

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SESÜSTÜ AKIŞ ELDE EDİLEBİLEN BİR
LÜLENİN TASARIMI VE NÜMERİK
OLARAK İNCELENMESİ

İlker COŞAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Program: Termodinamik

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DURANAY
ELAZIĞ-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SESÜSTÜ AKIŞ ELDE EDİLEBİLEN BİR LÜLENİN
TASARIMI VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker COŞAR

(141120112)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Termodinamik

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DURANAY

ELAZIĞ-2018

T.C

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SESÜSTÜ AKIŞ ELDE EDİLEBİLEN BİR LÜLENİN
TASARIMI VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker COŞAR

(141120112)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26.03.2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 23.03.2018

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DURANAY (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç Dr. Duygu Evin (F.Ü.)

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk CAN (D.Ü.)

ELAZIĞ-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanması ve tamamlanmasında çalışma boyunca yardımını, desteğini esirgemeyen ve her aşamasında sabırla yol gösteren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet DURANAY'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın her aşamasında yardım ve desteğini eksik etmeyen Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN'e ve çalışmanın düzenlenmesinde ve hazırlanmasında yardımlarına başvurduğum, Sayın Prof. Dr. Abdulvahap YİĞİT'e teşekkürlerimi borç bilirim.

En önemlisi bugünlere gelmemi sağlayan, her türlü destekleriyle yanımda olan ve tüm başarılarımın arkasında gizli aktör rolü oynayan aileme ve çalışmam boyunca maddi ve manevi desteğiyle hep yanımda olan eşim Bahanur COŞAR'a teşekkür ederim.

İlker COŞAR

ELAĞIĞ 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. SIKIŞTIRILABİLİR AKIŞ	5
2.1. Kanal ve Lülelerde Bir Boyutlu Akışlar Hakkında Genel Bilgi.....	5
2.2. Sıkıştırılabilir Akış	6
2.3. Ses Hızı ve Mach Sayısı.....	6
2.4. Hugoniot Teoremi	8
2.5. İzentropik Akış	10
2.5.1. İdeal Gazın İzentropik Akıştaki Özellikleri	12
2.5.2. Kütle Akışı	14
2.6. Şok Dalgaları.....	16
2.7. Lüle Geometrisinin Tayini	19
2.7.1. Lüle Çıkış Basıncına Ortam Basıncının Tesiri.....	19
2.7.2. Yakınsak–İraksak Lüleler	20
2.8. Yakınsak-İraksak Lüle Tasarımı ve Analiz Yöntemleri.....	24
2.8.1. Busemann Metodu.....	24
2.8.2. Puckett Metodu	24
2.8.3. Foelsch’s Metodu	26

3. MATERYAL VE METOT	29
3.1. Süpersonik Lülenin Profilinin Oluşumu.....	29
3.2. Süpersonik Lüle Profili Çiziminin Açıklaması	31
3.3. Lüle Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler	33
3.4. Yakınsak Iraksak Lüle ve Başlangıç Şartları	36
3.4.1. Yakınsak-Iraksak Lüle Eğrisinin Hesaplamaları.....	37
3.4.2. Tasarlanan Lüle Akışının Termodinamik Hesaplamaları.....	42
3.4.2.1. Dairesel Kesitli Lüle İçin Termodinamik Hesaplamalar	42
3.4.2.2. Kare Kesitli Lüle İçin Termodinamik Hesaplamalar	45
3.5. Türbülans Modelleri.....	47
3.5.1. K-Epsilon Türbülans Modeli.....	47
3.5.2. K-Omega Türbülans Modeli	48
3.5.3. SST Modeli	48
4. BULGULAR	49
4.1. Yakınsak-Iraksak Lüledeki Sesüstü Akışının Analiz Aşamaları.....	49
4.2. Eleman Sayısı Yoğunluğunun Seçimi.....	50
4.3. Türbülans Modelinin Seçimi	53
4.4. ANSYS CFX’de Yapılan Analizin Geçerlilik Çalışması	54
4.5. Tasarımı Yapılmış Yakınsak - Iraksak Lüle Analizlerinin İrdelenmesi.....	56
4.5.1. Dairesel Kesitli ve Kare Kesitli Yakınsak-Iraksak Lüle Analizlerinin İrdelenmesi	56
4.5.2. Yakınsak Kısmı Dairesel Kesitli, Iraksak Kısmı Kare Kesitli Lüle Akış Analizi.....	72
4.6. Yakınsak – Iraksak Lüle Analiz Çalışmalarımız ve Literatür ile Karşılaştırma.....	79
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKÇA	84
EKLER	86
ÖZGEÇMİŞ	97

ÖZET

Bu çalışmada, sesüstü akış elde etmek için farklı yakınsak – ıraksak lülelerdeki akış sayısal olarak incelenmiş ve optimum lüle geometrisi tasarımı için gerekli lüle profilini oluşturan parametreler tespit edilmiştir.

Sayısal çalışma için ANSYS CFX paket programı kullanılmıştır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır ($Pr = 0.718$). Çalışmada bir adet lüle profili için üç farklı geometri oluşturulmuştur. Lüle geometrileri olarak *a*) dairesel kesitli yakınsak – ıraksak lüle, *b*) kare kesitli yakınsak – ıraksak lüle *c*) yakınsak kısmı dairesel – ıraksak kısmı kare kesitli lüle (karma lüle) alınmış ve akış analizleri yapılmıştır. Sonuçların doğruluğunu mukayese etmek için literatürde benzer bir çalışma örnek alınmış, aynı parametreler kullanılarak hem analitik hem de sayısal olarak karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Çözümün ağ yapısından bağımsız olduğunu göstermek için üç farklı ağ yapısı kullanılarak uygun ağ yapısı seçilmiştir. Ayrıca iki farklı türbülans modeli denenmiş ve SST modeli uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma boyunca giriş basıncı 7 bar çıkış basıncı atmosfer basıncı (1 bar) alınmıştır. Elde edilen sonuçlar hız, basınç, yoğunluk, Mach sayısı, sıcaklık parametrelerine bağlı olarak grafiklerle sunulmuştur. Sonuçlar değerlendirilmiş ve karma lülenin daha optimum olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yakınsak-Iraksak Lüle, Sesüstü Akış, Lüle Tasarımı, Süpersonik Lüle, Termodinamik Özellikler.

SUMMARY

The Design and Numerical Analysis of a Nozzle with Obtainable Supersonic Flow

In this study, in order to obtain supersonic flow in different converging-diverging nozzles a numerical study was conducted to find parameters which form necessary nozzle profiles.

ANSYS CFX software package program was used for the numerical study. Air was chosen as a working fluid ($Pr = 0.718$). Taking nozzle geometries as *a*) circular cross-section converging-diverging nozzle, *b*) quadratic cross-section converging-diverging nozzle, *c*) converging part with circular cross-section and diverging part with quadratic cross-section nozzle (mixed nozzle), flow analyses were carried out. In order to verify the results, a similar study from the literature was taken into account and same parameters were used. Both analytical and numerical results obtained were compared with literature and a good agreement was found. In order to show grid-free solution, three type of grids were used and a suitable one was chosen. Further, two turbulence model was tried and the best solutions were obtained by SST model.

Throughout the study, at the inlet pressure was 7 bar in the outlet atmospheric pressure (1 bar) was accepted. The results obtained were presented graphically in terms of parameters such as velocity, pressure, density, Mach number and temperature. The results were evaluated and mixed nozzle was found as an optimum nozzle.

Key Words: Converging-Diverging Nozzle, Supersonic Flow, Nozzle Design, Thermodynamic Analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bir Boyutlu Akımlar .	5
Şekil 2.2. Hareket eden bir tedirginlik kaynağında meydana gelen doğruların yayılışı (a) $M < 1$ durumu (b) $M > 1$ durumu	7
Şekil 2.3. Hugoniot teoremi .	8
Şekil 2.4. Yakınsak - Iraksak lüle .	9
Şekil 2.5. Lüle boyunca basınç değişimi	10
Şekil 2.6. Şok dalgasının oluşum fotoğrafı .	16
Şekil 2.7. Entropi Ma_1 ile değişimi	18
Şekil 2.8. P_e çıkış basıncının P_b ortam basıncına tesiri .	20
Şekil 2.9. Yakınsak-ıraksak lüleler, roket motorlarında yüksek itiş sağlamak için kullanılır	21
Şekil 2.10. Yakınsak-Iraksak lülelerde karşı basıncın akış üzerindeki etkisi	22
Şekil 2.11. Puckett Metoduna göre düzenlenmiş lüle profili	25
Şekil 2.12. Foelsch metodunda referans alınan değişkenler	26
Şekil 3.1. Yakınsak-Iraksak lüle iç kesiti.	32
Şekil 3.2. Lülenin iç profilini oluşturan çember yayları ve çizgi parçaları.	32
Şekil 3.3. Lüle iç profil konturunun parametrelerle ölçülendirilmesi.	33
Şekil 3.4. Belirtilen sınır şartlarına göre hesaplanmış lüle profili ölçüleri.	42
Şekil 3.5. Dairesel kesitli yakınsak - ıraksak lülenin perspektif görünüşü.	43
Şekil 3.6. Dairesel kesitli lüle akışının giriş boğaz ve çıkış şartları şematik gösterimi.	45
Şekil 3.7. Kare kesitli yakınsak-ıraksak lülenin perspektif görünüşü.	45
Şekil 3.8. Kare kesitli lüle akışının giriş boğaz ve çıkış şartları şematik gösterimi.	47
Şekil 4.1. Dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin analiz modellerinin perspektif görünüşleri.	49
Şekil 4.2. Analiz aşamalarının şematik gösterimi.	50
Şekil 4.3.(a) Düşük, (b) Yüksek sayılı elemana bölünmüş modeller	51
Şekil 4.4. Eleman sayısı yoğunluklarına göre hız değerlerinin karşılaştırılması.	51
Şekil 4.5. (a) Düşük, (b) Yüksek sayılı elemana bölünmüş modellerin hız değerleri dağılımı.	52
Şekil 4.6. K-Epsilon ve SST türbülans modelleri için modeldeki eksenel hız değerleri.	53
Şekil 4.7. Arina'nın Laval nozul geometrisi	54
Şekil 4.8. Arina laval geometrisinin CFX'deki çözümünün Mach sayısı değişimi.	55

Şekil 4.9. Arina'nın aksel basınç değişimleri ile analiz basınç değişimleri dağılımları.	55
Şekil 4.10. Dairesel kesitli lülenin dış teğeti olarak tasarlanmış kare kesitli lüle.	57
Şekil 4.11. Lüle x-y-z eksen yönlerinin gösterimi.	57
Şekil 4.12. Dairesel kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi hız değişimi.	58
Şekil 4.13. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi hız değişimi.	58
Şekil 4.14. Daire kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti Mach sayısı değişimi.	59
Şekil 4.15. Kare kesitli lülenin (a) Boğaz kesiti (b) Çıkış kesiti Mach sayısı değişimi.	60
Şekil 4.16. Dairesel kesitli lüledeki boğaz en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.	60
Şekil 4.17. Dairesel kesitli lüledeki çıkış en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.	61
Şekil 4.18. Dairesel kesitli lüledeki çıkış 10 mm en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.	62
Şekil 4.19. Kare kesitli lüledeki boğaz en kesitinin N ekseni (a) hız vektörü (b) hız grafiği	62
Şekil 4.20. Kare kesitli lüledeki çıkış en kesiti N ekseni (a) hız vektörü (b) hız grafiği.	63
Şekil 4.21. Kare kesitli lüledeki çıkış 10 mm en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.	64
Şekil 4.22. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki aksel hız değişim grafiği.	64
Şekil 4.23. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x-ekseni boyunca hız değişimleri grafiği.	65
Şekil 4.24. Dairesel kesitli lülenin $z = 0$ koordinatlarında xy düzlemi sıcaklık değişimi.	66
Şekil 4.25. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatlarındaki xy düzlemi sıcaklık değişimi.	66
Şekil 4.26. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki aksel sıcaklık değişimleri.	67
Şekil 4.27. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x- ekseni boyunca sıcaklık değişimi.	68
Şekil 4.28. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki aksel basınç değişimi.	69
Şekil 4.29. Dairesel kesitli ve kare kesitli x- ekseni boyunca basınç değişimi.	70
Şekil 4.30. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x- ekseni boyunca yoğunluk değişimi.	70
Şekil 4.31. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x- ekseni boyunca Mach sayısı değişimi.	71
Şekil 4.32. Dairesel kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi Mach sayısındaki değişimi.	71
Şekil 4.33. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi Mach sayısı değişimi.	72
Şekil 4.34. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle üç boyutlu görünümü.	73
Şekil 4.35. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemindeki hız değişimi.	74
Şekil 4.36. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x ekseni boyunca hız değişim grafiği.	75
Şekil 4.37. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki hız değişimleri.	75

Şekil 4.38. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle xy düzlemindeki Mach sayısı değişimi	76
Şekil 4.39. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x ekseni boyunca Mach sayısı değişim grafiği.....	76
Şekil 4.40. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x ekseni boyunca basınç değişimi grafiği.....	77
Şekil 4.41. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle xy düzlemindeki sıcaklık değişimi	77
Şekil 4.42. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x ekseni boyunca sıcaklık değişimi grafiği	78
Şekil 4.43. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x ekseni boyunca yoğunluk değişimi grafiği.....	78
Şekil 4.44.(a) A. Balabel çalışmasında oluşan şok açıklaması, (b) Araştırma konusu mevcut lülenin akış görüntüsü.....	79
Şekil 4.45.(a) A. Balabel'in çalışması, (b) Mevcut çalışmanın konik lüle analizi, (c) Östlund J.'in çalışması	80
Şekil 4.46. Bergman J. Laval lülesinin Mach sayısı değişimi ve eksenel hız değişim grafiği	81
Şekil 4.47. Chang P. çalışmasında yakınsak-ıraksak lülenin Mach sayısı dağılımı	81
Ek Şekil 3.1. Dairesel kesitli lülenin (a) Boğaz kesiti (b) Çıkış kesiti sıcaklık değişimi.	89
Ek Şekil 3.2. Dairesel kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti hız değişimi.	89
Ek Şekil 3.3. Kare kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti sıcaklık değişimi.	90
Ek Şekil 3.4. Kare kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti hız değişimi.....	90
Ek Şekil 3.5. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki Mach sayısındaki değişim.	91
Ek Şekil 3.6. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki sıcaklık değişim.	91
Ek Şekil 3.7. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki hız değişim.	92
Ek Şekil 3.8. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki hız değişim.	92
Ek Şekil 3.9. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki sıcaklık değişim.	93
Ek Şekil 3.10. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki Mach sayısındaki değişim.	93
Ek Şekil 3.11. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki Mach sayısı değişimleri.	94
Ek Şekil 3.12. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki sıcaklık değişimleri.	94
Ek Şekil 3.13. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin 4mm önündeki en kesitindeki hız değişimi.....	95

Ek Şekil 3.14. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin 4mm önündeki en kesitindeki sıcaklık değişimi	95
Ek Şekil 3.15. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin 4mm önündeki en kesitindeki Mach sayısı değişimi.....	96



TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Lülenin belirtilen Şartlara göre tasarım parametreleri	41
Ek Tablo 1.1 İzentropik akış �zellikleri	86
Ek Tablo 1.1 İzentropik akış özellikleri (devamı)	87
Ek Tablo 2.1 �rnek çalışmada referans alınan kompresör katalog değerleri	88



SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Kesit alanı (m^2)
A_t	: Boğaz kesit alanı (m^2)
c	: Ses hızı (m/s)
c_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı (J/kgK)
c_v	: Sabit hacimdeki özgül ısı (J/kgK)
G	: Birim alanda geçen kütle miktarı (kg/m^2)
h	: Birim kütle için entalpi (J/kg)
k	: Özgül ısılar oranı (c_p/c_v)
α	: Mach açısı
M	: Mach sayısı
$\dot{m}$	: Kütleli debi (m^3/s)
M_1	: Şoktan önceki Mach sayısı
M_2	: Şoktan sonraki Mach sayısı
$M_e(=M_3)$	: Çıkış Mach sayısı
L_1	: Giriş uzunluğu (mm)
L_3	: Süpersonik akış elde edilen uzunluğu (mm)
A_2	: İraksak kısım tepe açısı (derece)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
P	: Basınç (Pa)
P_{01}	: Şoktan önceki durma basıncı (Pa)
P_{02}	: Şoktan sonraki durma basıncı (Pa)
P_1	: Şoktan önceki normal basıncı (Pa)
P_2	: Şoktan sonraki normal basıncı (Pa)
P_0	: Giriş mutlak basıncı (durma halindeki basınç) (Pa)
$P_e(=P_3)$	: Çıkış mutlak basıncı (Pa)
P_b	: Çıkış ortamındaki basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
R	: Gaz sabiti (J/kgK)
R_1	: Yakınsak kısım ilk yayın yarıçapı (mm)
R_2	: Yakınsak kısım ikinci yayın yarıçapı (mm)
R_3	: Boğaz kısım düzleştirici yay yarıçapı (mm)
R_4	: İraksak kısım düzleştirici yay yarıçapı (mm)
S	: Entropi (J/kgK)
T	: Mutlak sıcaklık (K)
T_0	: Standart şartlardaki sıcaklık (durma halindeki sıcaklık)
U	: Akım hızı (m/s)
$\dot{V}$	: Hacimsel debi (m^3/s)
τ	: Bulk Elastisite Modülü (N/m^2)

1. GİRİŞ

Genellikle sıvılar sıkıştırılmaz, gazlar ise sıkıştırılabilir akışkanlar olarak değerlendirilse de her ikisi için de bazı istisnalar söz konusudur. Akış esnasında yoğunluk değişimi çok küçük olduğu durumlarda akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilir. Sıkıştırılabilir akışlarda akışkan hızı ses hızından çok küçük değerlerde olması durumunda yoğunluk akış boyunca değişmediği gözlemlenir. Halbuki hız ses hızına yaklaştığında ve geçtiğinde ise yoğunlukta büyük oranda değişimler gözlenmektedir.

Sıkıştırılmayan akışlarda temel parametre Reynolds sayısı iken, sıkıştırılabilen akışlarda Mach sayısıdır.[1] Mach sayısı özellikle yüksek hızlı akışlarda büyük öneme sahiptir. Tanımı Ernst Mach ve oğlu Ludwing Mach tarafından 1889'da yapılmıştır.

Sıkıştırılabilir akışın en önemli özelliği akışkan hızının ses hızından büyük değerlere çıktığında akış alanında (basınç, hız, sıcaklık) büyük değişimler olmaktadır. Sesüstü akışta, akış alanındaki değişimleri gözlemlemek için rüzgar tünellerinden yararlanılır. Bu çalışmada da süpersonik akışlı lüle tasarımı üzerinde durulacaktır. Zira rüzgar tünellerinin fonksiyonlarını yerine getirmesini sağlayan temel eleman lüledir.

Akım bölgesinde, akış eksenine dik doğrultudaki özelliklerde ortaya çıkan değişimleri ihmal etmediğimiz zaman akışı iki boyutlu hale sokmuş oluruz. Bundaki amaç, tek boyutlu yaklaşımda akım özelliklerini her yerde aynı değerde olduğu kabul edilmesidir. Gerçekte böyle olmadığından olayı iki boyutluda incelemek tek boyutlu yaklaşımda destek sağlamaktadır.

Bu konuda birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada da daha önceki çalışmalarda yararlanılan metotlardan ve çeşitli çalışmalardan faydalanılacaktır. Süpersonik lüle tasarımıadaki en büyük problemlerden biri, test bölümündeki paralel ve düzgün akışın sağlanabilmesi için süpersonik lülenin konturlarının belirlenmesidir. Bu çalışmanın amacı, bu yöntemleri tartışmak ve lüle tasarımı için bir kılavuz sunmak ve bu kılavuz ışığında yapılan çalışmalarla elde edilen lüle konturunun çizimi ve bilgisayar destekli analiz programında tasarlanan lülenin akışkan basınç, sıcaklık, yoğunluk, hız değerlerindeki değişimleri irdeleme ve yapılan tasarımın doğruluğunun tespitidir.

1.1. Literatür Araştırması

Bu kısımda, önerilen süpersonik lüle tasarımının geliştirilmesi ve tasarımın analizi ve simülasyonu hakkında bilgi vermek için, lüle tasarımı ve analizindeki mevcut çalışmanın bir literatür araştırmasını sunmaktadır.

Sesüstü akış gerçekleşen yakınsak-ıraksak lülenin Karakteristikler Metodu kullanılarak ilk tasarımını Prandtl ve Busemann (1929) gerçekleştirdi. Karakteristikler Metodu grafiksel bir yöntem olup, Mach sayısında düzgün bir akışın ve arzu edilen bir süpersonik hızda şoksuz bir akışa dönüşeceği iç profil konturunu belirledi. Yöntem, önce test bölümündeki Mach sayısına karşılık gelen Prandtl-Meyer açısını bulup boğazdan başlayarak akış yönünde ilerletmeyi, yerel Prandtl-Meyer cidar açısı cinsinden akış alanını belirlemeyi içermektedir. Daha sonra 1949'da Foelsch analitik olarak eğilme noktasından başlayıp, Prandtl ve Busemann yöntemine dayanılarak, analitik sonuçlara yaklaşmak için yorucu ve zorlu grafik çalışmalarını basitleştiren karakteristik özelliklerini çözerek profil eğriliğini hesapladı [2].

