290 LOCATE 8+I,65:PRINT "Lule disi sok":GOTO 1310

```

```
1300 LOCATE 8+I,65:PRINT USING"##.##";XS
1310 LOCATE 8+I,72:PRINT USING"##.##";XSG
1320 NEXT I
1330 Y$=INPUT$(1)
1340 DATA 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20
```



```
10 CLS
20 REM"Kritik basinc oranlarini tayin eder"
30 LOCATE 22,1:INPUT "Tablo nosunu giriniz";TABNO
40 LOCATE 22,1:INPUT "Akiskanin katsayisini giriniz";K
50 LOCATE 1,6:PRINT "Tablo";TABNO
60 LOCATE 1,16:PRINT ". k =";K
70 LOCATE 1,29:PRINT "icin kritik basinc oranlari"
80 LOCATE 3,6:PRINT STRING$(72,196)
90 O$=CHR$(179)
100 M$=CHR$(194)
110 N$=CHR$(193)
120 Y$=CHR$(218)
130 L$=CHR$(191)
140 S$=CHR$(192)
150 R$=CHR$(217)
160 LOCATE 5,8:PRINT "R2"
170 LOCATE 5,14:PRINT "At"
180 LOCATE 5,20:PRINT "ORAN1"
190 LOCATE 5,29:PRINT "Me2"
200 LOCATE 5,37:PRINT "Me1"
210 LOCATE 5,44:PRINT "rpc1"
220 LOCATE 5,53:PRINT "rpc3"
230 LOCATE 5,62:PRINT "ORAN6"
240 LOCATE 5,71:PRINT "rpc2"
250 FOR I=7 TO 21
260 LOCATE I,11:PRINT O$
270 LOCATE I,19:PRINT O$
280 LOCATE I,26:PRINT O$
290 LOCATE I,34:PRINT O$
300 LOCATE I,42:PRINT O$
310 LOCATE I,51:PRINT O$
320 LOCATE I,60:PRINT O$
330 LOCATE I,69:PRINT O$
340 NEXT I
350 FOR I=3 TO 21
```

```
360 LOCATE I,5:PRINT O$
370 LOCATE I,78:PRINT O$
380 NEXT I
390 LOCATE 21,6:PRINT STRING$(72,196)
400 LOCATE 7,6:PRINT STRING$(72,196)
410 LOCATE 7,11:PRINT M$
420 LOCATE 7,19:PRINT M$
430 LOCATE 7,26:PRINT M$
440 LOCATE 7,34:PRINT M$
450 LOCATE 7,42:PRINT M$
460 LOCATE 7,51:PRINT M$
470 LOCATE 7,60:PRINT M$
480 LOCATE 7,69:PRINT M$
490 LOCATE 21,11:PRINT N$
500 LOCATE 21,19:PRINT N$
510 LOCATE 21,26:PRINT N$
520 LOCATE 21,34:PRINT N$
530 LOCATE 21,42:PRINT N$
540 LOCATE 21,51:PRINT N$
550 LOCATE 21,60:PRINT N$
560 LOCATE 21,69:PRINT N$
570 LOCATE 3,5:PRINT Y$
580 LOCATE 7,78:PRINT T$
590 LOCATE 3,78:PRINT L$
600 LOCATE 21,5:PRINT S$
610 LOCATE 7,5:PRINT V$
620 LOCATE 21,78:PRINT R$
630 LOCATE 3,5:PRINT Y$
640 LOCATE 22,1: INPUT "Akiskanin katsayisini giriniz";K
650 R1=20
660 AE=3.14*(R1)^2
670 FOR I=1 TO 11
680 READ R2
690 AT=3.14*((R1+R2)/((2)^(1/2))-R2)^2
700 ORAN1=AE/AT
```

```

710 M1A=4
720 M1B=1
730'LOCATE 22,1 : INPUT "Fonksiyonu (-) yapan (or:M1=4) ve
      M1>1 olan M1 degerini giriniz";M1
740'F(M1)=ORAN1 - 1/M1 * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
750'IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 780
760'IF F(M1)>0 THEN GOTO 620
770'M1A=M1
780'LOCATE 22,1: INPUT "Fonksiyonu (+) yapan (or:M1=1) ve
      M1>1 olan M1 degerini giriniz";M1
790'F(M1)=ORAN1 - (1/M1) * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
800'IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 780
810'IF F(M1)<0 THEN GOTO 670
820'M1B=M1
830 M1=(M1A+M1B)/2
840 F(M1)=ORAN1 - (1/M1) * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