K. Foelsch'in çalışmasında üniform çıkış akışını üreten bir eksenel simetrik lülenin konfigürasyonu içinde bir yaklaşım açıklanmaktadır. Foelsch, pertürbasyon yaklaşımı ve lüledeki ayrı yüzeyler boyunca kütle akışının korunması ile düz profil şeklini belirler. Bununla birlikte, yukarıda belirtildiği gibi akış ağı hesaplamasında önemli bir tasarruf sağlanır. Foelsch lüle profilini ayrı bir seri olarak belirlemektedir. Dolayısıyla, arzu edilen bir optimal süpersonik hava akışını üretmek için bir lüle iç şeklinin tasarımının ayrıntılı bir dizi analitik hesaplamayı gerektirdiği açıktır [3].

Süpersonik lüle profilleri, boğazdaki bilinen şartlardan, arzu edilen çıkış koşullarına kadar akışı genişleten ve döndüren bir dalga seti bularak tespit edilir. Yakınsak kısmı ve boğazdaki konturun, genel olarak hesaplamaların başlangıç noktası olan sonik profilin kesin şeklini belirler. Lüle tasarımlarının performansını analiz etmek ve doğrulamak için süpersonik akış modeli deneyleri ve bilgisayar destekli analiz programları kullanılmıştır. Diğer mühendislik kriterleri, azami yüzey alanı veya tek yönlü çıkış akımı ile minimum uzunluk maksimum itme gibi spesifik sonuçtaki konturu da tanımlar. Karakteristikler Metodu yöntemiyle düzlemsel iki boyutlu lülenin oluşturulmasına ilişkin genel adımları A. E. Puckett'in Metodu, ileriki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte,

tasarımların Puckett tarafından açıklanan iki boyutlu lülenin aksine, eksenel simetrik, her iki düzlemde aynı anda karmaşık bir çözümü gerektirir [4].

Koordinat düzleminde karakteristik olmayan bir eğri boyunca birçok noktada hız değerleri fiziki ve hodografik düzlemlerde karakteristik eğriler tarafından verilen eğimleri kullanarak, piramit şeklinde, bitişik iki noktayı kullanarak çevresindeki akış deseni belirlenir. Metodun özel uyarlamaları, akışın katı veya simetrik sınırları ile ilgilenmesine izin verir. Shaprio'nun Karakteristik Teori ve yöntemin uygulanması hakkında kapsamlı bir çalışma yapmıştır [5].

Crown'a (1948) göre, başlangıç eğrisinin yaklaşımı, Puckett (1946) ve Foelsh yöntemlerine dayanan tasarımlarda güvenilir sonuçlar gösterdiği üçüncü dereceden denklem ile verilebilir. Bu durumda, geometri her noktada x değişkeni, sapma açısı bükülme noktasının, profil ve boğazın yarım yüksekliğindeki konumu. Bu hesaplama aşamasında, yapılan tasarımın asıl amacına ulaşmak çok önemlidir ve dolayısıyla artan dx , köşelerden kaynaklanan güçlü genişleme dalgalanmalarını önlemek için pürüzsüz bir profil tasarımı yapılması gerektiği çalışmada açıklamıştır [6].

R. E. Wilson sınır tabaka büyümesinin hesaplanması için yöntemler detaylı olarak tarif edilmiştir. Süpersonik lüle profili tasarımını etkileyen ek faktörler olduğuna dikkat edilmelidir. Lülenin enine kesitindeki akışkan çoğunlukla yüksek hızda hareket eder. Çeperde hızın sıfır olduğu ve bu geçişin sınır tabakası olarak adlandırılan çok dar bir bölgede türbülanslı bir akışla gerçekleştiği analizlerde karşılaşılan bir durumdur. Sınır tabaka özellikleri küçük boyutlu süpersonik lüleler için ince olabilse de önemsiz değildir herhangi bir eksenel kesitteki lüle çapı sınır katmanını hesaba katmak için sınır tabakası kalınlığı kadar arttırılmalıdır. Lülenin ıraksak kısmı ne kadar uzatılırsa sınır tabakanın o kadar büyüdüğü R. E. Wilson çalışmasında detaylı olarak tarif edilmiştir [7].

Sinyarev ve Doborovolskii Zhidko Stek Rakeme Drigateli, (1957) yayınında farklı bölümleri için konik ve küresel yarıçaplı yüzeylerin bir kombinasyonunu kullanan yüksek derecede genişleme ile Rus yapımı orta ve yüksek güçlü roket motorlarında kullanılan lüle hakkında herhangi bir ayrıntı belirtmeksizin tarif eder [8].

G. V. R. Rao 'nin çalışması, sesüstü lüle tasarımlarının geliştirilmesinde metodunu kendi çözümünün bir parçası olarak kullandı. Rao, sabit uzunlukta bir lülenin optimum itilmesi için bir konturlu lüle tasarlama yöntemi geliştirdi. Rao'nun çözümü, Lagrangian

çarpanları ve Karakteristikler Metodu'nun bir kombinasyonunu kullandı Rao'nun lüle konturunu elde etme metodu, boğaz geometrisini oluşturarak başlar. Bu, sesaltı ve sesüstü yarıçapı iki benzersiz değer olarak ayarlar. Sesaltı kısım yarıçapı, lülenin boğazında büyük ölçüde süpersonik akışa izin verecek şekilde ayarlanır ve daha sonra Sauer'in çözümü temel alınarak elde edilmiştir. G. V. R. Rao, optimum itme kuvveti, lülenin Karakteristikler metoduna çok iyi uyan parabolik bir lüle konturunu tanımlamıştır [9].

Bergman J., Zimmermann S, Wilden J., Schwenk A.,Landes K..[10] çalışmasında, elektrik ark spreyiyle yüzey kaplama işlemlerinde süpersonik lüle ile silindirik lüle çalışma şartları birbirleriyle mukayese etmiştir.

Kısaca ark spray sisteminin çalışma prensibi, iki adet karşıt yükle yüklenmiş olan metal telin temas noktasında oluşan ark ile birbirlerini eritir. Ergimiş metalleri homojen bir şekilde hedef yüzeye püskürtmek için sıkıştırılmış hava kullanılır. Bu şekilde püskürtülen yüzeyin korozyondan izole edilmiş olunur [10].

Lee M. W., Park J. J. ve diğerleri [11] çalışmasında, subsonik ve süpersonik hız elde edilmiş iki farklı lüle için titanyumdioksit film kaplaması püskürtücülerinde kullanılmıştır. Çalışmada iki farklı lülenin kullanıldığı yüzeyler elektron mikroskopuyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre süpersonik lülede daha homojen bir dağılımın sağlandığı görülmüştür.

Chang P. ve Bai B. [12] çalışmasında, doğalgaz kuyusunda biriken suyu süpersonik lüle vasıtasıyla atomize ederek mikro damlacıklara ayırarak uzaklaştırılması üzerine deneysel ve sayısal araştırmayı içermektedir. Sonuç olarak bu çalışmada, üç farklı doğalgaz kuyusunu tepkileri değerlendirilerek yapılan bir yıllık saha testi sonucunda süpersonik lüle kullanılan doğalgaz kuyularında verimli bir şekilde gaz üretilmesine ve gaz kuyularının kapanması problemine çözüm sağlamıştır.

Wu J. ve New T. H. [13] çalışmasında, değişik çıkış eğim açlarına sahip yakınsak-ıraksak lülelerdeki şok dalgalarının incelenmesi üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında, ayrıca basit dairesel kesitli bir yakınsak - ıraksak lülede şok dalgasız bir akış elde etmek için yakınsak - ıraksak lülelerde geleneksel olarak kullanılan Karakteristikler Metodunu kullanılmış ve geçiş bölümünde değişik yarıçap değerleri kullanılarak optimize çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada; lülede oluşan şok dalgalarının en aza indirildiği ve bu sayede gürültü kirliliğini de azalttığı gözlemlenmiştir.

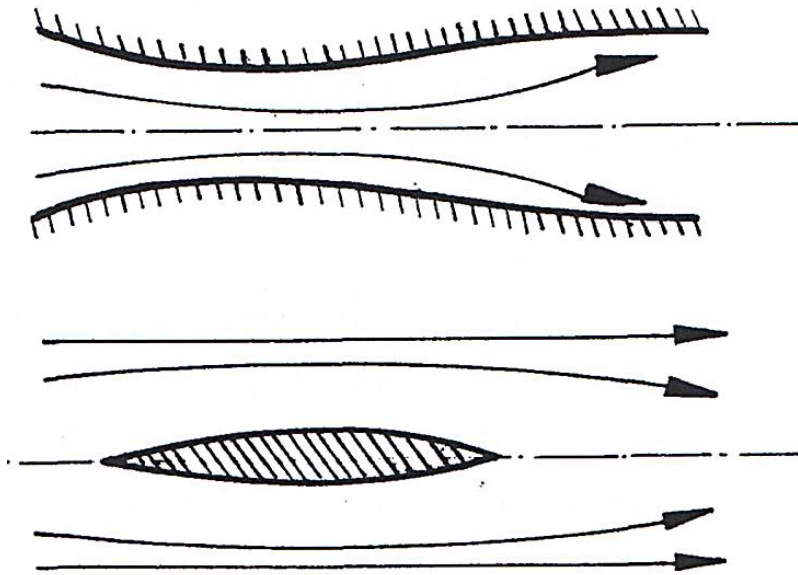
2. SIKIŞTIRILABİLİR AKIŞ

2.1. Kanal ve Lülelerde Bir Boyutlu Akışlar Hakkında Genel Bilgi

Hareket halindeki bir akışkan kütlesi düşünüldüğünde, eğer akışkan özellikleri belli bir doğrultuda, diğerine nazaran çok büyük ölçülerde değişmelere uğruyorsa bu hareket bir boyutlu akım olarak adlandırılır. Yani bir tek parametreye bağlı olarak belirlenebilen akışkan hareketleri bir boyutlu akımlardır. Lüle ve kanallar içindeki akım bir boyutlu akımlara verilebilecek en iyi örneklerdir. 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 prensibiyle çalışılır [14].

Bilindiği gibi rüzgâr tüneli belirli akım çizgilerinin teşkil ettiği, genellikle değişken kesitli eğrisel bir borudur. En önemli özelliği bir dik kesiti içinde akımda ortaya çıkan toplam değişikliklerin, uzunlamasına meydana gelen değişikliklere nazaran ihmal edilebilir mertebede olmasıdır. Bu yüzden her kesitteki akım ve akışkan özellikleri bir tek değere sahip yani üniform kabul edilebilir.

Burada yapılan çalışmalarda kolaylığı sağlamak amacı ile akışkanın termodinamik ve kinematik olarak ideal olduğu ve sıkışmanın adyabatik olduğu kabul edilecektir. Şekil 2.1.'de kanal ve lülelerde bir boyutlu akımlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir Boyutlu Akımlar [14].

2.2. Sıkıştırılabilir Akış

Sıkıştırılabilir akış “değişken yoğunluklu akış” olarak da tanımlanır. V hacmindeki akışkan elemanına çevre akışkan tarafından P basıncında dP miktarında artış olduğunda, akışkan hacminde $-dV$ kadar azalma varsa, sıkıştırılabilirlik, eşitlik (2.1) ‘deki gibi tanımlanabilir.

$$\tau = \frac{-dV/V}{dP} \quad (2.1)$$

Sıkıştırılabilirlik, basınçtaki birim değişime karşılık hacimdeki oransal değişim miktarıdır. Buradaki τ büyüklüğünün tersi literatürde genellikle Bulk Elastisite Modülü olarak tanımlanır. Eğer sıkışma esnasında gaz sıcaklığı sabit tutulabiliyorsa, buna izotermal sıkıştırılabilirlik denir.

$$\tau = \frac{-dV/V}{dP} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad \left(\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}, \quad V = \frac{1}{\rho}, \quad dV = -\frac{d\rho}{\rho^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \rightarrow d\rho = \rho \cdot \tau \cdot dP \quad (2.3)$$

Akışkanın hareketi çoğu zaman basınç farkıyla oluşur. Yüksek hızlı akımlarda dP basınç farkı da yüksek olacaktır.

Bir sıvı akışında, basınç farkı dP büyük olsa bile, sıkıştırılabilirlik (τ) küçük olduğundan yoğunluk değişimi de küçüktür. Akım sıkıştırılmaz kabul edilebilir.

Gaz akımında ise, sıkıştırılabilirlik (τ) büyüktür. Yoğunluk değişimi de büyük olur. Bu bakımdan akış sıkıştırılmaz kabul edilemez. Ancak Mach sayısı 0.3 ‘den küçük olması halinde basınç değişimleri küçük olur. Yoğunluk değişimleri de küçük kalır ve akım sıkıştırılmaz kabul edilebilir.

2.3. Ses Hızı ve Mach Sayısı

Akışkan kütlesi içerisinde alınan herhangi bir noktada, akışkanın hızı aynı noktada ölçülen sesin yayılma hızından daha küçükse, basınç dalgaları ortam içerisinde akış yönünde veya akış yönüne ters yönde yayılabilir. Buna karşılık akışkanın hızı aynı noktadaki sesin yayılma hızından büyük ise, basınç dalgalarının akış yönüne ters yönde

yayımları olanağı yoktur. Bu iki halde akış tamamen değişik karakterde görülür. Bu nedenle akışkan hızının ses hızına oranına Mach sayısı denir [15].

$$M = \frac{V}{C} \quad (2.4)$$

Mach sayısı eşitlik (2.4) şeklinde tanımlanır. Mach sayısı akışın karakterini belirleyen çok önemli bir parametreyi oluşturur.

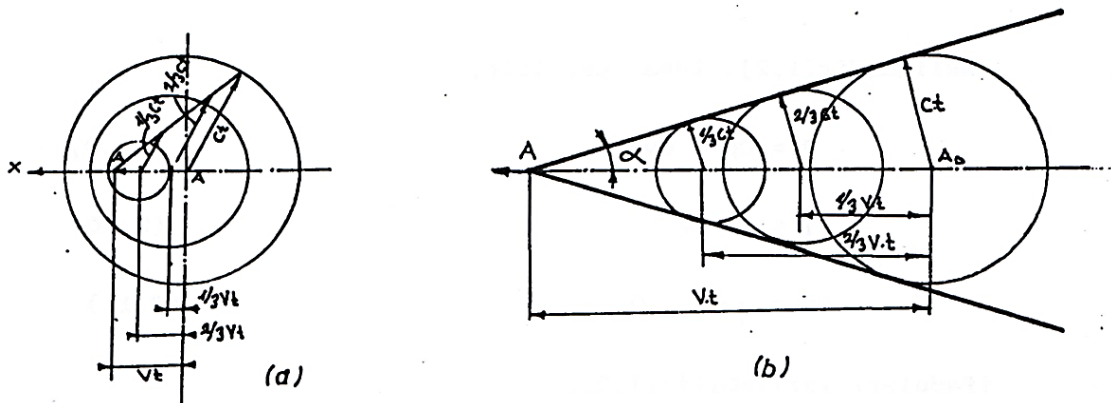
Akışın çok küçük genlikli basınç dalgalarından nasıl etkilendiğini görebilmek için, hareket etmeyen homojen ortam içerisinde, çok küçük bir cismin sabit hızla doğrusal olarak yer değiştirdiğini varsayalım.

Ortam içinde düzensizlik kaynağı oluşturan cisim, $t = 0$ anında A_0 noktasında bulunsun. Bu anda, A_0 noktasından her yönde c hızı ile yayılan bir dalga, t kadar zaman sonra yarıçapı,

$$\text{Yarıçap} = c.t$$

olan küre yüzeyini oluşturur. Buna karşılık cisim ortam içerisinde $V.t$ kadar ilerlemiştir.

$M < 1$ ise ses altı (subsonik) akış söz konusudur. Cismin herhangi bir noktada oluşturduğu düzensizlik, cismin yol üzerinde bulunan bir A noktasından cisimden önce geçer ve meydana gelen bütün dalgalar birbirlerinin içerisinde kalır. (Şekil 2.2.(a)) Dolayısıyla cismin ön tarafında bulunan bir kimse cismin yaklaştığını önceden hissedebilir.



Şekil 2.2. Hareket eden bir tedirginlik kaynağında meydana gelen doğruların yayılışı (a) $M < 1$ durumu (b) $M > 1$ durumu [15].

$M > 1$ ise ses üstü (süpersonik) akış söz konusudur. t zamanı içerisinde cisim $A_0 - A$ yolunu alır. Bu yol üzerinde cisim tarafından oluşturulan bütün küresel dalgalar cismi tepe noktası olarak kabul eden ve tepe açısı 2α olan bir koniye teğet olur. (Şekil.2.2.b) Bu durumda;

$$\sin \alpha = \frac{c \cdot t}{V \cdot t} = \frac{1}{M} \quad (2.5)$$

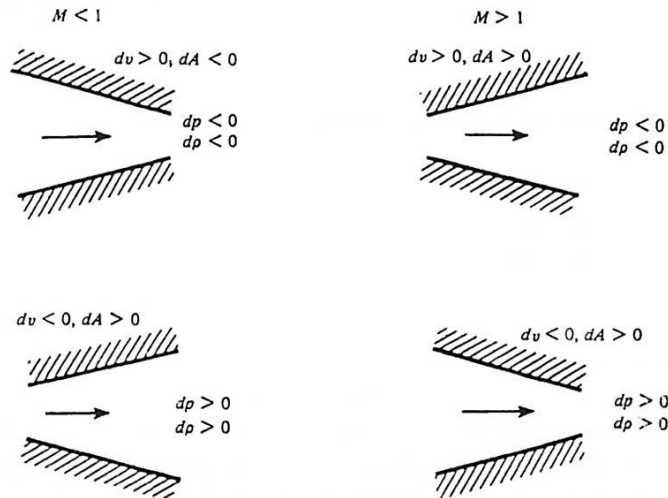
yazılabilir [15]. Koniye Mach konisi, α açısına Mach açısı adı verilir. Cismin hızı ne kadar artarsa α açısında o kadar küçülür.

$M = 1$ için $\sin \alpha = 1$ değerini alır. Dolayısıyla koni cisimle birlikte hareket eden ve cismin yörüngesine dik olan bir düzlem halini alır.

2.4. Hugoniot Teoremi

Hugoniot teorisi lüle ve difüzörlerde akım çeşidine bağlı olarak hız ve basıncın değişimini göstermektedir ve eşitlik (2.6) şeklinde ifade edilmektedir. Hugoniot denkleminin şematik olarak açıklaması Şekil 2.3.'de verilmiştir. Buradaki yakınsak kanallara lüle, ıraksak kanallara difüzör denir [16].

$$\frac{dA}{A} = -(1 - M^2) \cdot \frac{dU}{U} \quad (2.6)$$



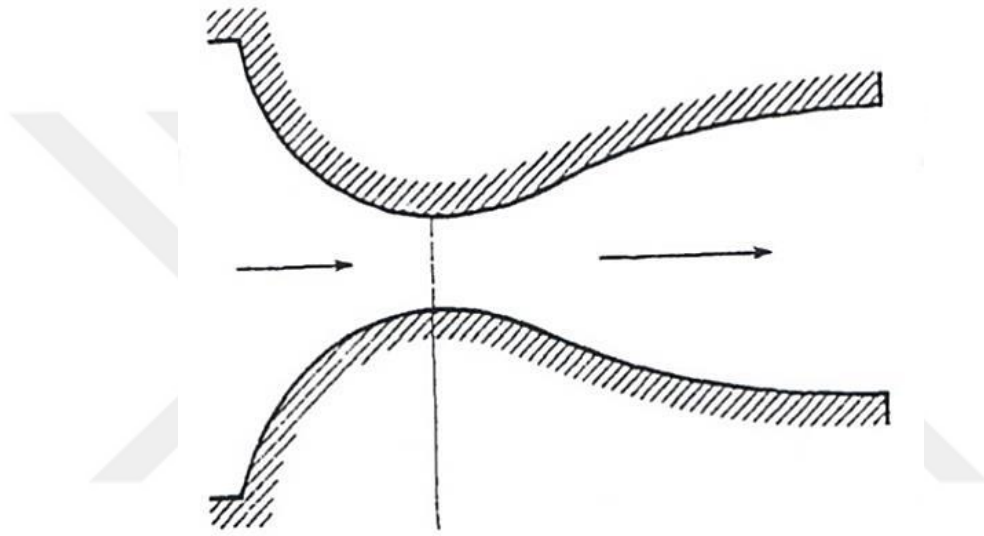
Şekil 2.3. Hugoniot teoremi [16].

$M < 1$ ise, akımın ivmelenmesi yani hızın artması için kesit alanı azalmaktadır. Böylece kanal kesiti 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.

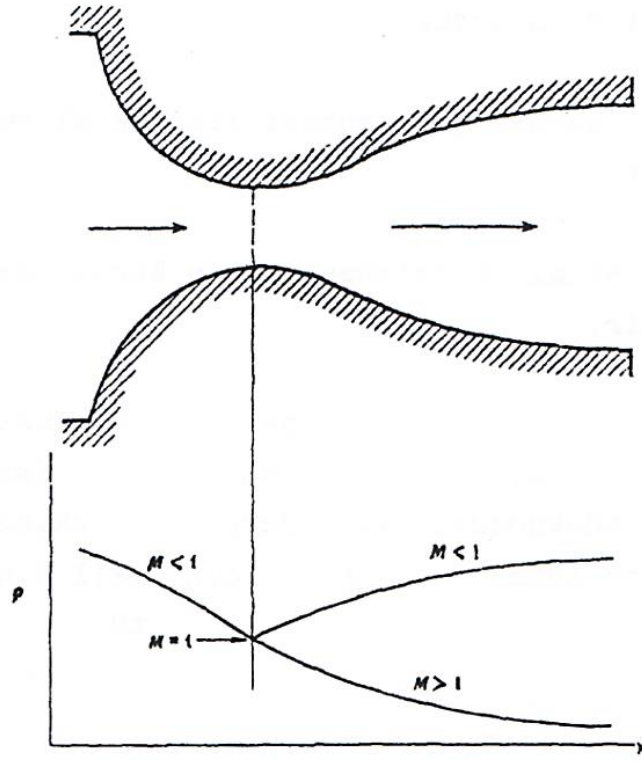
$M > 1$ ise, akımın frenlenmesi için kanal kesit alanının azalması gerekir.



Şekil 2.4. Yakınsak - Iraksak lüle [16].

Normal şok dalgasının oluşabilmesi, hızlanma kesitinin sırası ile önce daraltılması, sonra genişletilmesiyle mümkündür. Yani durgun bir akışkan kütlelerinin sesüstü hızlara ivmelendirilmesi için, Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi, ses altı bölgede yakınsayan ve ses üstü bölgede iraksayan bir lüleyi kat etmesi gerekmektedir. Açıkça aradaki minimum kesitte $M = 1$ olacaktır.

Boğaz noktası olan $M = 1$ değerinden sonra iki çözüm vardır. Şekil 2.5.'de görüleceği, gibi bunlardan biri sesaltı diğeri sesüstü akıştır.



Şekil 2.5. Lüle boyunca basınç değişimi [16].

2.5. İzentropik Akış

Bazı sürekli akışlı açık sistemlerde (türbin, pompa, kompresör, nozul, difüzör gibi) termodinamik açıdan tersinir-adyabat çalışma imkânı olmayabilir. Sistemdeki tersinmezliği minimum düzeyde tutabilmek için iç şartlarda meydana gelen tersinmezliğe müdahale imkânı olmayabilir. Bu durumda tersinmezliği minimum düzeyde tutacak şekilde bazı sistemlerde gerekli önlemler alınabilir. Sürekli akışlı açık sistem şartlarında çalışan türbin, pompa, kompresör, nozul, difüzör gibi bazı sistemlerde, sınırdaki yalıtım uygulanarak sistemin adyabat çalışması sağlanabilir. Böylece sistem ve çevresi arasındaki ısı transferi nedeniyle meydana gelen tersinmezlik önlenir.

Adyabat çalışma şartları ideal çalışma tersinir-adyabat çalışma düzenine yakın bir çalışma ile sistemdeki tersinmezlik azaltılabilir. Ancak termodinamik sistemlerin büyük bölümünde bu uygulamayı yapmak mümkün olamaz. Sadece bazı sürekli akışlı açık sistemlerde sınırdaki yalıtım veya sistemde ısı transferi çok az ise sistemi adyabatik kabul ederek sistem ve çevresi arasındaki yok olan ekserji miktarı elimine edilebilir.

Bu tip adyabat çalışabilecek sürekli akışlı açık sistemler ile ideal çalışma düzeni diye adlandırılan tersinir-adyabat çalışma düzeni arasındaki sapmayı belirlemek amacıyla tanımlanan parametreye izentropik (adyabatik) işlem verimi adı verilir.

İzentropik hal değişimi çevre ile ısı alışverişine imkan vermeyecek kadar hızlı yani adyabatik ve aynı zamanda viskozite ihmal edildiğine göre tersinir yani izentropik hal değişimini temsil etmektedir.

Termodinamiğin birinci kanunu [15],[17],

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$

Şeklindedir. İdeal gaz için,

$$R = c_p - c_v \quad (2.8)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

(2.9)

$$c_p = \frac{k}{k-1} \cdot R \quad (2.10)$$

ifadeleri yazılabilir. Eşitlik (2.7) ve (2.10) aracılığıyla,

$$V = \sqrt{2c_p \cdot (T_0 - T)} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0 - T)} \quad (2.11)$$

elde edilir. Eşitlik (2.11)'den maksimum hız yazılacak olursa,

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_0} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılır. T_0 sıcaklığındaki ses hızında,

$$c_0 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_0} \quad (2.13)$$

formunda elde edilir. Enerji eşitliği tekrar yazılacak olursa,

$$V^2 + 2c_p T = 2c_p T_0 = \text{sabit} \quad (2.14)$$

Bu eşitliğe (2.10) eşitliğine taşınırsa,

$$V^2 + 2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T = 2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_0 = \text{sabit} \quad (2.15)$$

Eşitliğine ulaşılır. Ses hızının tanımından,

$$c = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (2.16)$$

yine eşitlik (2.13) aracılığıyla,

$$V^2 + \frac{2}{k-1} \cdot c^2 = \frac{2}{k-1} \cdot c_0^2 = V_{\max}^2 \quad (2.17)$$

eşitliği elde edilir.

2.5.1. İdeal Gazın İzentropik Akıştaki Özellikleri

Akışın izentropik olmasından dolayı mükemmel gazın izentropik işlemlerinden Termodinamiğin II. Kanunu [18],

$$s - s_0 = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.18)$$

$$s - s_0 = c_v \cdot \ln \frac{T}{T_0} + R \cdot \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2.19)$$

İzentropik proseste, $ds = 0$ alınarak,

$$c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} = R \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.20)$$

$$c_v \cdot \ln \frac{T}{T_0} = -R \cdot \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2.21)$$

(2.20) ve (2.21) eşitliklerinden,

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{c_p}{R}}, \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{c_v}{R}} \quad (2.22)$$

(2.22) eşitlikleri kullanılarak ve bu işlemin devamında,

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k \quad (2.23)$$

ve

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.24)$$

eşitlikleri geçerlidir.

Termodinamiğin birinci kanunu eşitlik (2.14)'daki formundan yararlanarak [18],

$$V^2 + 2c_p T = 2c_p T_0 = \text{sabit} \quad (2.25)$$

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \frac{V^2}{2 \cdot c_p \cdot T} \quad (2.26)$$

eşitliğine ulaşılır. Ayrıca,

$$c_p = \frac{k \cdot R}{k-1} \quad \text{ve} \quad c^2 = k \cdot R \cdot T$$

alınarak,

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{V^2}{c^2} = 1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \quad (2.27)$$

Mükemmel gazın izentropik akışı ile ilgili (2.24) eşitliğine (2.27) eşitliğini taşıyıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.28)$$

eşitliği elde edilir. Ayrıca (2.23) eşitliğine (2.28) eşitliğine yerine koyup düzenleme yapılırsa,

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (2.29)$$

eşitliği elde edilir. Mach sayısı 1 olduğu durumdaki gazın değişkenleri kritik değişkenler olarak isimlendirilir ve yukarıda bulunan (2.27), (2.28) ve (2.29) eşitliklerinde $M = 1$ yazılarak kritik değişkenler,

$$\frac{P^*}{P_0} = \frac{c^{*2}}{c_0^2} = \frac{2}{k+1} \quad (2.30)$$

$$\frac{T^*}{T_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.31)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (2.32)$$

eşitlikler aracılığıyla bulunur [18].

2.5.2. Kütle Akışı

Akışkanların akışıyla ilgili süreklilik denklemi,

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (2.33)$$

ile ifade edilir ve bu eşitlik aracılığıyla birim alanda geçen kütle miktarı,

$$G = \frac{\dot{m}}{A}$$

ile ifade edilirse,

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho \cdot V$$

mükemmel gazla ilgili,

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad \text{ve} \quad c = \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

özelliklerinden yararlanarak,

$$G = P \cdot \left(\frac{V}{c} \right) \cdot \frac{k}{R \cdot T} \quad (2.34)$$

olarak yazılır. P ve T (2.27) ve (2.28) eşitliklerinden elde edilerek (2.34) eşitliğinde yerine yazılıp düzenleme yapılırsa,

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{M}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}}} \quad (2.35)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte $M = 1$ taşınırsa kritik kesitin birim alandan birim zamanda geçen akışkan miktarı için,

$$G^* = \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)_{\max} = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{P}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{(k-1)}}} \quad (2.36)$$

Böylece A^* alanı izentropik akış için sabittir. (2.36) eşitliğinde mükemmel gaz için $k = 1.4$ ve $R = 287.04 \text{ J/kgK}$ bilgilerinden,

$$G^* = \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)_{\max} = 0.04042 \cdot \frac{P}{\sqrt{T_0}} \quad (2.37)$$

elde edilir. Burada $\dot{m}$ (kg/s), A (m²), P_0 (Pa) ve T_0 (K) eşitlik (2.35) ve (2.36) eşitliklerini birbirine oranlayacak olunursa,

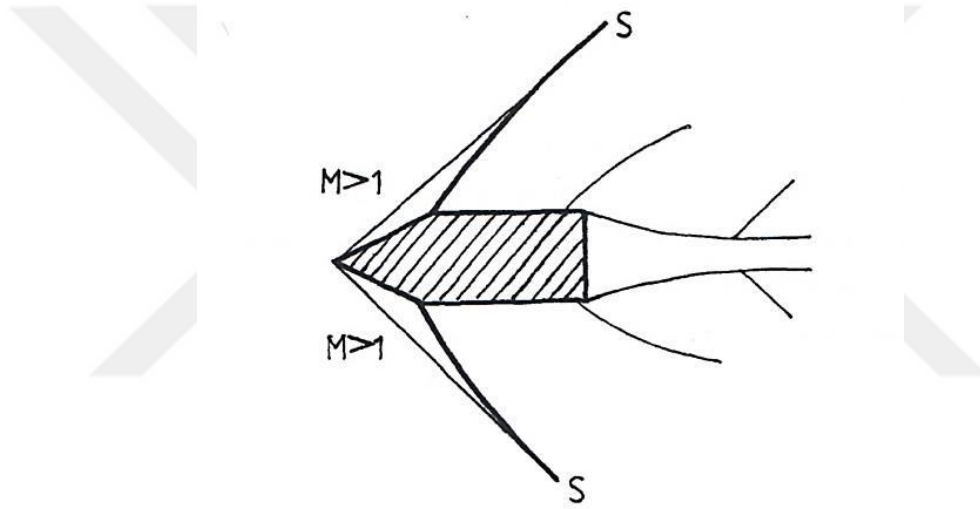
$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \cdot \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}} \quad (2.38)$$

elde edilir [15]. Bulunan bu oranlar Mach sayısına bağlı olarak ekler bölümünde verilmiştir.

2.6. Şok Dalgaları

Duran bir cisim etrafındaki akım veya hareketsiz bir akışkan içerisinde hareket eden bir cisimden oluşan sistem incelendiğinde, katı cisimle akışkanın teması sonucunda düzensizlikler meydana gelir. Bu düzensizlikler lineer veya nonlineer olabilir. Lineer düzensizliklerde süreksizliğe rastlanmaz. Nonlineer dalgalar süreksizlik oluşturur bunlara şok dalgaları adı verilir.

Şekilde ses üstü hızla hareket eden bir cisim etrafındaki akım gölge fotoğrafına bakılarak çizilmiştir [14].



Şekil 2.6. Şok dalgasının oluşum fotoğrafı [14].

Şekildeki SS çizgisine ait çok dar bölgede akışkan yoğunluğu çevreye nazaran o kadar yüksektir ki, bu bölgeye gelen ışınlar siyah bir leke olarak görülmektedir. SS üzerindeki basınçlar ani olarak yükselmekte ve dolayısıyla cisimle hareket eden bir ses dalgası oluşturmaktadır. Bu olayın izahı için Mach dalgalarından yararlanılır. Hareket başlangıcında sonsuz küçük genlikli basınç dalgası, düzensizliğin olmadığı ortam içerisinde ses hızı ile yayılmaya başlar.

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 her biri, birinci dalgaya yetişerek, ortam içerisinde, ses hızından daha büyük bir hızla ilerleyen dik ve keskin bir süreksizlik oluşturur.

Süreksizliğin neden olduğu basınç artışı ne kadar fazla ise, yayılma hızı da o kadar büyüktür. Şok dalgasını kat eden akışkan özelliklerinde sonlu değişimler, süreksizlikler meydana gelmesi yüzünden bu dar bölgede hal değişimleri artık tersinir kabul edilemez. Neticede, termodinamiğin ikinci kanunu dolayısıyla, her şok dalgası kendisini kat eden akışkanın entropisinde belli bir artışa sebep olur.

Bir akış alanı içerisinde akış yönüne dik bir düzlem içerisinde oluşan şok dalgalarına “Normal şok dalgası” denir. Böyle dalgalara yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünde veya küt burunlu cisimlerin ön tarafında rastlanabilir. Şok başlamadan evvel, akışkan özelliklerindeki ani değişim, şok sürecinin tersinmez olduğunu göstermektedir.

Akışkanın entropisindeki artmanın başlıca nedeni, şok düzlemi aracılığıyla iletilen ısıdır. Şok tarafından sıkıştırılan ve sıcaklığı artan gaz kütlesi şok düzlemini ısıtır. Dolayısıyla, şokun iki tarafındaki durma noktası sıcaklığının aynı kalmasına ($T_{01} = T_{02}$) rağmen, durma noktası basıncında az bir değişim olacaktır [16].

$$M_2 = \left[\frac{1 + M_1^2 \cdot \frac{(k-1)}{2}}{k \cdot M_1^2 - \frac{(k-1)}{2}} \right]^{1/2} \quad (2.39)$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[\frac{M_1^2 \cdot \frac{(k+1)}{2}}{1 + M_1^2 \cdot \frac{(k-1)}{2}} \right]^{k/k-1} \cdot \left[\frac{2k}{k+1} \cdot M_1^2 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \right]^{-1/k-1} \quad (2.40)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2k}{k+1} \cdot M_1^2 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \quad (2.41)$$

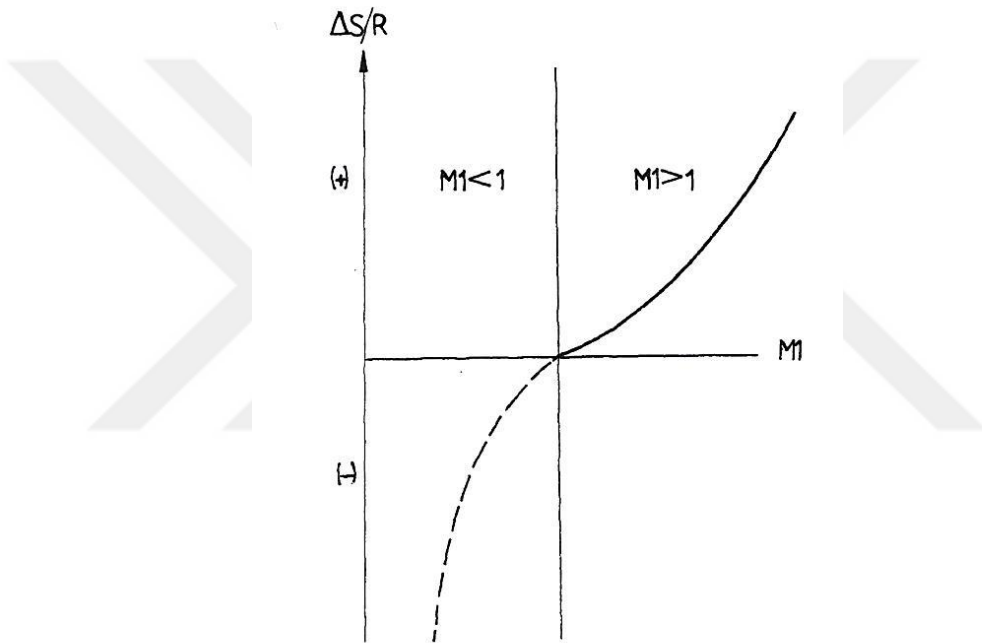
Normal bir şok dalgasının oluşabilmesi için akımın önce sesüstü olması, şoktan sonra yine sesaltı bir akıma dönüşmesi gerekir. Bu olayı eşitlik (2.42) da verilen Prandtl bağıntısı açıklamaktadır. Bu bağıntıya göre normal şokun önündeki ve arkasındaki akışkan hızlarının çarpımı kritik ses hızının karesine eşittir [16].

$$U_1 \cdot U_2 = k \cdot R \cdot T \quad (2.42)$$

Prandtl bağıntısına göre, şayet akım başlangıçta ses altı ise şoktan sonra ses üstü, başlangıçta ses üstü ise şoktan sonra ses altı olacağını gösterir. Fakat bu fikirlerin doğru

olması termodinamiğin ikinci kanunu ile çelişkiye düştüğü için mümkün değildir. Eşitlik (2.43)'den hareketle Şekil 2.7 'de verilen grafik çizilmiştir [16].

$$\frac{\Delta S}{R} = -\ln \frac{\left[\frac{M_1^2 \cdot (k+1)}{1 + M_1^2 \cdot \frac{(k-1)}{2}} \right]^{\frac{k}{k-1}}}{\left[\frac{M_1^2 \cdot 2k}{k+1} - \frac{k-1}{k+1} \right]^{\frac{1}{k-1}}} \quad (2.43)$$



Şekil 2.7. Entropi Ma_1 ile değişimi [16].

Buradan görülebileceği gibi $Ma_1 < 1$ durumundaki entropi azalması oluşmaktadır. Buda bize şok dalgasının oluşabilmesi için başlangıçta akımın sesüstü olması gerektiğini anlatır ve bu olay tersinmez bir olaydır. Yani bu dalgaları geçerken akım izentropik değildir. Ancak zayıf şok dalgaları halinde, yani P_2/P_1 durumunda akış izentropik kabul edilebilir.

2.7. 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 $\dot{m}$ debisine sahip akışkanı P_e basıncına kadar adyabatik ve sürtünmesiz olarak hızlandırmak için gerekli lüle geometrisinin tayini şu şekilde olur.

$M_e < 1$ için lüle basit bir yakınsak lüledir ve sadece A_e çıkış alanını hesaplamak yeterli olacaktır. $M_e > 1$ için yakınsak-ıraksak kanal elde edilmeli ve A_e çıkış alanı ile birlikte A_t boğaz kesiti alanı bulunmalıdır. İlk önce M_e değerine bağlı olarak (2.44) eşitliğinden A_e/A^* isentropik alanı hesaplanır. Ve eğer $\dot{m}$, P_0 ve T_0 biliniyorsa A_e kesiti (2.45) eşitliğinden bulunur [16].

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{M_e} \cdot \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_e^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}} \quad (2.44)$$

$$\frac{\dot{m}}{A_e} = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{R}} \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{k-1}} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

A_t boğaz kesiti alanı ise (2.46) eşitliğinde A^*/A_e ve A_e değerlerinin yerine konması ile bulunur [16].

$$A_t = A_e \cdot \left(\frac{A^*}{A_e} \right) \quad (2.46)$$

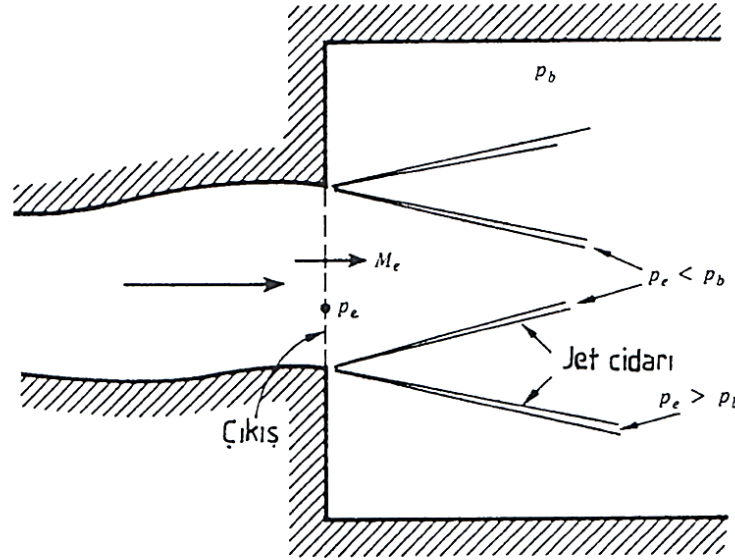
2.7.1. Lüle Çıkış Basıncına Ortam Basıncının Tesiri

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

$M_e < 1$ ise $P_e = P_b$ olmalıdır [16].

$M_e \approx 1$ veya $M_e > 1$ ise $P_e \neq P_b$ olabilir.

Şekil 2.8’de 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 akışkanı sıkıştırarak, akım alanını daraltacaktır.



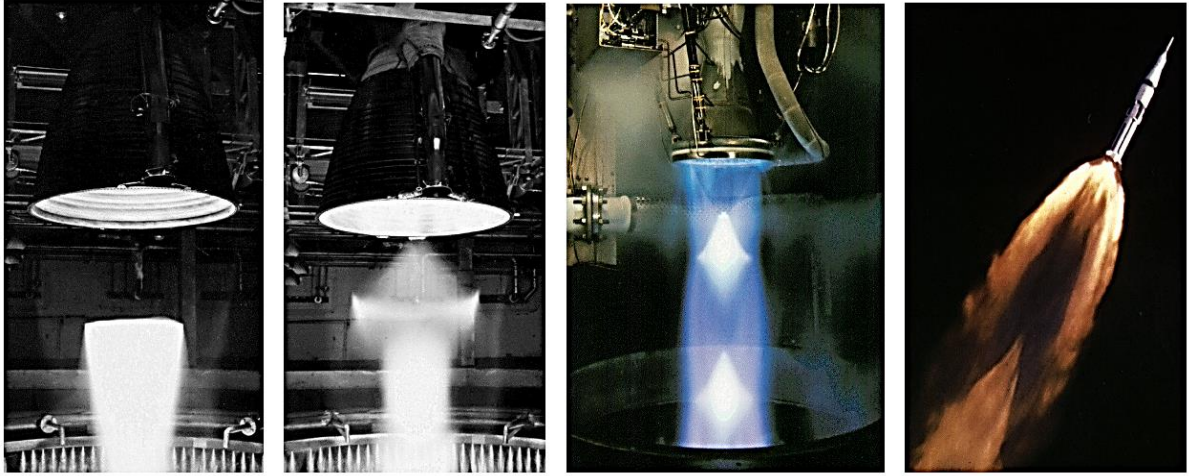
Şekil 2.8. P_e çıkış basıncının P_b ortam basıncına tesiri [16].