850 IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 890
860 IF F(M1)<0 THEN GOTO 880
870 M1B=M1:GOTO 830
880 M1A=M1:GOTO 830
890 ME1=M1
900 M1A=.1
910 M1B=.9
920'LOCATE 22,1 : INPUT "Fonksiyonu (-) yapan (or:M1=.1) ve
      M1<1 olan M1 degerinigiriniz";M1
930'F(M1)=ORAN1 - (1/M1) * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
940'IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 950
950'IF F(M1)>0 THEN GOTO 790
960'M1A=M1
970'LOCATE 22,1 : INPUT "Fonksiyonu (+) yapan (or:M1=.9) ve
      M1<1 olan M1 degerinigiriniz";M1

```

```

980'F(M1)=ORAN1 - 1/M1 * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
990'IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 950
1000'IF F(M1)<0 THEN GOTO 840
1010'M1B=M1
1020 M1=(M1A+M1B)/2
1030 F(M1)=ORAN1 - 1/M1 * ((1+((K-1)/2) * (M1)^2)
      /((K+1)/2)) ^ ((K+1)/(2*(K-1)))
1040 IF F(M1)<.01 AND F(M1)>-.01 THEN GOTO 1100
1050 IF F(M1)<0 THEN GOTO 1080
1060 M1B=M1
1070 GOTO 1020
1080 M1A=M1
1090 GOTO 1020
1100 ME2=M1
1110 RPC1=(1+((K-1)/2)*ME2^2)^(-K/(K-1))
1120 RPC3=(1+((K-1)/2)*ME1^2)^(-K/(K-1))
1130 ORAN6=((2*K)/(K+1))*ME1^2-((K-1)/(K+1))
1140 RPC2=RPC3*ORAN6
1150 LOCATE I+8,6:PRINT R2
1160 LOCATE I+8,13:PRINT USING"###.#";AT
1161 LOCATE I+8,21:PRINT USING"#.##";ORAN1
1162 LOCATE I+8,28:PRINT USING"#.###";ME2
1163 LOCATE I+8,36:PRINT USING"#.###";ME1
1164 LOCATE I+8,44:PRINT USING"#.####";RPC1
1170 LOCATE I+8,53:PRINT USING"#.####";RPC3
1171 LOCATE I+8,62:PRINT USING"##.###";ORAN6
1172 LOCATE I+8,71:PRINT USING"#.####";RPC2
1180 NEXT I
1190 DATA 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20

```

NOT=

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akdoğan, F., 1982, Gaz Dinamiği ders notu, 9 Eylül Ü.M.M.F., (yayınlanmamış).
- Becker, R., 1929, Impact waves and detonations, NACA Tech Memo, 505 p.
- Bradley, J.H., 1962, Shock Waves in Chemistry and Physics, New-York: John Wiley & Sons.
- Combel, A.B., Duclos, D.P., and Anderson, T.P., 1963, Real Gases, New-York: Academics.
- Eggers, A.J., 1950, One Dimensional Flows of an Imperfect Diatomic Gas, NACA Rept., 959 p.
- Ferri, A., 1949, Elements of Aerodynamics of Supersonic Flow, New York: Macmillan.
- Gibbs, J.W., 1960, Vector Analysis, New-York: Dover.
- Hermann, R., 1958, Supersonic Inlet Diffusers and Introduction to Internal Aerodynamics, Minneapolis-Honeywell Regulator Co., Aeronautical Div., Minneapolis, Minn..
- Liepmann, H.W. and Roshko, A., 1957, Elements of Gas Dynamics, New-York: Wiley.
- Owczarek, J.A., 1964, Fundamentals of Gas Dynamics, Scranta Pa: Internatinonal Textbook.
- Peremeci, Ö.E., 1973, Aerodinamik Sıkışabilir akışkanlar, İ.T.Ü. yayını, 236p.

Shapiro, Ascher H., 1954, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Vol I-II, New-York: Ronald.