Birinci halde yani $M_e < 1$ durumunda ise; $P_e > P_b$ olursa akım alanı çıkış düzleminde sonra basıncın artmasına yol açacaktır. Bu ise jet basıncının daha küçük ortam basıncına uymasına ters düşecektir. $P_e < P_b$ olması halinde çıkış düzleminde sonra akım ivmelenerek ve P_e 'nin P_b 'den daha da küçük olmasına yol açacaktır. Bu da $P_e = P_b$ prensibine ters düşer. Sonuç olarak; $M_e < 1$ için fiziki olarak çözüm akışın çıkışta $P_e = P_b$ şartına uygun olarak lüleyi terk etmesidir. O halde bu durum için ortam basıncı çıkış düzlemindeki akış üzerine tesir eder. $M_e > 1$ için ise $P_e = P_b$ olması gerekmez. Yani bu durum için çıkış basıncına ortam basıncının direk tesiri yoktur.

2.7.2. Yakınsak–İraksak Lüleler

Lüle kelime anlamı itibariyle akış yönünde kesiti küçülen akış kanalları akla gelir. Oysaki yakınsak lüledeki bir akışkanın çıkarılabileceği en yüksek hız, lülenin çıkış düzleminde oluşan ses hızı ile sınırlıdır. Akışkanın sesüstü hızlara çıkarılabilmesi için boğazdaki sesaltı lüleye sadece iraksak akış kısmı eklenerek gerçekleştirilebilir. Bu şekilde

ortaya çıkan birleşik akış bölümlü bir yakınsak-ıraksak lüledir ve sesüstü uçak ve füzelerde yüksek itme gücünden yararlanabilen standart bir donanımdır. (Şekil 2.9)

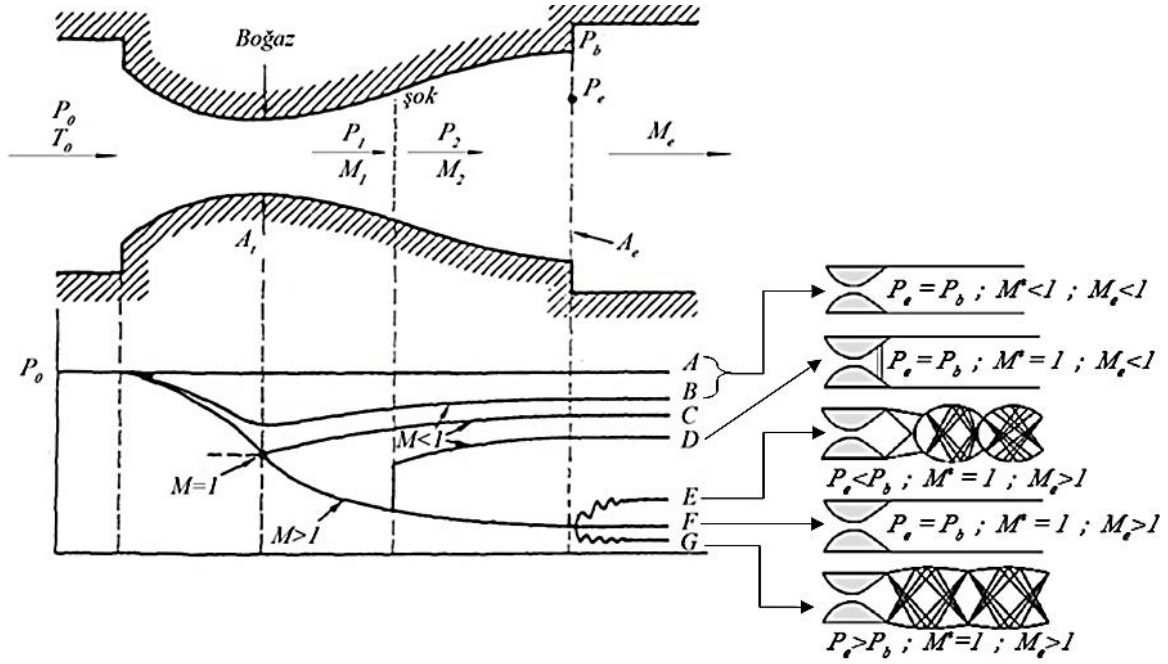


Şekil 2.9. Yakınsak-ıraksak lüleler, roket motorlarında yüksek itiş sağlamak için kullanılır [19].

Bir akışkanı yakınsak-ıraksak lüleden akışına zorlamak, o akışkanın sesüstü hızı ivmeleneyeceğini garanti etmez. Eğer karşı basınç doğru aralıkta değilse akışkan akışkan yakınsak kısımda hızlanmak yerine yavaşlama eğiliminde olabilir. Burada karşı basınçtan kasıt akışın çıkışında akışkanı karşılayan basınçtır. Lüledeki akışın hali toplam basınç oranı P_b/P_0 ile belirlenir. Dolayısıyla verilen giriş şartlarında yakınsak-ıraksak lüledeki akış, karşı basınç tarafından tayin edilir. Şekil 2.10.'da gösterilen yakınsak ıraksak lüle ele alınacak olursa;

Yakınsak-ıraksak lülelerde minimum bir lüle kesit alanı olduğu için sesüstü akım oluşabilir ve şok dalgasının oluşma ihtimali vardır. A_t kesitindeki en büyük debi $\dot{m}_c$ ile gösterilmekte ve (2.47) eşitliği hesaplanmaktadır [16].

$$\frac{\dot{m}_c^*}{A_t} = \frac{P_{01}}{T_0} \cdot \frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (2.47)$$



Şekil 2.10. Yakınsak-İraksak lülelerde karşı basıncın akış üzerindeki etkisi [20]

Şekil 2.10.'da akışkan yakınsak-ıraksak lüleye P_0 durma basıncında düşük hızlarla giriş yapmaktadır. $P_b = P_0$ (A durumu) ile gösterilen düz çizgi, basınç farkı olmadığı için ($P_b/P_0 = 1$) akış olayının başlamadığını göstermektedir. Bu durum beklenen bir durumdur çünkü lüledeki akış lüle girişi ile lüle çıkışı arasındaki basınç farkı tarafından oluşturulur. Karşı basınç düşürüldüğünde veya P_0 giriş basıncı yüksek değerler aldığı anda durumda yani $P_b/P_0 < 1$ olduğu zaman lülede akış başlar. Karşı basınç P_b düşürülünce ne olacağı aşağıdaki gibi yorumlanabilir [21]:

$P_0 > P_b > P_c$ şeklindeki C durumu, debinin boğaz kısmında henüz sonik akımı yakalayacak şekilde büyük bir değere ulaşmadığını gösterir. Lüle çıkışında da dolayısıyla sesaltı akış elde edildiği ve burada $\dot{m}/\dot{m}_c < 1$ ve $M < 1$ olup, lülenin ıraksak kısmında da $Ma < 1$ 'dir ve basınç artar. Bununla birlikte kazanılan hızın çoğu lülenin ıraksak kısmında kaybedilir. Basınç yakınsak kısmında düşer boğazda minimum değerine ulaşır. İraksak kısımda ise hızın düşüşe geçmesine bağlı olarak yükselir [21].

P_b karşı basıncı P_c basıncına eşit olduğu durumda ($P_b = P_c$) boğaz basıncı P^* 'a eşit olur ve boğazda ses hızına ulaşılır. Ancak lülenin ıraksak kısmı yayıcı gibi davranmaktadır ve akışkan ses altı hızlara yavaşlatmaktadır. P_b 'nin düşmesi ile artan kütleli debi de maksimum değerine ulaşmaktadır. P^* 'ın boğazda elde edilebilecek en düşük basınç olduğu ses hızının ise yakınsak lülede elde edilebilecek en yüksek hız olduğu bilinmelidir.

Dolayısıyla P_b karşı basıncın daha fazla düşürülmesinin lülenin yakınsak olduğu kısımdaki akış veya lüledeki kütleli debi üzerinde bir etkisi olmamaktadır. Ancak bu durum lülenin ıraksak olduğu kısımdaki akışın karakterini etkiler [21].

Şekil 2.10.'daki D durumuna karşılık gelen $P_C > P_b > P_E$ olduğu zaman boğazda ses hızına ulaşan akışkan, basınç düştükçe ıraksak kısımda ses üstü hızlara çıkmaya devam edecektir. Ancak boğaz ile çıkış düzlemi arasındaki herhangi bir yerde normal şok oluşmaya başlayacağından ivmelenme aniden duracaktır. Bu ise hızın aniden ses altı değerlerine inmesine ve basıncın aniden yükselmesine yol açar. Sonrasında lüle içinde oluşan bu normal şok akışkan yakınsak-ıraksak lülenin geri kalan kısmında, daha da yavaşlamasına sebep olacaktır. Şokun içinden geçen akış yüksek oranda tersinmezdir ve dolayısıyla izentropik olarak ele alınamaz bir durumdur. P_b düşürüldükçe normal şok boğazdan uzaklaşır ve P_b , P_E 'ye yaklaştıkça lülenin çıkış düzlemine yaklaşır. $P_b = P_E$ normal şok lülenin çıkışında oluşur. Bu durumda ıraksak kısmın tamamında akış ses üstüdür ve yaklaşık olarak izentropik alınabilir. Ancak akışkan normal şoktan geçerken tam lüleyi terk etmeden önce hızını ses altı seviyelere düşürür [21].

$P_C > P_b > P_F$ olduğunda lülede izentropik akım çözümü mümkün değildir. Aradaki bu ortam basınç oranı verecek bir P_b ortam basıncı için ya lüle içinde normal şok dalgası olacak ya da lüle dışında dış sıkışma şoku oluşacaktır. Bu durumda akış ıraksak kısma girişte sesüstü olacaktır. Şok lüle dışında olduğunda lüle içinde izentropik akış hali devam etmelidir, ancak etmeyebilir. Basınç P_b ortam basıncına ulaşır, bundan sonra sesüstü akış normal şok dalgasına maruz kalır ve akım sesaltı olur ve basıncı artar. A_e kesitindeki lüleyi $P_e = P_b$ olacak şekilde terk eder [21].

Çalışma basınç oranı ikinci kritik orandan daha az olduğu zaman şok dalgası lüle çıkış düzleminden dışarı doğru hareket eder ve lüle çıkış düzleminden dışarı doğru hareket eder ve lüle çıkışından sonra akım sesüstü olur. Bu durum E durumu ile gösterilmiştir. $P_E > P_b > 0$ olduğu durumda ıraksak kısımdaki akış ses üstüdür ve lülede normal şok oluşmaksızın akışkan lüle çıkışında P_F basıncına kadar genişler. Dolayısıyla lüledeki akış izentropik olarak düşünülebilir. $P_b > P_F$ olduğunda tersinmez karışma ve genişleme dalgaları lülenin çıkış düzleminde ortaya çıkar. Ancak $P_b > P_F$ olduğunda, akışkan basıncı, lüle çıkışının ardından tersinmez bir şekilde P_F 'den P_b 'ye yükselerek eğik şoklar oluşturur [21].

2.8. Yakınsak-İraksak Lüle Tasarımı ve Analiz Yöntemleri

2.8.1. Busemann Metodu

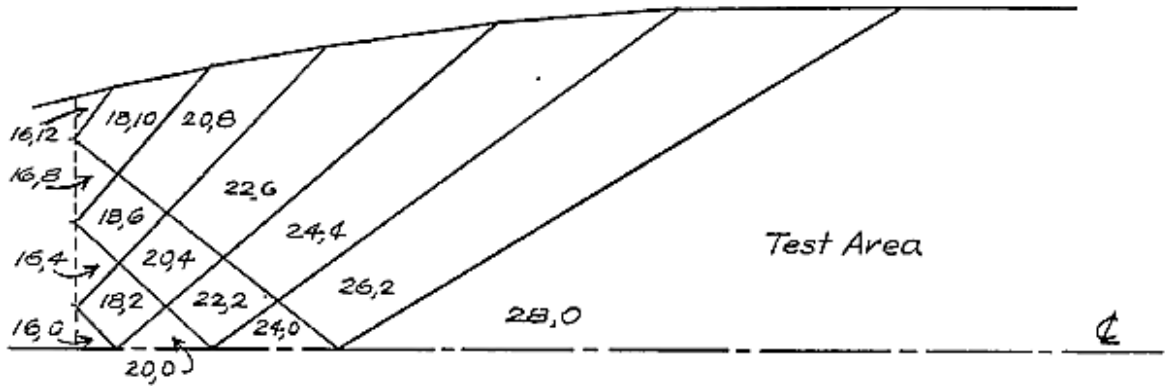
Busemann, konik bir basınç alanı üreten cisim üzerindeki süpersonik akış hesaplamasının bir yöntemini açıklamaktadır. Busemann, dairesel kesitli konilerin etrafındaki akışın yanı sıra dikdörtgen bir kaldırma yüzeyinin ucu etrafındaki akışın bu durumu sağladığını gösterir. Çok çeşitli üç boyutlu akışların konik ve silindirik akış alanlarının üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulabilmesi hava hızı teorisinin süpersonik hızlarda sadeleştirilmesine yol açar [6].

Püskürtme çizgilerini belirlemek için en belirgin yöntem belki de Prandtl ve Busemann'dır. Karakteristikler Metodu'nun olağan sunumu aslında matematiksel niteliktedir. Tasarımcıya, lüle akışının daha net bir şekilde fiziksel görüntüsünü sağlamak için, Prandtl - Busemann yönteminin farklı bir yorumu sunulmuştur. Bu yöntemle lüle şekilleri oluşturmak için çeşitli sistemler de bazı etkileri ve ek faydalı bilgiler ile birlikte sunulmaktadır. Busemann'ın püskürtme uçlarını tasarlama metodu, test bölümünde istenen Mach sayısında düzgün ve paralel akış elde etmek için gereken başlangıç eğrisini varsaymaktan oluşur. Genişletme dalgası son derece ince bir örgü için bu yöntem tam olarak geçerlidir. Ek olarak sonlu elemanlar analizi yapabilen bir bilgisayar destekli analizi ile analiz daha doğru olur [6].

Bu yöntem, belki de, konveksiyonel olmayan tip nozulların tasarımında en faydalıdır. Çünkü konveksiyonel tipler için, Foelsch yöntemi daha elverişlidir [6].

2.8.2. Puckett Metodu

Puckett Metodu, bir nokta kaynağı aracılığıyla, basınç dağılımı elde eden bir yöntemdir. Puckett metodu, Busemann'ın lüle tasarımı yönteminin bir varyasyonudur. Yöntem kısaca lülenin boğaz kısmından başlayıp yakınsak ve ıraksak bölümlere doğru yapılan işlemlerden oluşur [6].



Şekil 2.11. Puckett Metoduna göre düzenlenmiş lüle profili [6].

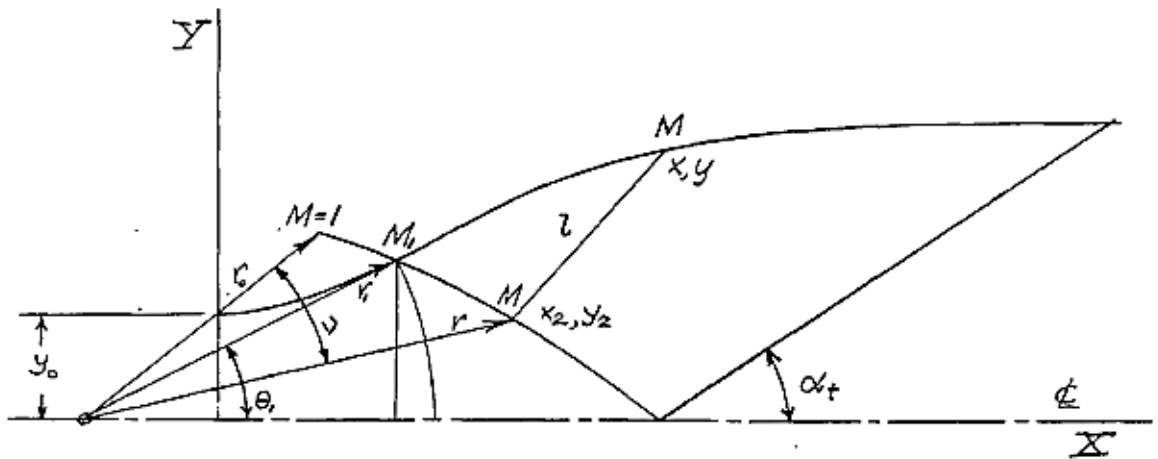
Maksimum genişlemenin olduğu bölümde lüleden geçen akışın üniform bir hıza eşit olarak ve akış yönünde değişken olduğu kabul edilir. Bu koşullar Şekil 2.11 'de gösterilmiştir. Bu sınır koşulları deneyde tekrardan canlandırılarak bulunmuştur. Bu sınır değerleriyle, lülenin giriş bölümü yani yakınsak kısmı Busemann lüle tasarımında olduğu gibi aynı yöntemle tespit edilebilir veya benzer bir şekilde geriye doğru çalışarak, bir başlangıç bölümü de oluşturulabilir [6].

Puckett'in yöntemi için birkaç avantajı vardır. Birincisi, ilk bölümü tasarlamak için basitleştirilmiş yöntem kullanılırsa, bir püskürtme ağzının tasarımında yer alan zaman veya iş yaklaşık yarıya indirilir. İkinci avantaj, püskürtme uçlarının gerçek hesaplanması sırasında belirgin hale gelir. Busemann Metodunda, genişleme dalgaları düzgün bir başlangıç eğrisi boğazda belirli noktalardan kaynaklanır. Bu, genişleme dalgalarının aralığı düzensizdir. Sonlu bir ağ boyutu kullanıldığında, bazen uzatma dalgaları, takip eden genişleme dalga deseninin düzensizliğini yok etmek için bu noktalardaki lüle iç cidarından yansır. Elde edilen merkez eğrisi böylece düzensizlik derecelerini elde eder. Bu düzensizlikler, örgü boyutu sonsuz derecede ince olduğunda ortadan kalkar ve pratikte bir tanesi genellikle düz bir eğri çizer. Puckett yöntemi bu zorluğu ortadan kaldırmaz. Ancak merkez eğrisinin başlangıcı, dalga deseninden etkilenmediğini varsayarak bunu ihmal edilebilir [22].

2.8.3. Foelsch's Metodu

Prandtl ve Busemann'ın orijinal Karakteristikler Metodu yaklaşımı, konturları belirlemek için sayısal ve grafik yöntemlere dayanıyordu. Bu yöntem, analitik bir çözüm sağlamak için 1949 yılında Foelsch tarafından uyarlanmıştır. Daha önce bahsedilen Karakteristikler Metodunun temelleri, genişleme bölümünün önce tasarlanması şartı dışında, Foelsch yönteminde geçerli kalır [23].

Foelsch yöntemi, lülenin bükülme noktasında başlayıp ıraksak ve yakınsak bölümlere doğru yapılan işlemler itibariyle Puckett Metoduna benzer. Ancak sınır şartlarında farklılık göstermektedir. Ancak ana farkı ve doğrudan avantajı analitik olmasıdır. Burada yalnızca genişleme bölümüyle ilgilenen Foelsch teorisinin bir kısmı ele alınacaktır [6].



Şekil 2.12. Foelsch metodu referans alınan değişkenler [6].

Bu yöntemin varsayımları veya daha doğrusu sınır koşulları çeşitli şekillerde ifade edilebilir [3]. (Şekil 2.12.):

- (1) Bükülme noktasından çıkan Mach çizgisi boyunca hız vektörleri eş orijindir
- (2) Mach sayısı sabittir. (merkezin hız vektörlerinin kaynağı olduğu için),
- (3) Bu yay ile bükülme noktasından Mach çizgisi arasındaki bölgede, Mach sayısı sadece yarıçapın bir fonksiyonudur.

r Vektörel olarak bükülme noktasından referans noktaya olan Mach çizgisi mesafesi

r_0	$M = 1$ için varsayımsal yarıçap değeri
l	Eğme noktasındaki bükülme noktası arasındaki Mach çizgisinin uzunluğu
x	Sonik kesitten ölçülen koordinatlar
y	Merkez bölümden ölçülen koordinatlar
x_1, y_1	Eğilme noktasının koordinatları
x_2, y_2	Eğilme noktası Mach hattının koordinatları
y_0	Lümenin sonik kesiti
H	Test bölümünün yüksekliği (2yt)

$$r_0 = \frac{y_0}{\theta_1} \quad (2.48)$$

$$r = r_0 \cdot \left(\frac{A}{A^*} \right) \quad (2.49)$$

$$r_1 = r_0 \cdot \left(\frac{A_1}{A^*} \right) = \frac{y_1}{\sin \theta_1} \quad (2.50)$$

$$\frac{y_1}{y_0} = \frac{\sin \theta_1}{\theta_1} \left(\frac{A_1}{A^*} \right) \quad (\theta_1 \text{ radyan cinsindendir.}) \quad (2.51)$$

$$l = M_r (\nu - \nu_1) \quad (\nu \text{ radyan cinsindendir.}) \quad (2.52)$$

$$x_2 - x_1 = -r_1 \cdot \cos \theta_1 + r \cdot \cos(\nu_t - \nu) \quad (2.53)$$

$$y_2 = r \cdot \sin(\nu_t - \nu) \quad (2.54)$$

ve başlama bölümünün koordinatları (test bölümü yükseklikleri);

$$x - x_1 = x_2 - x_1 + l \cdot \cos(\nu_t - \nu + \alpha) \quad (2.55)$$

$$y = y_2 + l \cdot \sin(\nu_t - \nu + \alpha) \quad (2.56)$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \cdot \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}} \quad (2.57)$$

terminal bölümünün uzunluğu (test bölümündeki yükseklikler)

$$\frac{x_t - x_1}{H} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{M_t^2 - 1} + \frac{1}{2\theta_1} \cdot \left(1 - \frac{A^*}{A_t} \cdot \frac{A_1}{A^*} \cdot \cos \theta_1 \right) \quad (2.58)$$

M_1 'den M_t 'ye kadar olan eğrisi boyunca Mach sayısını değiştirerek ve α , v , r ve l değerlerini belirleyerek merkez eğrisinin koordinatları bulunabilir ve test bölümündeki koşulların bir fonksiyonu olarak belirlenir ve bükülme noktasında, bu hesaplamaları kolaylaştıracak çalışmalar içermektedir [6]. İlk eğri, Puckett yönteminde olduğu gibi, ayrı olarak ele alınabilir [3].

Puckett ve Foelsch yöntemlerinin sınır koşulları ile benzerlik gösterdiği görülmektedir; bunlardan birincisi düz bir çizgide sabit Mach sayısı ikincisi dairesel bir yay boyunca uzanmaktadır. Her iki varsayım da, karşılık gelen Puckett nozuluna göre Foelsch yöntemine göre hesaplanan lülenin hafif ve önemsiz bir şekilde uzatılmasında kendini gösterir [6].

Foelsch yönteminin analitik yapısı, lülelerin istenen ölçüde doğrulukta ve daha sonra açıklanacak herhangi bir böyle bir aparat olmadan grafik yöntemler için gerekli olduğu şekilde belirlenmesine izin verir [6].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Süpersonik Lülenin Profilinin Oluşumu

Belirli akış profilleri ve performansı elde etmek için, yakınsak-ıraksak lülenin çap ve uzunluklarının tam olarak belirlenmesi, geleneksel olarak, Karakteristikler Metodu kullanılarak yapılır. Grafik olarak uygulanmakta olan bu yöntem, günümüzde bilgisayar yardımı ile çözümlenmektedir. Bu yöntem, genelde belirli akış parametrelerinin sabit olduğu kesişen karakteristik çizgilerden oluşan bir akış alanını gezdirip haritalandırmayı içermektedir. Lüle profilleri, boğazdaki bilinen şartlardan arzu edilen çıkış koşullarına kadar arzulan akışı genişleten ve döndüren tutarlı bir dalga seti bularak tespit edilir. Giriş kısmının boğazdaki yerel konturu, genel olarak hesaplamaların başlangıç noktası olarak ele alınır ve ses hızı, profilin kesin şeklini belirler.

A. E. Puckett [4] çalışmasında, lüle tasarımlarının performansını analiz etmek ve doğrulamak için süpersonik akış modeli deneyleri ve bilgisayar destekli analiz programları kullanılarak sonuçları gözlemlemiştir. Diğer mühendislik kriterleri, asgari uzunluktaki lüledeki azami itme kuvveti, minimum yüzey alanı ile elde edilen azami itme kuvveti veya düzgün çıkış akışı gibi spesifik çalışmaların konturunu da tanımlar.

Euler denkleminin mükemmel gazın aksel olarak simetrik, üniform, irratasyonel izentropik süpersonik akışına uygulanması viskozite veya ısı iletkenliği olmaksızın, iki değişkenli ikinci dereceden yarı-doğrusal kısmi diferansiyel denklem kümesi üretir. Bu denklemlerin çözümü, hız potansiyelini lülenin aksel ve radyal koordinatlarında iki bağımsız koordinatın sürekli bir fonksiyonu olarak ifade eden üç boyutlu bir integral yüzeyi olarak düşünülebilir.

Bu denklemler doğada hiperbolik olduğu için, iki karakteristik eğri bulunur ve bu yüzey üzerindeki her çözüm noktasından geçer. Bu süpersonik akış için, eğrilerin fiziksel koordinat düzlemindeki izdüşümleri, akışkan özelliklerinin sürekli olduğu Mach çizgileridir ancak hızların türevleri kesintili olabilir. Karakteristik eğrilerin varlığı, lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünün, birinci mertebedeki sıradan diferansiyel denklemlerin çözülmesiyle değiştirilmesine izin verir. Çözüm, iki düzlemdeki

karakteristik ağlarının oluşturulmasıyla, bağımsız koordinatlardan oluşan fiziksel düzlem ve hız bileşenlerini içeren hayali düzlemler ile ilerlemektedir.

Bununla birlikte, yapıların bağımsız olduğu Puckett [4] tarafından tarif edilen iki boyutlu lülenin aksine, eksenel simetrik lüle, her iki düzlemdeki ağların eşzamanlı daha karmaşık çözümünü gerektirir. Koordinat düzleminde karakteristik olmayan bir eğri boyunca birçok noktada hız değerleri göz önüne alınarak fiziksel ve hayali düzlemlerde karakteristik eğriler tarafından verilen eğimleri kullanarak, piramit şeklinde, bitişik iki nokta kullanan çevredeki akış deseni belirlenmeye devam edilir.

Düzgün bir süpersonik akış üretmek için bir eksenel simetrik lülenin tasarımı, sonik yüzeyin konturunu, bilindiği üzere, boğaz kısmından başlatılır. İç cidar, akışkanı genişletmek için tasarımcı tarafından seçilen bir şekilde dışa doğru kavislidir. Karakteristik ağ, bir tarafta iç cidar ve diğerinde merkez çizgisi ile sınırlanan bu bölgede kademeli olarak oluşturulmuştur. Duvar dışa doğru bükülmeye devam edilir ve kademeli hesaplama işlemi, eksen boyunca istenen Mach sayısına ulaşıncaya kadar sürdürülür. lüle konturunu hassaslığı, çözümün doğruluğunu belirlediğinden, karmaşık hesaplamaların yapılması gerekir.

Çıkışın düzgün olması nedeniyle, son Mach sayısına ulaşılan eksenden gelen Mach çizgisi düzdür. Karakteristikler Metodu, son Mach çizgisinden referans bilgi kullanarak inşa edilmeye devam edilir. Karakteristikler tamamlandıktan sonra, akım çizgileri enterpolasyon ile oluşturulabilir. Çünkü hızlar her ağ noktasında bilinir. İç cidar kısmından sonra, en dış akış hattı olarak aşağı doğru tamamlanabilir. Püskürtme borusunun çıkışındaki çap, izentropik olarak hesaplanan değer ile aynı olmalıdır ve yapılan bu hesaplamalar karakteristik ağ yapım doğruluğunu kontrol eder. Literatür araştırmaları kısmında, genelde karakteristik ağların hesaplanmasını içeren ve lüle profilini çok sayıda ayrı nokta olarak belirleyen, eksenel simetrik püskürtücüleri tasarlamak için daha eski, grafiksel ve yeni sayısal yöntemler açıklanmaktadır.

K.Foelsch [3] çalışmasında, üniform çıkış akışını üreten bir eksenel simetrik lülenin konfigürasyonu için bir yaklaşım açıklanmaktadır. Foelsch, bir pertürbasyon yaklaşımı ve kütle akışının ayrı yüzeyleri boyunca korservasyonunu kullanarak düzleştirme bölümünün şeklini belirler. Bu, yukarıda gösterildiği gibi akış ağlarının hesaplamasını engellese de, Foelsch profilini ayrı seri bir dizi halinde belirler. Böylece, arzu edilen, optimal,

süpersonik bir hava akışı üretmek için tasarlanan lülenin iç cidar şeklinin tasarımı ayrıntılı ve zahmetli hesaplama dizisini oluşturmaktadır.

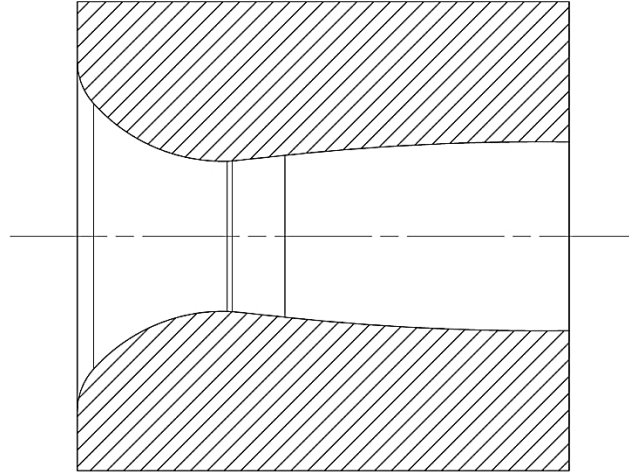
Önceki bölümlerde açıklanan Karakteristikler Metodu ve Foelsh'in basitleştirilmiş metodu ile elde edilen spline eğrisinin takım tezgahlarında lüle profilinin imalatının gerçekleştirilmesi ek çalışmalar gerektirecektir. Yapılan bu çalışmada Karakteristikler Metodu yay parçaları ve çizgi parçalarına dönüştürülerek lülenin tasarımında bir kolaylık sağlamıştır. Bu nedenle, yapılan bu hesaplamaların bir amacı, Karakteristikler Metodu 'nu hesaplama işlemlerinin hantallığından kurtarıp daha basitleştirerek ve geliştirerek, profil için mühendislik bilgileri, nispeten az sayıda yay ve çizgi parçalarının basit bir seti olarak doğrudan ve kolaylıkla bilgisayar destekli çizim programında çizilebilir bir sesüstü lüle profili oluşturmaktır.

3.2. Süpersonik Lüle Profili Çiziminin Açıklaması

Lüle profili, gaz dinamik denklemleri ile belirlenen çok sayıda birbirine teğet olan yay ve çizgilerle tanımlanmış bir süpersonik akış elde edilen yakınsak-ıraksak lülenin imalatında kullanılabilen bir iç cidar profilini tanımlar. Tasarımı yapılacak olan lüle profilinin, daha önce tarif edilen analitik veya sayısal yöntemlerle hesaplanmasına göre daha kolaydır.

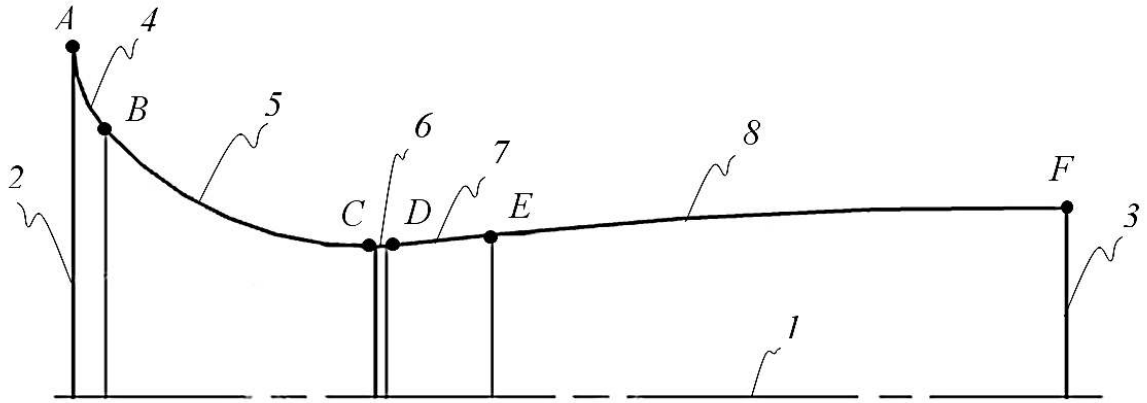
Yapılan çalışma, yakınsak - ıraksak kısımdan oluşan bir eksenel simetrik lüle profilidir. Yakınsak bölüm, boğazdaki sapma bölümüne bağlanır. Yakınsak bölüm ve ıraksak bölüm, daire yayları ve bir çizgi parçası tarafından tanımlanan sürekli bir profil ile tanımlanır.

Şekil 3.1.'de lülenin kesit görünüşü verilmiştir. Şekil 3.2.'de ise iç kestin profili verilmiştir. Lülenin iç kesitinde (4) ve (5) nolu çember yayları yakınsak kısmını (6), (7) ve (8) nolu daire yayları ve doğru parçaları ise ıraksak kısmını belirtmektedir.



Şekil 3.1. Yakınsak-İraksak lüle iç kesiti.

Şekil 3.2.'deki (1) eksenini yatay eksenin referans eksenidir. Bu çember yayları ve doğru parçaları ve dairesel kesitli lüle oluşumu (1) eksenini etrafında 360° döndürülerek oluşturulur. Bu şekilde yakınsak-ıraksak lüle aksiyel simetrik olarak düşünülebilir. Giriş ucu (2), sıkıştırılmış hava ile beslenir ve çıkış kısmından (3), Mach sayısının üstünde hızlandırılmış bir hava elde edilir.



Şekil 3.2. Lülenin iç profilini oluşturan çember yayları ve çizgi parçaları.

Yakınsayan ilk bölümün ilk çizgisinden (4) itibaren, ani değişimler olmaksızın, kademeli olarak yakınsayan, düzgün bir şekilde ıraksayan ve (1) eksenine paralel olması koşuluyla, bir takım olasılıklardan herhangi biri olabilir. Olasılıklar arasında, boğaza uzanan dairesel bir yay, teğet bir çizgi parçası veya bir parabol gibi sürekli yüksek mertebeden bir eğri ve buna benzer çizgi parçası bulunmaktadır. Boğaz yayı (6), havanın arzu edilen çıkış Mach sayısına (M_3) ulaşmasını sağlayan ilk genişleme bölümüne (7)

$$M_3 = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (3.1)$$

Boğaz ve çıkış çapları sırasıyla D_1 ve D_3 , standart koşullarda tanımlanan gazın hacimsel debisi $\dot{V}$ alınarak, çalışma yapılacak olan kompresör için, katalog listesinden debi değeri alınabilir [Ek-3]. Bu büyüklükleri belirlemek için aşağıdaki eşitliklerden faydalanılabilir [24]:

$$D_1 = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{4(k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{4\rho\dot{V}}{\pi P_0}} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T_0}{k}} \quad (3.2)$$

$$D_3 = \frac{D_1}{\sqrt{M_3}} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_3^2}{\frac{k+1}{2}} \right]^{\frac{k+1}{4(k-1)}} \quad (3.3)$$

Şekil 3.3.'de gösterilen birinci yakınsak bölüm sırasıyla R_1 ve R_2 yarıçaplı olan yayları, Şekil 3.2.'de (4) ve (5) nolu çember yaylarını içerir. Bu iki yay, bir noktada (B) birleştiklerinde, birbirlerine tanjantlırlar; Böylece yay parçacıklarının (4 ve 5) birleştirdikleri yerde; kesintisiz, sürekli olarak birleşen kesit oluştururlar. Bu durumda lülenin giriş ucu (A), (2) nolu lüle girişi kesit doğrusuna teğettir. Yakınsak kısmı oluşturan (4) ve (5) yaylarını oluşturan değerler, kombine yaylar kabul edilebilir ve matematik olarak R_1 ve R_2 [24],

$$R_1 = \frac{D_3}{3} \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{7D_1}{6} \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile verilir. Ses üstü akış lülesinin girişin ana eksene mesafesi L_1 , D_1 'e eşittir ve yan eksenin uzunluğu L_4 'de $2/3 D_1$ 'e eşittir.

Şekil 3.2. 'de gösterildiği gibi, ıraksak bölümün birinci kısmı (6), tamda yakınsak bölüm ile ıraksak bölümü için geçiş bölümüdür ve boğaz şartlarının olduğu bölümdür.

Boğaz şartlarının olduğu kısımdan sonra, ıraksak kısmın ilk yayı olan (6) nolu yay R_3 yarıçaplıdır ve [C] noktasından itibaren A_1 derecelik bir açı yapmaktadır. Boğaz kısmından sonraki ikinci bölüm olan (7) nolu doğru parçası, lüle eksenile A_2 derecelik açıya sahiptir. Doğru parçasının (7) uzunluğu L_2 'dir ve (6) yayı ile birbirlerine teğettir. Bu geometrik ilişkiden dolayı, A_1 açısı ile A_2 açısı değerleri birbirine eşit olmaktadır.

Bu nedenle, imalat için en az miktarda materyal gerektiren en kısa lüle için, $\Phi(M)$ 'nin Prandtl-Meyer ilişkisi ile tanımlandığı yerde, A_2 'in $1/4 \Phi(M_3)$ eşit [24] olmasını seçerek eşitlik (3.6)'dan bulunur [14].

$$\Phi(M) = \left[\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} (M^2 - 1) \right] - \tan^{-1} \sqrt{M^2 - 1} \right] \quad (3.6)$$

[E] kesitindeki Mach sayısı M_2 'nin değeri, basit iterasyon yapılarak bulunur. Prandtl-Meyer fonksiyonunun eşitlik (3.7)'deki M_2 değeri için bilinen A_2 değerine ulaşıncaya kadar basit bir iterasyon işlemi yapılır [24].

$$\Phi(M_2) = 2A_2 \quad (3.7)$$

Şekil 3.2.'deki [E] noktasındaki D_2 kesit çapı, izentropik alan oranı ilişkisinin karekökü $\tau(M)$ denkleminde eşitlik (3.9)'dan bulunur [21],.

$$\sqrt{\frac{\pi D_2^2}{\pi D_1^2}} = \tau(M) = \sqrt{\frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) + \left(\frac{k-1}{k+1} (M^2) \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (3.8)$$

$$D_2 = D_1 \cdot \tau(M_2) \quad (3.9)$$

Şekil 3.2 'de gösterilen (6) nolu R_3 yarıçaplı yay Foelsch [3] tarafından bulunan eşitlik (3.10)'dan bulunur [24].

$$R_3 = \frac{D_3 \left[\tau(M_2) \cdot \cos\left(\frac{A_2}{2}\right) - 1 \right]}{4 \cdot \tau(M_3) \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right) \cdot \left[\sin\left(\frac{A_2}{2}\right) + \cos\left(\frac{A_2}{2}\right) \right]} \quad (3.10)$$

İraksak bölümün düzleştirici (8) yayı, yarıçapı R_4 olan bir yay olarak tasarlanmıştır ve [E] noktasından [F] noktasına A_3 derecelik bir açığa sahiptir. R_4 yarıçapı tasarımı lüle üretimini büyük ölçüde kolaylaştırmak için ve ayrıca akışı daha düzenli olması için seçilmiştir. (8) yayı, çizgi parçası (7) ile teğettir. (8) yayının bitiş noktası [F] lüle eksenine paraleldir dolayısıyla (3) çizgisine diktir.

Richard D. Nathenson [24] çalışmasında, tercih edilen düzenlemede, ikinci sapma bölümünün (8) akış düzeltici yarıçapı R_4 eşitlik (3.11)'de verilir [24].

$$R_4 = \frac{D_3 \left[1 - \frac{\tau(M_2)}{\tau(M_3)} \cdot \cos(A_2) \right]}{4 \cdot \sin(A_2) \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right)} + D_3 \left(\frac{\sqrt{M_3^2 - 1}}{2 \cdot \sin(A_2)} \right) \quad (3.11)$$

Foelsch [3] tarafından hesaplanmış lülenin süpersonik bölümünün uzunluğu eşitlik (3.12) kullanılarak L_3 iraksak kısım uzunluğu bulunur [24].

$$L_3 = \frac{D_3}{4 \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right)} + \frac{D_3}{2} \cdot \sqrt{M_3^2 - 1} - \frac{D_1}{2 \cdot \tan(A_2)} + R_3 \tan\left(\frac{A_2}{2}\right) \quad (3.12)$$

Tercih edilen düzenlemede, A_1 ve A_3 , A_2 ile aynı olacak şekilde seçilir L_2 , R_3 'e eşit olarak ayarlanır.

3.4. Yakınsak İraksak Lüle ve Başlangıç Şartları

Çalışmanın bu kısımda; havanın özgül ısı oranı olan $k = 1.4$ değerine göre ve aşağıdaki belirtilmiş başlangıç şartlarına göre akışın daimi ve izentropik olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılacaktır. Bölüm 3.3 'de verilen eşitlikler kullanılarak nozul geometrisinin tasarımı yapılacaktır.

Çalışmanın başlangıç şartları aşağıda belirtilmiştir:

$k = 1.4$ (izentropik gaz üssü)

$P_0 = 7 \text{ bar} = 700 \text{ kPa}$ (giriş basıncı)

$P_3 = 101325 \text{ Pa}$ (karşı basınç)

$T_0 = 288 \text{ K}$ (standart koşullardaki sıcaklık)

$$\dot{V} = 0.41 \text{ m}^3/\text{dak} = 0.00683 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{kompresörden elde edilen hacimsel debi})$$

$$R = 0.287 \text{ kJ/kgK} = 287 \text{ J/kgK} \quad (\text{mükemmel gaz sabiti})$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{hava yoğunluğu})$$

Yakınsak İraksak lüle tasarımı için, bölüm 3.3 'de kontur çizimleri ve açıklamaları ile gerekli eşitlikler verilmiştir. Bu doğrultuda Şekil 3.3 'de yapılan ölçülendirmedeki her yay ve doğru parçaları parametreleri yukarıda verilen kabuller ve sınır şartları doğrultusunda tasarım, sayısal olarak gerçekleştirilecektir. Yapılacak bu hesaplamalar sonucu elde edilen veriler gerçek şartlarda dizayn edilebilir.