Tao, L.N., 1955, Gas Dynamics Behaviour of Real Gases, J.Aero.Sci., Vol 23, 763 p.

Vincenti, W.G. and Kruger, C.H., 1965, Introduction to Physical Gas Dynamics, New York: Wiley.

Zemansky, M.W., 1957, Heat and Thermodynamics, New-York: McGraw-Hill.

EK1

Tablo 4.32. Akışkanlara ait özgül ısılar.

Gaz	Formül	Molekül Ağırlığı	R (kJ/kgK)	C _{po} (kJ/kgK)	C _{vo} (kJ/kgK)	k -
Hava	-	28.97	0.28700	1.0035	0.7165	1.400
Argon	Ar	39.948	0.20813	0.5203	0.3122	1.667
Bütan	C ₄ H ₁₀	58.124	0.14304	1.7164	1.5734	1.091
Karbon						
Dioksit	CO ₂	44.01	0.18892	0.8418	0.6529	1.289
Karbon						
Monoksit	CO	28.01	0.29683	1.0413	0.7445	1.400
Etan	C ₂ H ₆	30.07	0.27650	1.7662	1.4897	1.186
Etilen	C ₂ H ₄	28.054	0.29637	1.5482	1.2518	1.237
Helyum	He	4.003	2.07703	5.1926	3.1156	1.667
Hidrojen	H ₂	2.016	4.12418	14.2091	10.0849	1.409
Metan	CH ₄	16.04	0.51835	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	20.183	0.41195	1.0299	0.6179	1.667
Nitrojen	N ₂	28.013	0.29680	1.0416	0.7448	1.400
Oktan	C ₈ H ₁₈	114.23	0.07279	1.7113	1.6385	1.044
Oksijen	O ₂	31.999	0.25983	0.9216	0.6618	1.393
Propan	C ₃ H ₈	44.097	0.18855	1.6794	1.4909	1.126
Su	H ₂ O	18.015	0.46152	1.8723	1.4108	1.327

EK2

Hugoniot Denkleminin Elde edilmesi

$$\rho U = \text{sbt} \dots\dots\dots (\text{Süreklilik denklemi})$$

$$dA/A + dq/q + dU/U = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho U dU = -dP$$

$$U dU = -(dP/d\rho)(d\rho/\rho) \dots\dots\dots (2)$$

Akım isentropik ise;

$$(dP/d\rho)_s = a^2 \text{ denklemi (2) denkleminde konulursa;}$$

$$U^2 dU/U = -a^2 d\rho/\rho$$

$$M^2 dU/U = -d\rho/\rho \text{ denklemi (1) denkleminde konulursa;}$$

$$dA/A = -(1-M^2)dU/U \dots\dots\dots (\text{Hugoniot denklemi})$$

EK3

Prandtl Bağıntısının Elde Edilmesi

$$h + 1/2U^2 = h_0 \dots\dots\dots \text{(Enerji denklemi)}$$

$$h = a^2/(k-1)$$

$$a^2/(k-1) + U^2/2 = a_0^2/(k-1)$$

$$a/a_0 = \left| 1 + M^2(k-1)/2 \right|^{-\frac{1}{2}}$$

$$U/a_0 = M / \left| 1 + M^2(k-1)/2 \right|^{\frac{1}{2}}$$

M=1 ve $U=U^* = a^*$ için yazıp taraf tarafa bölersek;

$$M = M^* \left| \frac{2/(k+1)}{1 - M^{*2}(k-1)/(k+1)} \right|^{\frac{1}{2}}$$

M=M1 için $M^* = M1^*$ ve M=M2 için $M^* = M2^*$ için yazarsak M1 ve M2;

$$M1 = M1^* \left| \frac{2/(k+1)}{1 - M1^{*2}(k-1)/(k+1)} \right|^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$M2 = M2^* \left| \frac{2/(k+1)}{1 - M2^{*2}(k-1)/(k+1)} \right|^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$q_1 U_1 = q_2 U_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$P_1 + q_1 U_1^2 = P_2 + q_2 U_2^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$h_1 + U_1^2/2 = h_2 + U_2^2/2 \dots\dots\dots (5)$$

$$P = \rho RT \dots\dots\dots (6)$$

$$a^2 = kRT = kP/\rho \dots\dots\dots (7)$$

$$h = kRT/(k-1) \dots\dots\dots (8)$$

$$M = U/a \dots\dots\dots (9)$$

(6), (7), (8), (9) denklemleri, (3), (4), (5) denklemlerinde yerine konursa;