3.4.1. Yakınsak-İraksak Lüle Eğrisinin Hesaplamaları

Yakınsak ıraksak lüle eğrisi için gerekli hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Eşitlik 3.1'den görüleceği üzere M_3 çıkış kesitindeki Mach sayısı,

$$M_3 = \sqrt{\frac{2}{1.4-1} \left[\left(\frac{700}{101.325} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right]}$$

$$M_3 = 1.92$$

Boğaz çapı D_1 eşitlik (3.2) den hesaplanır. Eşitlik (3.2)'deki hacimsel debi değeri, Ek 3'de verilen kompresör kataloğundan seçilmiştir.

$$D_1 = \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{\frac{(1.4+1)}{4(1.4-1)}} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 1.225 \cdot (\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 0.00683 \cdot (\text{m}^3 / \text{s})}{\pi \cdot 700000 \cdot (\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2)}} \cdot \sqrt{\frac{287 \text{ J} / \text{kg K} \cdot 288 \text{ K}}{1.4}}$$

$$D_1 = 2.53 \text{ mm}$$

Eşitlik (3.3)'de, boğaz çapı ve çıkış kesitindeki Mach sayısı işleme konularak, yakınsak ıraksak lüle çıkış kesitinin çap değeri hesaplanmıştır.

$$D_3 = \frac{2.53}{\sqrt{1.92}} \left[\frac{1 + \frac{1.4-1}{2} \cdot 1.92^2}{\frac{1.4+1}{2}} \right]^{\frac{1.4+1}{4(1.4-1)}}$$

$$D_3 = 3.18 \text{ mm}$$

Eşitlik (3.4)'den lülenin yakınsak kısmındaki ilk iki dairesel yay parçalarının uzunlukları, yakınsak ıraksak lülenin çıkış çapı (D_3) işleme konularak, yakınsayan bölümün birinci (R_1) ve ikinci (R_2) yay çapları bulunmuştur. Burada R_1 yayı D_3 çıkış çapının 1/3 katına eşit olarak alınmıştır.

$$R_1 = \frac{D_3}{3} = \frac{3.18\text{mm}}{3} = 1.06\text{mm} \quad R_1 = 1.06\text{mm}$$

Aynı şekilde eşitlik (3.5)'den R_2 yayı D_1 boğaz çapının 7/6 katına eşit olarak alınmıştır.

$$R_2 = \frac{7 \cdot D_1}{6} = \frac{7 \cdot 2.53\text{mm}}{6} = 2.95\text{mm} \quad R_2 = 2.95\text{mm}$$

Yukarıda açıklama yapıldığı gibi lüle giriş kesitinin boğaz kesitine uzaklığı L_1 (Şekil 3.3) D_1 boğaz çapına eşit olarak [24] alınmıştır. Ayrıca Şekil 3.3'de L_4 olarak belirtilmiş uzunluk için D_1 boğaz çapının 2/3 katına [24] eşittir. Buna göre;

$$L_1 = D_1 \quad ; \quad L_4 = \frac{2}{3} \cdot D_1 = 1.686\text{mm}$$

olarak bulunur.

Eşitlik 3.6'dan Prandtl - Meyer fonksiyonu kullanılarak çıkış Mach sayısı değerine göre ıraksak kısımda bulunan A_2 açısı için, ($A_2 = 1/4 \Phi(M_3)$) eşit olduğu önceki kısımda açıklanmıştı. O halde,

$$\Phi(M_3) = \Phi(1.92) = \left[\sqrt{\frac{1.4+1}{1.4-1}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1.4-1}{1.4+1}} (1.92^2 - 1) \right] - \tan^{-1} \sqrt{1.92^2 - 1} \right]$$

$$A_2 = \frac{\Phi(M_3)}{4} = 6.04^\circ$$

$$A_2 = 6.04^\circ$$

olarak hesaplanır.

M_2 değeri D_2 çapındaki [E] kesitindeki Mach sayısıdır. Eşitlik 3.6 Prandtl - Meyer fonksiyonu kullanılarak, $\Phi(M_2)$ değeri A_2 açısının iki katına eşit olduğu kabul edilerek ($2A_2 = \Phi(M_2)$) aşağıdaki iterasyon işlemler uygulanarak M_2 değeri bulunmuştur.

$$\Phi(M_2) = 2 \cdot A_2 = 2 \cdot 6.04^\circ = 12.08^\circ$$

$$\Phi(M_2) = \left[\sqrt{\frac{1.4+1}{1.4-1}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1.4-1}{1.4+1}} (M_2^2 - 1) \right] - \tan^{-1} \sqrt{M_2^2 - 1} \right]$$

$$\Phi(M_2) = \left[\sqrt{6} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1}{6}} (M_2^2 - 1) \right] - \tan^{-1} \sqrt{M_2^2 - 1} \right]$$

Adyabatik üs değeri yerine konulup sadeleştirilmiş Prandtl Meyer fonksiyonu aşağıdaki iterasyon işlemler dizisi uygulanarak,

$$M_2 = 2 \quad \text{için; } \Phi(M_2) = 26.38$$

$$M_2 = 1.75 \quad \text{için; } \Phi(M_2) = 19.27$$

$$M_2 = 1.5 \quad \text{için; } \Phi(M_2) = 11.90$$

$$M_2 = 1.52 \quad \text{için; } \Phi(M_2) = 12.495$$

hesaplanır. Yukarıda hesaplanan $M_2 = 1.5$ için; $\Phi(M_2) \cong 12$ yaklaşık değeri için, eşitlik (3.8)'den işlemlere devam edilecek olursa $\tau(M_2)$;

$$\tau(1.5) = \sqrt{\frac{1}{1.5} \left[\left(\frac{2}{1.4+1} \right) + \left(\frac{1.4-1}{1.4+1} (1.5^2) \right) \right]^{\frac{1.4+1}{2(1.4-1)}}}$$

$$\tau(1.5) = 1.08$$

olarak bulunur.

Eşitlik (3.9)'daki değerde yerine yerleştirildiğinde D_2 , $[E]$ kesitindeki çap değeri bulunur.

$$D_2 = 2.53 \cdot 1.08 = 2.744 \text{ mm}$$

R_3 yayı eşitlik (3.10)'de bilinmeyen $\tau(M_3)$ aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\tau(1.92) = \sqrt{\frac{1}{1.92} \left[\left(\frac{2}{1.4+1} \right) + \left(\frac{1.4-1}{1.4+1} (1.92^2) \right) \right]^{\frac{1.4+1}{2(1.4-1)}}}$$

$$\tau(1.92) = 1.26$$

Bu işlemlerin ardından yukarıda bulunan $\tau(M_2)$ ve $\tau(M_3)$ değerleri eşitlik (3.10) 'da yerine konularak boğazdan sonra ıraksak kısım ilk yarıçapı olan R_3 yarıçapı bulunur.

$$R_3 = \frac{3.18 \cdot \left[1.08 \cdot \cos\left(\frac{6.04}{2}\right) - 1 \right]}{4 \cdot 1.26 \cdot \sin\left(\frac{6.04}{2}\right) \cdot \left[\sin\left(\frac{6.04}{2}\right) + \cos\left(\frac{6.04}{2}\right) \right]}$$

$$R_3 = 0.89 \text{ mm}$$

değeri bulunur. Eşitlik 3.11 den ıraksak kısım son akış düzleştirici yarıçapı olan R_4 bulunur.

$$R_4 = \frac{2.64 \cdot \left[1 - \frac{1.08}{1.26} \cdot \cos(6.11) \right]}{4 \cdot \sin(6.11) \cdot \sin\left(\frac{6.11}{2}\right)} + 2.64 \cdot \left(\frac{\sqrt{1.93^2 - 1}}{2 \cdot \sin(6.11)} \right)$$

$$R_4 = 41.26 \text{ mm}$$

Ardından L_3 yakınsak ıraksak lülenin ıraksak bölüm toplam uzunluğu eşitlik (3.11) tatbik edilerek;

$$L_3 = \frac{3.18}{4 \cdot \sin\left(\frac{6.04}{2}\right)} + \frac{3.18}{2} \cdot \sqrt{1.92^2 - 1} - \frac{2.53}{2 \cdot \tan(6.04)} + 41.26 \tan\left(\frac{6.04}{2}\right)$$

$$L_3 = 5.787 \text{ mm}$$

değeri bulunur.

Tablo 3.1.'de belirtilen şartlara göre, eşitlikler kullanılarak hesaplanan bu değerler ve belirtilen şartlar belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Lülenin belirtilen şartlara göre tasarım parametreleri

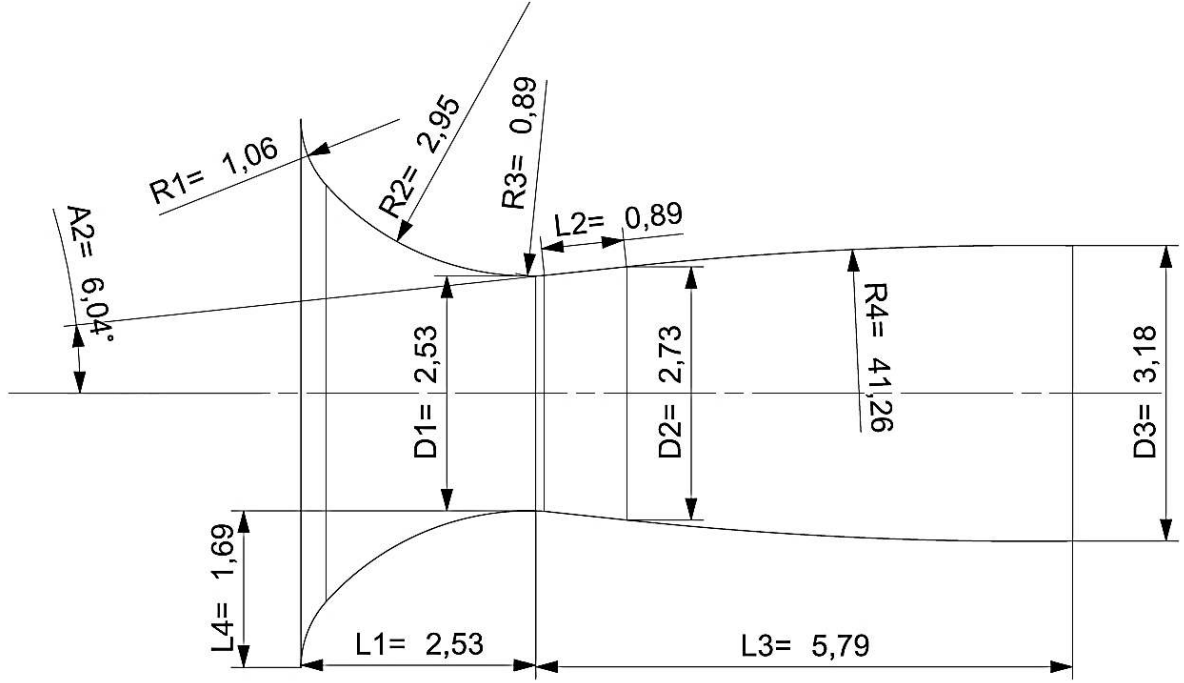
Lüle Tasarım Parametreleri	
Giriş basıncı, P_0	700000.00 Pa
Giriş sıcaklığı, T_0	288.00 K
Çıkış basıncı, P_3	101325.00 Pa
Akış Debisi, Q	0.41 m ³ /dak
Yoğunluk, ρ	1.23 kg/m ³
Gaz sabiti, R	287.00 J/kgK
Adyabatik üs, k	1.40
Boğaz çapı, D_1	2.53 mm
İç Çapı, D_2	2.74 mm
Çıkış Çapı, D_3	3.18 mm
İç Mach Sayısı, M_2	1.50
Çıkış Mach Sayısı, M_3	1.92
İlk yakınsak bölüm Radyusu, R_1	1.06 mm
İkinci yakınsak bölüm Radyusu, R_2	2.95 mm
Boğaz Radyusu, R_3	0.89 mm
İraksak Düzleştirici Radyus, R_4	41.26 mm
İraksak Tepe Açısı, A_2	6.04 derece
Yakınsak kısım uzunluğu, L_1	1.06 mm
İraksak kısım uzunluğu, L_3	5.79 mm

Elde edilen bu hesaplamalar doğrultusunda lüle profilinin ölçülendirmesi Şekil 3.4 de verilmiştir.

ANSYS‘de yakınsak ıraksak lüle analizi, iki boyutlu olarak yapılabileceği gibi üç boyutlu olarak da yapılabilir. Üç boyutlu analiz için öncelikle, tasarlanan lülenin üç boyutlu çiziminin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, yakınsak - ıraksak lülenin üç boyutlu çizimi Unigraphics programı kullanılarak, iki farklı kesit için yapılmıştır. Dairesel kesitli lüle, belirtilen profil revolve komutu 360 derece çevrilerek yapılmıştır. Kare kesitli lüle ise; lüle profili eksen çizgisinin karenin köşegen kesişim noktasını merkeze alacak şekilde profil eğrisine göre kesiti

değişen bir lüle olarak çizimi parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Kare kesitli lülenin keskin köşeleri 0.5 mm'lik yarıçaplı daireler kullanılarak yuvarlatılmıştır.



Şekil 3.4. Belirtilen sınır şartlarına göre hesaplanmış lüle profili ölçüleri

3.4.2. Tasarlanan Lüle Akışının Termodinamik Hesaplamaları

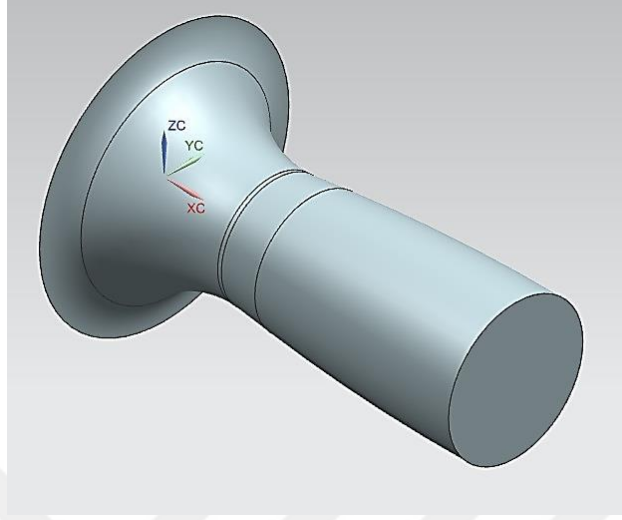
Tasarımı yapılan dairesel kesitli yakınsak ıraksak lüle için önceki bölümlerde kontur çizimleri ve açıklamaları ile gerekli eşitlikler verilmiştir. Düzgün bir süpersonik akış üretmek amacı ile, bir aksenal simetrik lülenin tasarımında farklı lüle profilleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar ile elde edilen lüle profili, dairesel kesitli ve kare kesitli olmak üzere iki yakınsak-ıraksak lüle için tatbik edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, yapılan tasarımda lüleden geçen akışkanın termodinamik özelliklerinin bulunması için hesaplamalar yapılmıştır.

3.4.2.1. Dairesel Kesitli Lüle İçin Termodinamik Hesaplamalar

Bu kapsamda tasarım bilgileri sayısal olarak hesaplanmış ve elde edilen veriler gerçek şartlarda tasarlanabilir duruma getirilmiştir. Bu bölümde elde edilen veriler

kullanılarak dairesel kesitli yakınsak ıraksak lüle (Şekil 3.5.) için termodinamik hesaplamalar yapılacaktır.



Şekil 3.5. Dairesel kesitli yakınsak - ıraksak lülenin perspektif görünüşü.

Tasarlanmış olan dairesel kesitli yakınsak – ıraksak lülenin çıkıştaki Mach sayısı $M_3 = 1.92$ olarak hesaplanmıştı. Buna göre akış; boğazda sonik, lülenin ıraksak kısmında ise sesüstü olmalıdır. Bu duruma göre $P_0 = 700$ kPa ve $T_0 = 288$ K şartlarına göre mükemmel gaz davranışı kabul edilecek olunursa durma yoğunluğu şu şekilde bulunur:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0} = \frac{700000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^2}{287 \text{ kg m}^2 \text{ s}^2 / \text{K} \cdot 288 \text{ K}} = 8.47 \text{ kg/m}^3$$

Lüle boğazındaki $M = 1$ için Ek Tablo 1.1' den,

$$\frac{P^*}{P_0} = 0.5283, \quad \frac{T^*}{T_0} = 0.8333, \quad \frac{\rho^*}{\rho_0} = 0.6339,$$

değerleri okunur. Bu durumda,

$$T^* = 0.8333 \cdot T_0 = 248.32 \text{ K}$$

$$P^* = 0.5283 \cdot P_0 = 369.81 \text{ kPa}$$

$$\rho^* = 0.6339 \cdot \rho_0 = 5.37 \text{ kg/m}^3$$

$$V^* = \sqrt{k \cdot R \cdot T^*} = 315.874 \text{ m/s}$$

akışkanın boğaz şartlarındaki termodinamik değerleri elde edilmiştir. (Şekil 3.6.)

Akışın izentropik olduğu kabul edilerek akışkanın çıkıştaki Mach sayısı değerine göre diğer termodinamik özellikleri bulunabilir. Eşitlik (3.1)'den basınç oranı için hesaplanan çıkış kesitindeki Mach sayısı ($M_3 = 1.92$) için, Ek Tablo 1.1 'den aşağıdaki değerler okunur:

$$\frac{P}{P_0} = 0.14469, \quad \frac{T}{T_0} = 0.57561, \quad \frac{\rho}{\rho_0} = 0.25138, \quad M^* = 1.5957,$$

Bu durumda,

$$T_e = 0.57561 \cdot T_0 = 165.77 \text{ K}$$

$$P_e = 0.14469 \cdot P_0 = 101.283 \text{ kPa}$$

$$\rho_e = 0.25138 \cdot \rho_0 = 2.13 \text{ kg / m}^3$$

$$A^* = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2.53^2}{4} = 5.03 \text{ mm}^2$$

ve çıkış kesitindeki hız değeri;

$$V_e = M^* \cdot V^* = 1.5957 \cdot 315.874 = 504.04 \text{ m / s}$$

elde edilir.

Akışın sürekli rejimde olduğu varsayılarak, yakınsak ıraksak lülenin tüm uzunluğu boyunca akışkanın kütleli debisinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla kütleli debi, lülenin herhangi bir en-kesitindeki özellikler kullanarak hesaplanabilir.

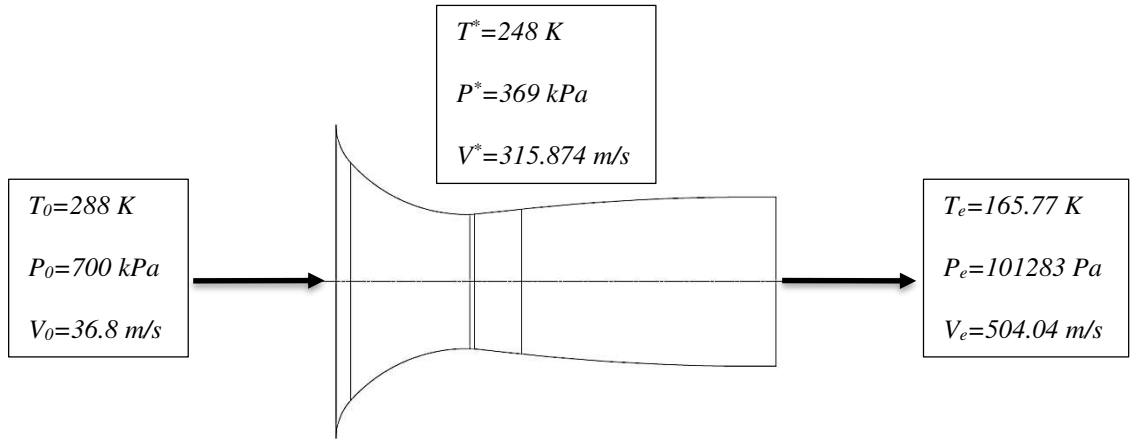
Boğazdaki özellikler kullanılarak kütleli debi,

$$\dot{m} = \rho^* \cdot A^* \cdot V^* = 5.37 \cdot (5.03 \times 10^{-6}) \cdot 315.874 = 0.00853 \text{ kg / s}$$

olarak hesaplanmıştır. Giriş hızı V_0 hesabı için aynı şekilde,

$$V_0 = \frac{\dot{m}}{A_0 \cdot \rho_0} = \frac{0.00853}{(27.36 \times 10^{-6}) \cdot 8.47} = 36.82 \text{ m / s}$$

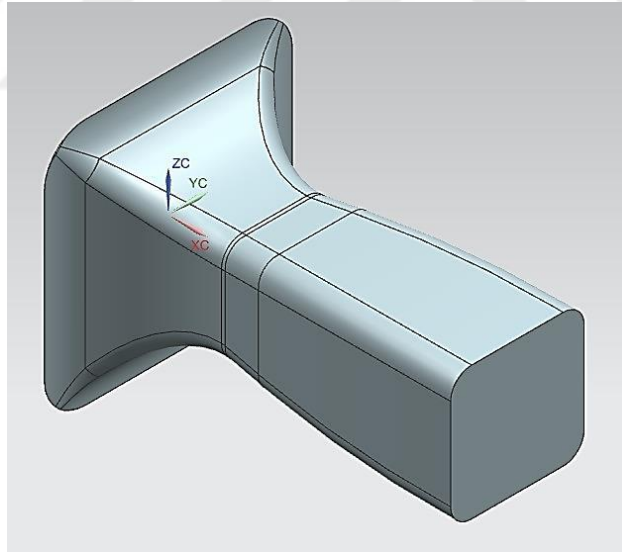
olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Dairesel kesitli lüle akışının giriş boğaz ve çıkış şartları şematik gösterimi.

3.4.2.2. Kare Kesitli Lüle İçin Termodinamik Hesaplamalar

Bu bölümde de, elde edilen veriler kullanılarak kare kesitli yakınsak ıraksak lüle (Şekil 3.7.) için termodinamik hesaplamalar yapılacaktır.



Şekil 3.7. Kare kesitli yakınsak-ıraksak lülenin perspektif görünüşü.

Dizayn edilmiş olan dairesel kesitli yakınsak – ıraksak lülenin çıkıştaki Mach sayısı $M_3 = 1.92$ olarak hesaplanmıştı. Buna göre akış; boğazda sonik, lülenin ıraksak kısmında ise sesüstü olmalıdır. Bu duruma göre $P_0 = 700 \text{ kPa}$ ve $T_0 = 288 \text{ K}$ şartlarına göre mükemmel gaz davranışı kabul edilecek olunursa durma yoğunluğu şu şekilde bulunur:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0} = \frac{700000 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2}{287 \text{ kg m}^2 \text{s}^2 / \text{K} \cdot 288 \text{ K}} = 8.47 \text{ kg/m}^3$$

Lüle boğazındaki $M = 1$ için Ek Tablo 1.1' den,

$$\frac{P^*}{P_0} = 0.5283, \quad \frac{T^*}{T_0} = 0.8333, \quad \frac{\rho^*}{\rho_0} = 0.6339,$$

Değerleri bulunur. Bu hesaplamalardan,

$$\begin{aligned} T^* &= 0.8333 \cdot T_0 = 248.32 \text{ K} \\ P^* &= 0.5283 \cdot P_0 = 369.81 \text{ kPa} \\ \rho^* &= 0.6339 \cdot \rho_0 = 5.37 \text{ kg/m}^3 \\ V^* &= \sqrt{k \cdot R \cdot T^*} = 315.874 \text{ m/s} \end{aligned}$$

akışkanın boğaz şartlarındaki termodinamik değerleri elde edilmiştir. (Şekil 3.8)

Akışın izentropik olduğu kabul edilerek akışkanın çıkıştaki Mach sayısı değerine göre diğer termodinamik özellikleri bulunabilir. Eşitlik (3.1)'den basınç oranı için hesaplanan çıkış kesitindeki Mach sayısı ($M_3 = 1.92$) için şu değerler Ek Tablo 1.1.'den okunur:

$$\frac{P}{P_0} = 0.14469, \quad \frac{T}{T_0} = 0.57561, \quad \frac{\rho}{\rho_0} = 0.25138, \quad M^* = 1.5957,$$

$$\begin{aligned} T_e &= 0.57561 \cdot T_0 = 165.77 \text{ K} \\ P_e &= 0.14469 \cdot P_0 = 101.283 \text{ kPa} \\ \rho_e &= 0.25138 \cdot \rho_0 = 2.13 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$A^* = 6.02 \text{ mm}^2$$

ve çıkış kesitindeki hız değeri,

$$V_e = M^* \cdot V^* = 1.5957 \cdot 315.874 = 504.04 \text{ m/s}$$

bulunmuştur.

Akışın sürekli rejimde olduğu varsayılarak, yakınsak ıraksak lülenin tüm uzunluğu boyunca akışkanın kütleli debisinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla kütleli

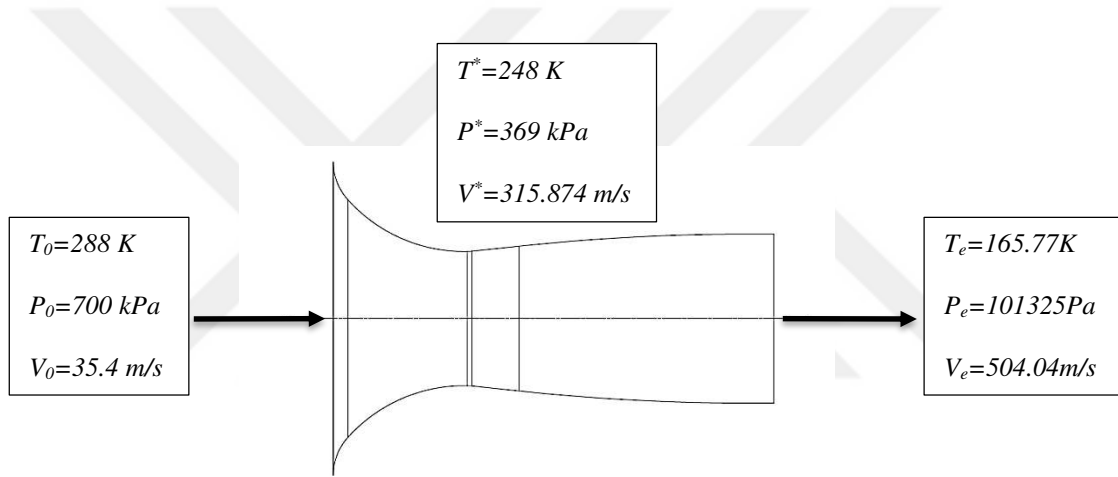
debi, lülenin herhangi bir en-kesitindeki özellikler kullanarak hesaplanabilir. Boğazdaki özellikler kullanılarak kütleli debi,

$$\dot{m} = \rho^* \cdot A^* \cdot V^* = 5.37 \cdot (6.02 \times 10^{-6}) \cdot 315.874 = 0.0102 \text{ kg/s}$$

olarak hesaplanmıştır. Kare kesitli lüle için lüle giriş hızı V_0 hesabı için aynı şekilde,

$$V_0 = \frac{\dot{m}}{A_0 \cdot \rho_0} = \frac{0.0102}{(34.07 \times 10^{-6}) \cdot 8.47} = 35.386 \text{ m/s}$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.8. Kare kesitli lüle akışının giriş boğaz ve çıkış şartları şematik gösterimi.

3.5. Türbülans Modelleri

Türbülans modelleri yapılan analiz içerisinde büyük farklılıklara neden olabilir. Bir çok türbülans modelinin olması yapılacak analiz için seçimi zorlaştırmaktadır. Mükemmel ya da her probleme uyar denilecek bir türbülans modeli yoktur. Türbülans modelleri Reynolds sayısı, akışkan türü, basınç dağılımı, sınır tabaka kalınlığı gibi belirli parametrelere bağlıdır [25].

3.5.1. K-Epsilon Türbülans Modeli

Bu modelde kinetik enerji ve türbülans kayıpları çözülmemektedir. Bu model uygulamaları için cidar fonksiyonu olması gerekmektedir. Sadece tam gelişmiş türbülans

akışlar için uygundur. Bu türbülans modelinin bazı güçlü yönleri; uygulamasının kolay olması, çabuk yakınsama, bir çok akış durumu için tahmin kolaylığı, ve dış aerodinamik için iyi olmasıdır. Modelin zayıf yönleri ise; aksi simetrik jet akışları, girdap akışları ve güçlü akış ayrıklaştırılmasında uygun değildir, ters basınç değişimlerinde çok zayıf hassasiyet elde edilmesidir [25].

3.5.2. K-Omega Türbülans Modeli

Kinetik enerji ve türbülans frekansı için çözüm yapmaktadır. Cidar çevresindeki akışlar için iyi sonuçlar vermektedir. Geçişleri iyi bir şekilde tahmin etmektedir. İlk tahminlerde çok iyi derecede hassaslık göstermektedir. Cidar çevresinde bunu türbülans modeli kullanılmaktadır. Bu türbülans modelinin bazı güçlü yönleri; Sınır tabakalar için mükemmel ters basınç değişimlerinde çalışır, ayrıştırılmış güçlü akışlarda, jet akışlarında ve serbest kayan tabakalarda kullanılmasıdır. Modelin zayıf yönleri ise, yaklaşım için zaman gereksinimi daha fazladır, daha fazla hafıza gereksinimi vardır, cidar içerisinde çözüm gerektirir, geniş çaplı ayrımları erkenden tahmin etmesidir [25].

3.5.3. SST Modeli

Bu model k-omega olarak cidar civarında k-epsilon olarak da serbest akım alanında çalışmaktadır. Fakat cidar fonksiyonunu kullanmaktadır. Bu modelin bazı güçlü yönleri türbülans kayma gerilimini açıklar, ayrıklaşma ve geçiş bölgeleri için yüksek kesinlikte tahminler oluşturur, çok iyi serbest akış ve sınır tabaka sonuçları vermektedir. Bu modelin zayıf yönler ise; serbest kayma ve girdaplarda k-omega modeli kadar iyi olmaması ve tüm akışlar için uygun olmamasıdır. Cidarda daha iyi mesh çözümü gerektirmektedir [25].

4. BULGULAR

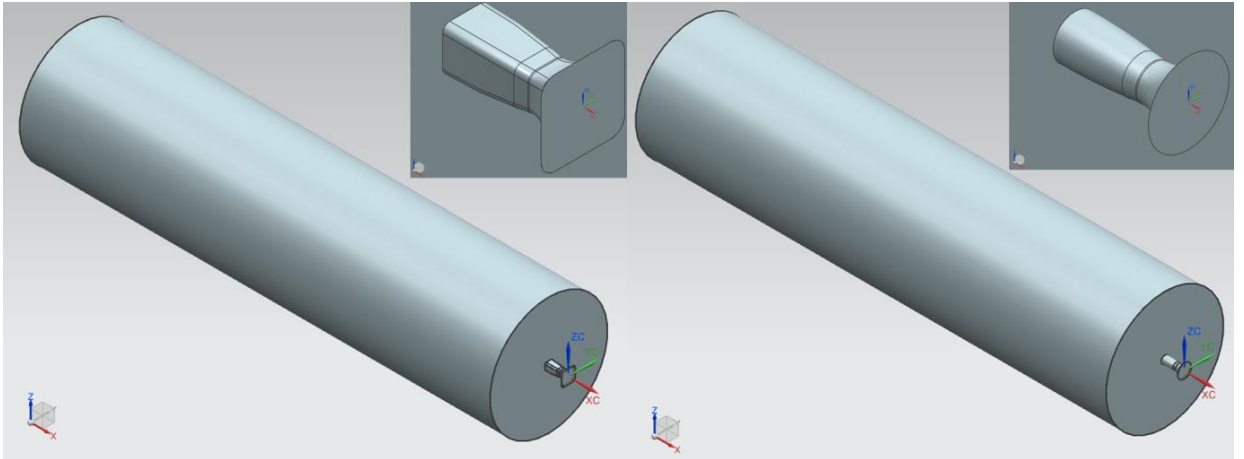
4.1. Yakınsak-İraksak Lüledeki Sesüstü Akışının Analiz Aşamaları

700 kPa'lık bir giriş basıncı ile çalışan ve standart şartlardaki 288 K'lık giriş sıcaklığında bir kompresör referans alınmıştır. Kompresör, 0.40 m³/dak hacimsel debi katalog değerinden seçilmiştir (Ek-3). Bu veriler referans alınarak, örnek sınır şartlara göre dairesel kesitli ve kare kesitli olmak üzere iki farklı süpersonik hava elde edilen yakınsak-ıraksak lüle tasarlanmıştır.

Başlangıçta, çalışma lülesi giriş basıncı, lüle çıkış basıncı, lüle çalışma sıcaklığı ve akışkan giriş hızı tanımlanır. Bu sınır şartları parametreleri yukarıda hesaplamalar kısmında ve lülenin örnek çalışma koşulları belirlenmiştir

Bu verilerle sesüstü akışın elde edilmesi için, Mach sayının boğazdaki istenen değeri bire eşit olması gerekmektedir. O halde çıkış Mach sayısı ve boğaz çapı ile lüle çıkış çapının oranı, Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3) kullanılarak hesaplanabilir. Daha sonra, lülenin gerçek geometrisini belirlemek için yukarıda yapılan örnek hesaplamalar takip edilmiştir. Tablo 3.1.'de verilen şartlara göre tasarlanmış yakınsak-ıraksak lüle profili için çeşitli yay parçaları, açıları ve uzunlukları verilmektedir.

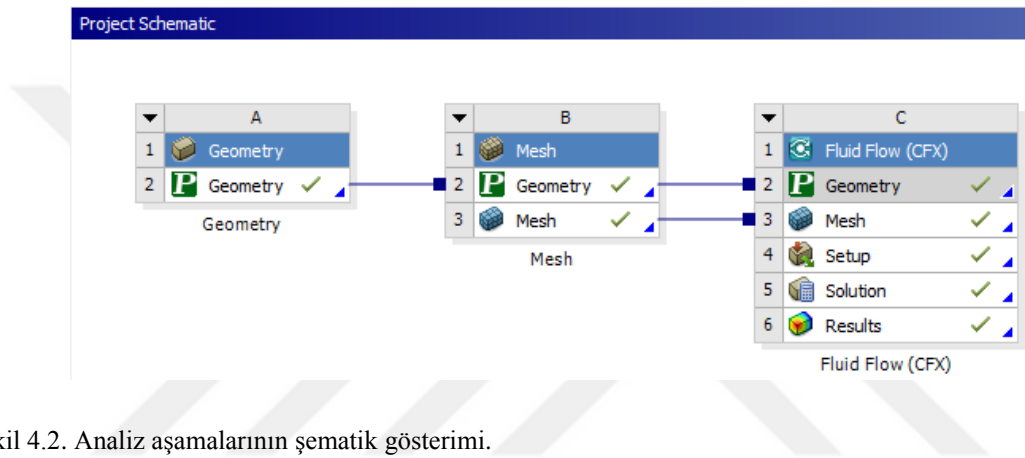
Yapılan hesaplamalar doğrultusunda oluşturulan lüle profilinin Şekil 3.5.'de ölçülendirilmesi yapılmıştır. Tasarımı yapılan lüle profili olarak daire ve kare kesit için iki farklı çizim yapılmıştır.



Şekil 4.1. Dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin analiz modellerinin perspektif görünüşleri.

Tasarımı yapılan lülelerden akan akışkanın çıkışındaki termodinamik özelliklerinin bilgisayar destekli analiz programında çözümü için yakınsak-ıraksak lüle çıkışına Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi 50 mm çapında 200 mm uzunluğundaki bir dairesel kesitli prizmaya gereksinim duyulmuştur.

Oluşturulan 3 boyutlu geometriler, analiz programına aktarılmıştır. Analiz daire ve kare kesitli olmak üzere aynı sınır şartlarında çalışan iki farklı kesitteki geometriye tatbik ettirilmiştir. Analiz için Şekil 4.2. 'de gösterildiği gibi geometri - meshleme - sınır şartları tanımlama - çözümleme ve sonuçlar aşamaları takip edilerek analiz sonuçlandırılmıştır.

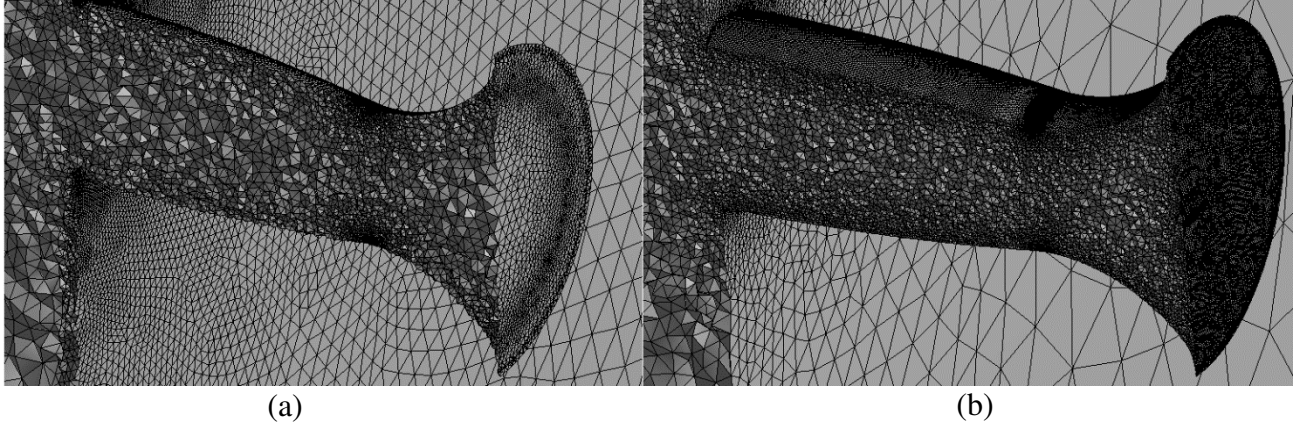


CFX ile yapılan çözümlemede kullanılan parametreler:

- İterasyon Sayısı :1000
- Yakınsama Kriteri (RMS) : 10^{-6}
- Giriş Şartlarının Türbülans Modeli : Medium (Intensity = 5%) şartlarına göre CFX'de çözüm yapılmıştır.

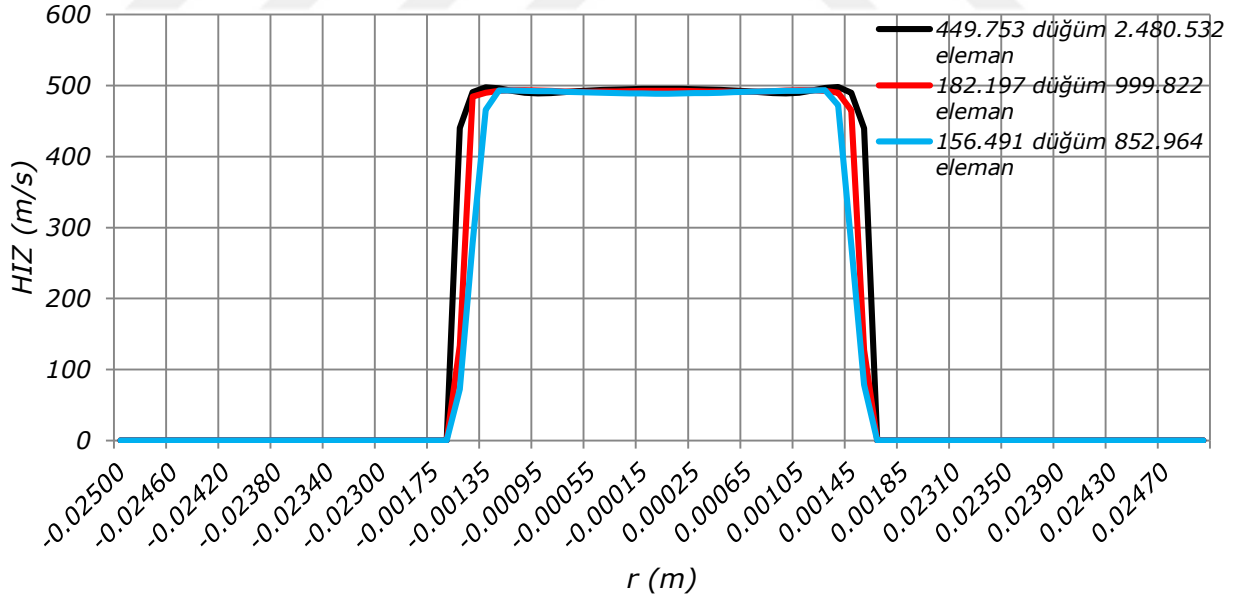
4.2. Eleman Sayısı Yoğunluğunun Seçimi

Analizi daha gerçekçi bir şekilde sonuçlandırmak ve güvenilir sonuçlar almak için, çalışma alanının çok küçük elemanlara bölünmüş olması gerekir. Bu sebeple analiz çalışmalarında, eleman sayısı yoğunluğunu seçme işlemi çok önemlidir. Farklı eleman sayısı yoğunlukları seçilerek analizler yapılmış ve bu eleman sayısı yoğunluklarına göre analiz sonuçları mukayese edilmiştir. Birinci eleman sayısı 852,964 elemana, ikinci eleman sayısı 999,822 elemana bölünmüştür. Üçüncü eleman sayısı 2,480,532 elemana bölünmüştür.