$$P_1 M_1 \sqrt{T_1} = P_2 M_2 \sqrt{T_2} \dots\dots\dots (10)$$

$$P_1 (1 + k M_1^2) = P_2 (1 + k M_2^2) \dots\dots\dots (11)$$

$$T_1 [1 + M_1^2 (k-1)/2] = T_2 [1 + M_2^2 (k-1)/2] \dots\dots\dots (12)$$

(10), (11), (12) denklemleri düzenlenirse;

$$M_1/M_2 = (P_2/P_1) (\sqrt{T_1}/\sqrt{T_2}) \dots\dots\dots (13)$$

$$P_2/P_1 = (1 + k M_1^2)/(1 + k M_2^2) \dots\dots\dots (14)$$

$$T_2/T_1 = [1 + M_1^2 (k-1)/2] / [1 + M_2^2 (k-1)/2] \dots\dots\dots (15)$$

(13), (14), (15) denklemlerinden P₂/P₁ ve T₂/T₁ yok edilirse;

$$\frac{M_1^2}{M_2^2} = \left[\frac{1 + k M_1^2}{1 + k M_2^2} \right] \left[\frac{1 + M_2^2 (k-1)/2}{1 + M_1^2 (k-1)/2} \right] \dots\dots (16)$$

(16) denkleminde M₁ biliniyor ve M₂ çözülürse

$$M_1 = M_2 \dots\dots\dots (17)$$

$$M_2 = \left| \frac{1 + M_1^2 (k-1)/2}{k M_1^2 - (k-1)/2} \right|^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (18)$$

elde edilir. (17) denklemi sürekliliği belirttiğinden, süreksizliği belirten (18) denklemi kullanılacaktır.

Denklem (18), (2) denklemine yerine konulursa;

$$M_1^* M_2^* = 1$$

$$U_1 U_2 = a_1^{*2} \dots \dots \dots \text{(Prandtl bağıntısı)}$$

EK4

Denklem (3.13)'ün Elde Edilmesi

$$M2 = \left[\frac{1+M1^2(k-1)}{2} \right]^{\frac{1}{2}} / \left[\frac{kM1^2-(k-1)}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$P2/P1 = (1+kM1^2)/(1+kM2^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$T2/T1 = \left[\frac{1+M1^2(k-1)}{2} \right] / \left[\frac{1+M2^2(k-1)}{2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

M2 ifadesi denklem (1) ve (2) ifadelerine konulursa;

$$P2/P1 = M1^2 2k / (k+1) - (k-1) / (k+1) \dots\dots\dots (3)$$

$$T2/T1 = \left[\frac{2(k-1)^2}{M1^2(k+1)^2} \right] \left[\frac{1+M1^2(k-1)}{2} \right] \left[\frac{M1^2 2k}{(k-1)} - 1 \right] \dots (4)$$

Durma basınçları;

$$Po2/Po1 = (Po2/P2)(P1/Po1)(P2/P1) \dots\dots\dots (5)$$

$$\qquad \qquad \qquad -k/(k-1)$$

$$P / Po = \left[\frac{1+M^2(k-1)}{2} \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$\qquad \qquad \qquad -k/(k-1)$$

$$P1/Po1 = \left[\frac{1+M1^2(k-1)}{2} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$\qquad \qquad \qquad -k/(k-1)$$

$$P2/Po2 = \left[\frac{1+M2^2(k-1)}{2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

(1),(7),(8) denklemleri, (5) denkleminde konursa;

$$\frac{Po2}{Po1} = \left[\frac{k+1}{M1^2 \frac{\quad}{2}} \right] \left[\frac{k-1}{1+M1^2 \frac{\quad}{2}} \right] \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[\frac{-1}{k-1} \right] \left[\frac{M1^2 2k}{(k+1)} - \frac{(k-1)}{(k+1)} \right] \dots (9)$$

$$TdS = de + Pd(1/\rho) \dots\dots\dots (10)$$

$$de = dh - dP/q + Pd(1/q)$$

$$P = q RT$$

$$dS = Cp dT/T - R dP/P \dots\dots\dots (11)$$

(11) denklemi entegre edilirse;

$$\begin{aligned} \Delta S/Cp &= \ln \left(\frac{T}{P} \right)^{R/Cp} \left(\frac{S-S_0}{Cp} \right) \\ T/P &= e \end{aligned}$$

Adiabatik akım halinde $T_{o1}=T_{o2}$ 'dir.

$$\Delta S = -R \ln (P_{o2}/P_{o1}) \dots\dots\dots (12)$$

(9) denklemi, (12) denkleminde yerine konulursa;

$$\begin{aligned} \Delta S = -R \ln \frac{[M_1^2(k+1)/2]^{k/(k-1)}}{[1+M_1^2(k-1)/2]^{1/(k-1)}} &: [M_1^2 2k/(k+1) - (k-1)/(k+1)] \end{aligned}$$

EK5

Denklem (3.14)'ün Elde Edilmesi

$$M=U/a$$

$$dM /M = dU/U - da/a \dots\dots\dots (1)$$

$$a= \sqrt{kP/q} \dots\dots\dots (2)$$

$$da/a = (dP/P-dq/q)$$

$$P/qk=sbt \text{ ise } dP/P=kdq/q$$

$$da/a=[(k-1)/2]dq/q = [(k-1)/2k]dP/P \dots\dots\dots (3)$$

(3) denklemi, (1) denkleminde yerine konulursa;

$$dM/M = dU/U-[(k-1)/2]dq/q \dots\dots\dots (4)$$

$$M^2dU/U =-dq/q \dots\dots\dots (5)$$

(5) denklemi, (4) denkleminde yerine konulursa;

$$dM/M=[1+M^2(k-1)/2]dU/U \dots\dots\dots (6)$$

$$dA/A = -(1-M^2)dU/U \dots\dots\dots(\text{Hugoniot denklemi}) (7)$$

(6) denklemi, (7) denkleminde yerine konulursa;

$$dA/A = [(M^2-1)/[1+M^2(k-1)/2]] dM/M \dots\dots\dots (8)$$

(8) denklemi, 1 ve 2 kesitleri arasında entegre edilirse;

$$A_1/A_2 = M_2/M_1 \frac{(k+1)/2(k-1) [1+M_1^2(k-1)/2]}{(k+1)/2(k-1) [1+M_2^2(k-1)/2]} \dots\dots\dots (9)$$

A₁=A_e, M₁=M_e, M₂=1, A₂=A[★] için (9) denklemi düzenlenirse;

$$A_e/A^{\star} = 1/M_e \left[\frac{(k+1)/2(k-1) [1+M_e^2(k-1)/2]}{(k+1)/2} \right]$$

Denklem (3.17)'nin Elde Edilmesi

$$m = \rho U A$$

$$m/A = (\rho U/A) (A^*/A^*)$$

$$\rho A U = \rho A^* U^*$$

$$\rho^* = P^*/RT^*$$

$$U^* = a^* = \sqrt{kRT^*}$$

$$m^*/A = (\sqrt{k/R}) (P/\sqrt{T}) (A^*/A) \dots\dots\dots (1)$$

$$P^* = P_0 \left[\frac{k+1}{2} \right]^{-k/(k-1)} = P_0 \left[\frac{k+1}{2} \right]^{k/(k-1)} \dots\dots\dots (2)$$

$$T^* = T_0 \left[\frac{k+1}{2} \right]^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

(2) ve (3) denklemleri (1) denklemlerinde yerine konulursa;

$$m/A = (\sqrt{k/R}) (P_0/\sqrt{T_0}) (A^*/A) \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/2(k-1)} \dots\dots\dots (4)$$

A=A* ve m=mmax için (4) denklemi düzenlenirse;

$$(m/A)_{max} = (m^*/A^*) = (P_0/\sqrt{T_0}) (\sqrt{k/R}) \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/2(k-1)}$$