Şekil 4.3.(a) Düşük, (b) Yüksek sayılı elemana bölünmüş modeller

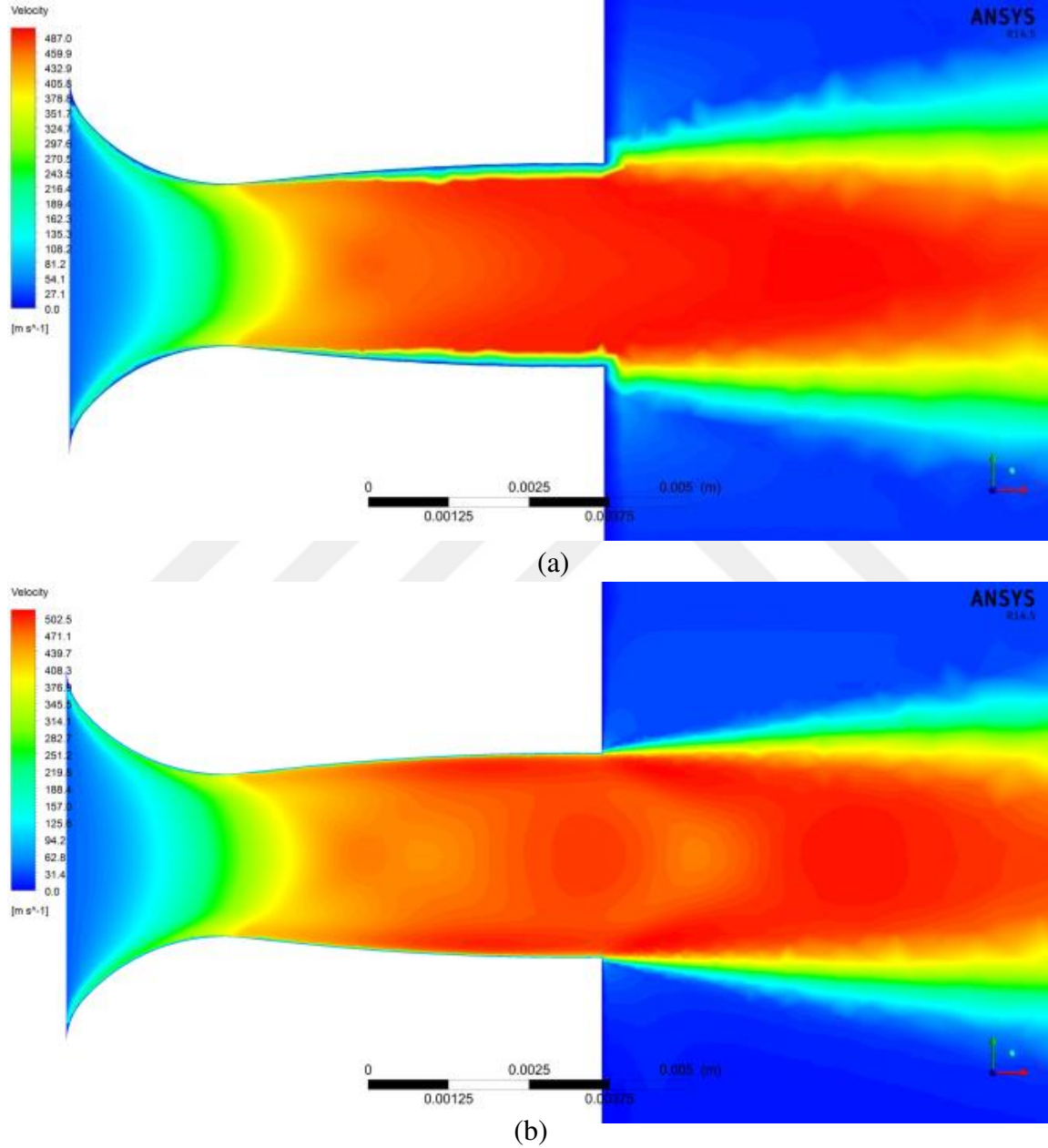
Eleman sayısı yoğunluklarına göre analiz sonuçlarından hız değerlerinin grafiği Şekil 4.4.'de gösterilmiştir. Şekil 4.4. grafiğinde görüldüğü gibi, 2,480,532 elemana bölünmüş olan modelle yapılan analizde, lüle çıkışına yakın kısımdaki en kesiti boyunca alınan hız değerlerinde sınır tabaka kalınlığının daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Bizim için sınır tabaka etkilerinin daha az olarak görülmesi, daha gerçekçi bir çalışma ortaya koyacaktır. Bu sebeple yüksek düğüm ve yüksek elemana bölünmüş model tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. Eleman sayısı yoğunluklarına göre hız değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.5.(a) ve Şekil 4.5.(b)'de düşük ve yüksek eleman sayısı yoğunluklarına göre ANSYS'de yapılan analizler sonucunun hız değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.5., Şekil 4.4.'de bir kesit için verilen grafik değerlerinin görsel olarak cidar boyunca gösterilmiştir.

Burada da aynı şekilde lüle cidarı boyunca çıkış kesitine kadar olan kısmın hız dağılımlarına dikkat edilecek olursa, Şekil 4.5.(b)'deki analiz sonucunun daha gerçekçi bir çözüm oluşturduğu görülmektedir.



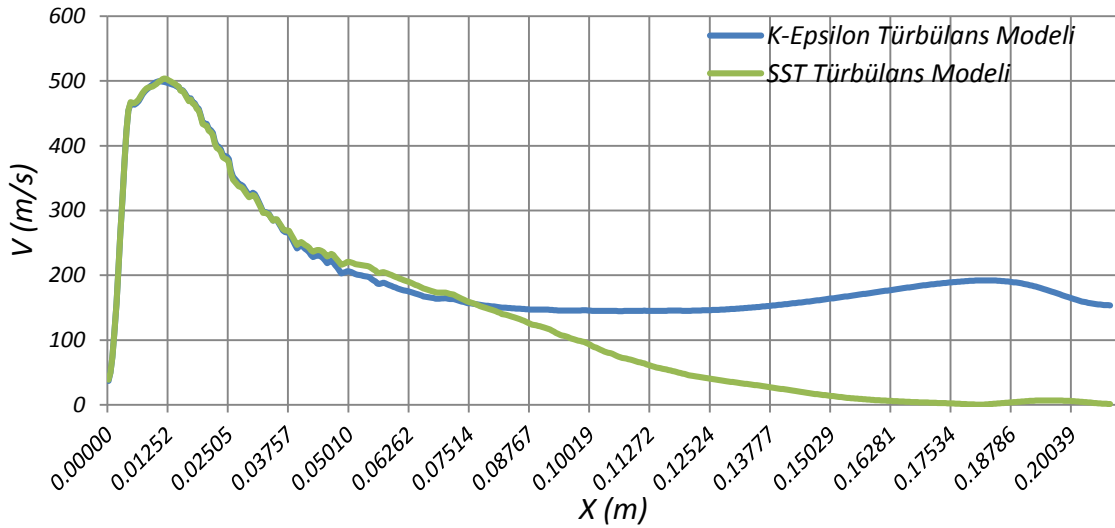
Şekil 4.5. (a) Düşük, (b) Yüksek sayılı elemana bölünmüş modellerin hız değerleri dağılımı

Bu sebeple kullanılmakta olan bilgisayarın işlemcisinin çözüm kapasitesi ve bilgisayar zamanı da dikkate alınarak, maksimum değerde olan 449,753 düğüm ve 2,480,532 eleman dikkate alınarak, Şekil 4.3.(b)'de gösterilen eleman sayısı yoğunluğu ile analiz yapılmıştır.

Eleman sayısı seçimi işleminin ardından sınır şartlarının bilgisayar analiz programı ANSYS’de tanıtılması gerekir.

4.3. Türbülans Modelinin Seçimi

Önceki bölümde belirtildiği gibi, türbülans modelleri yapılan analiz içerisinde büyük farklılıklara neden olabilir. Bu seçimde, Reynolds sayısı, akışkan türü, basınç dağılımı, sınır tabaka kalınlığı gibi belirli parametreler etkilidir. Yaptığımız analizler Şekil 4.6’da görüldüğü üzere K-Epsilon ve SST türbülans modelleri olarak iki farklı türbülans modeline göre hız değerleri karşılaştırılmış ve uygun türbülans modeli olarak SST modeli seçilmiştir.



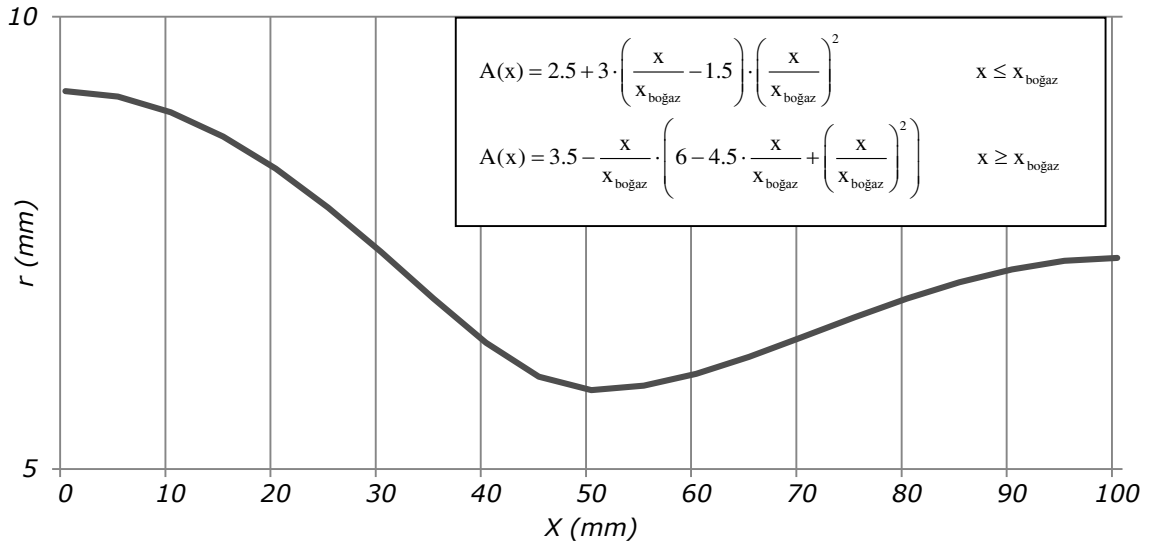
Şekil 4.6. K-Epsilon ve SST türbülans modelleri için modeldeki eksenel hız değerleri.

Çözümleme için, mesh yoğunluğu ve türbülans modeli kadar önemli olan bir başka husus ise iterasyon sayısı ve çözüm adımlarının belirlenmesidir. Bu önemli parametreler de ANSYS’de belirtilir. Sınır şartları ve çözümleme değerleri ANSYS’e tanıtılmasının ardından çözümleme aşamasına geçilir. Çözümleme işlemi bittikten sonra, yapılan çözümün sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanması safhasına geçilir.

4.4. ANSYS CFX’de Yapılan Analizin Geçerlilik Çalışması

Yapılan çalışmanın bu aşamasında Hesaplamalı Akışlar Dinamiği (HAD) paket programı ANSYS CFX’de yapılan çalışmanın doğrulanması için referans olarak Arina’nın [26] çalışması alınmıştır.

Arina [26], çalışmasındaki geometri Şekil 4.7.’de belirtildiği üzere, boğaz alanı 100 mm^2 , uzunluk $x = 100 \text{ mm}$ ve $x_{\text{boğaz}} = 50 \text{ mm}$ ’dir. Arina [26] bu çalışmasında, kullandığı alan denklemlerini vermiştir. Yaptığımız çalışmada, yakınsak - ıraksak lülenin, boğaza kadar ve boğaz geometrisinden sonra kullanmış olduğu bu alan denklemleri kullanılarak Arina’nın [26] çalışmasındaki geometri oluşturulmuştur. Şekil 4.7.’de bu çalışmanın grafiksel olarak lüle eğrisi verilmiştir.



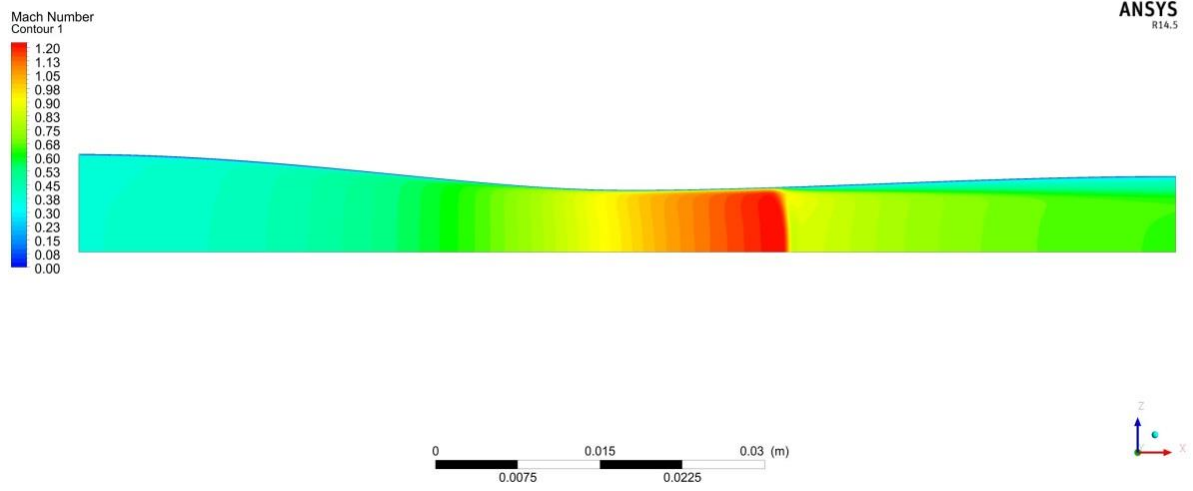
Şekil 4.7. Arina’nın Laval nozul geometrisi

Arina [26] çalışmasında kullanılan sınır şartları; giriş sıcaklığı 288 K, giriş basıncı 100000 Pa, çıkış basıncı 83049 Pa’dır.

Analizi ANSYS CFX’de gerçekleştirdikten sonra Arina’nın çalışmasındaki gibi lüle boğaz kesitinde sonik hız elde edildikten sonra karşı basınç etkisinden dolayı normal şok oluşmuş ve subsonik hızla havanın lüleyi terkettiği görülmüştür (Şekil 4.8.).

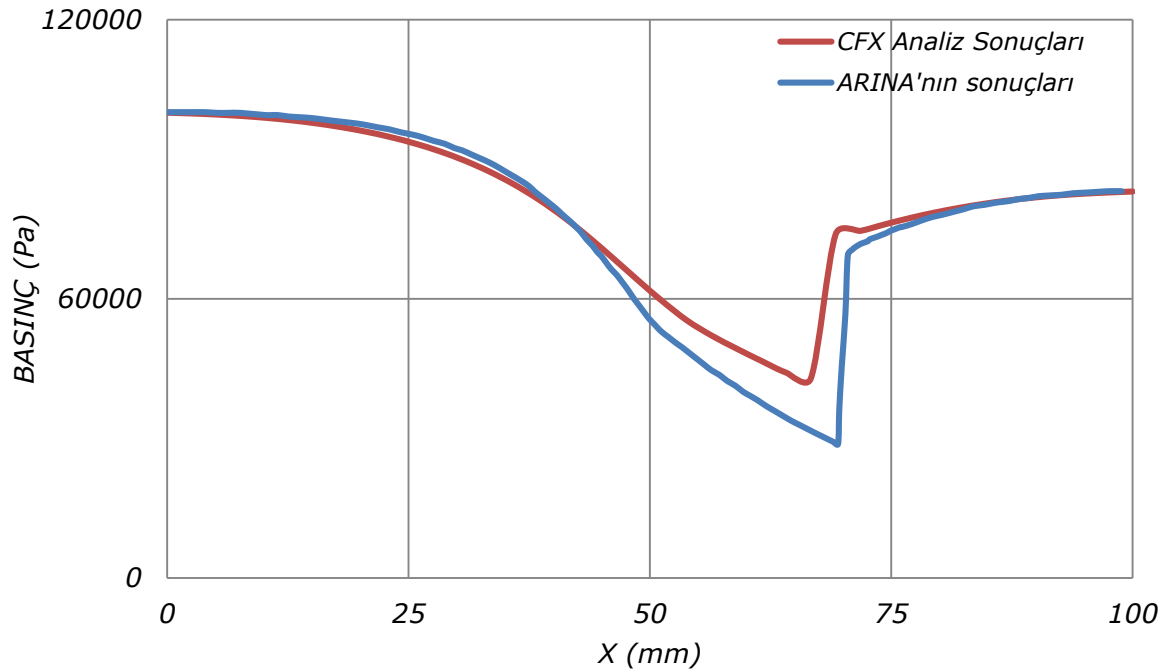
Arina [26] çalışmasında, şok dalgası $x = 69 \text{ mm}$ ‘de oluşmaktadır. CFX’deki analizde ise yaklaşık olarak $x = 67 \text{ mm}$ ‘de elde edilmiştir. Aynı akış davranışının elde

edildiği ve şok dalgası konumunun CFX’de yaptığımız analizle yaklaşık olarak uyduğu görülebiliyor.



Şekil 4.8. Arina laval geometrisinin CFX’deki çözümünün Mach sayısı değişimi.

Şekil 4.9.’da Arina’nın çalışmasında elde edilmiş aksenal basınç değişim değerleri ile arinanın geometrik şartlarına ve sınır şartlarına göre CFX’de yapılan analizin aksenal basınç değişimi aynı grafikte toplanmıştır. CFX’de yapılan analiz sonuçlarının Arina’nın sayısal çalışmasıyla uyduğu gözükmemektedir.



Şekil 4.9. Arina’nın aksenal basınç değişimleri ile analiz basınç değişimleri dağılımları.

4.5. Tasarımı Yapılmış Yakınsak - Iraksak Lüle Analizlerinin İrdelenmesi

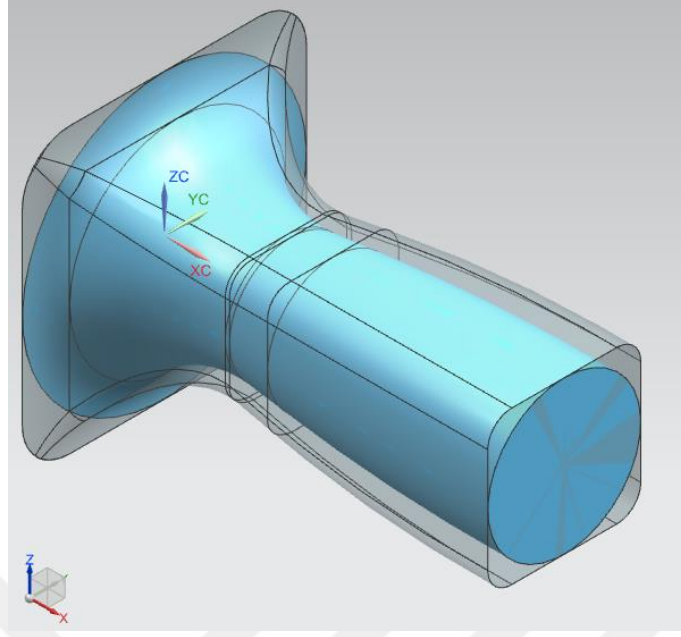
4.5.1. Dairesel Kesitli ve Kare Kesitli Yakınsak-Iraksak Lüle Analizlerinin İrdelenmesi

Günümüzde laboratuvar şartlarında yapılan analiz çalışmaları ciddi anlamda maliyet gerektirir. Laboratuvar ortamı için gerekli şartları tam anlamıyla oluşturmak ve ortamın oluşmasından sonra sürekli tekrarlanacak olan deneylerde kullanılan sarf malzemesinin kullanımı dolayısıyla hem zaman kaybına, hem de ciddi anlamda maliyetlere sebep olmaktadır.

Gelişen teknoloji ve bilgisayar yazılımlarındaki çeşitlilik, laboratuvar şartlarını bilgisayar programlarına tanıtılabilir hale getirmiştir. Bu sayede laboratuvar çalışmalarının maliyetinden ve işlemlere harcanan zamandan büyük ölçüde tasarruf edilmiştir. Ayrıca bilgisayar destekli analiz programlarının kullanımı; tasarımı yapılan prosesin bir prototipini üretmeden tasarımın başarılı olup olunmadığına önceden karar vererek veyahut yapılan tasarımın eksiklik ve hatasının önceden farkına varılması ile, üretim noktasında ciddi kolaylıklar sağlamaktadır.

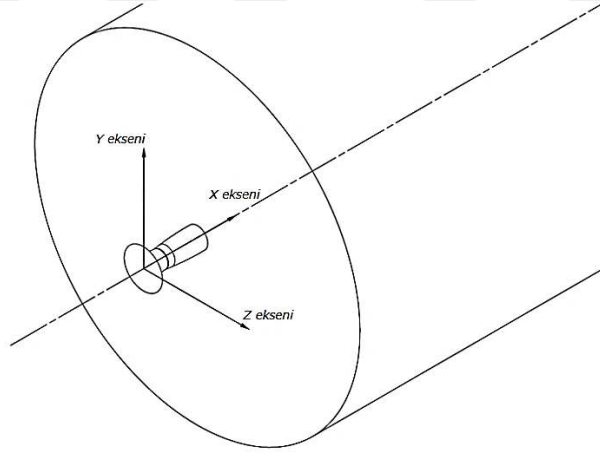
Yapılan çalışmanın bu bölümünde, Unigraphics’de tasarımı yapılmış olan dairesele kesitli ve kare kesitli olmak üzere iki farklı kesitli lüle modelinin ANSYS analiz programında akış analizi yapılmıştır. Yapılan bu analizlerin karşılaştırılması yapılmış ve dairesele kesitli ve kare kesitli lülelerin avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur.

Kare kesitli lüleye, dairesele kesitli lüle ile aynı sınır şartları uygulanmıştır. Önceki bölümde belirtildiği gibi, kare kesitli lüle, dairesele kesitli lülenin dış teğetinden oluşmuş bir kare şeklini alacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.10). Bu durumda, 3 boyutlu çizimi gerçekleştirilmiş olan kare kesitli lüle, dairesele kesitli lüleye nazaran daha büyük giriş ve çıkış kesit alanına sahiptir. Sonuç olarak kare kesitli lüle, dairesele kesitli lüleye göre akışkana daha az sıkıştırma kuvveti uygulayacağını söyleyebiliriz.



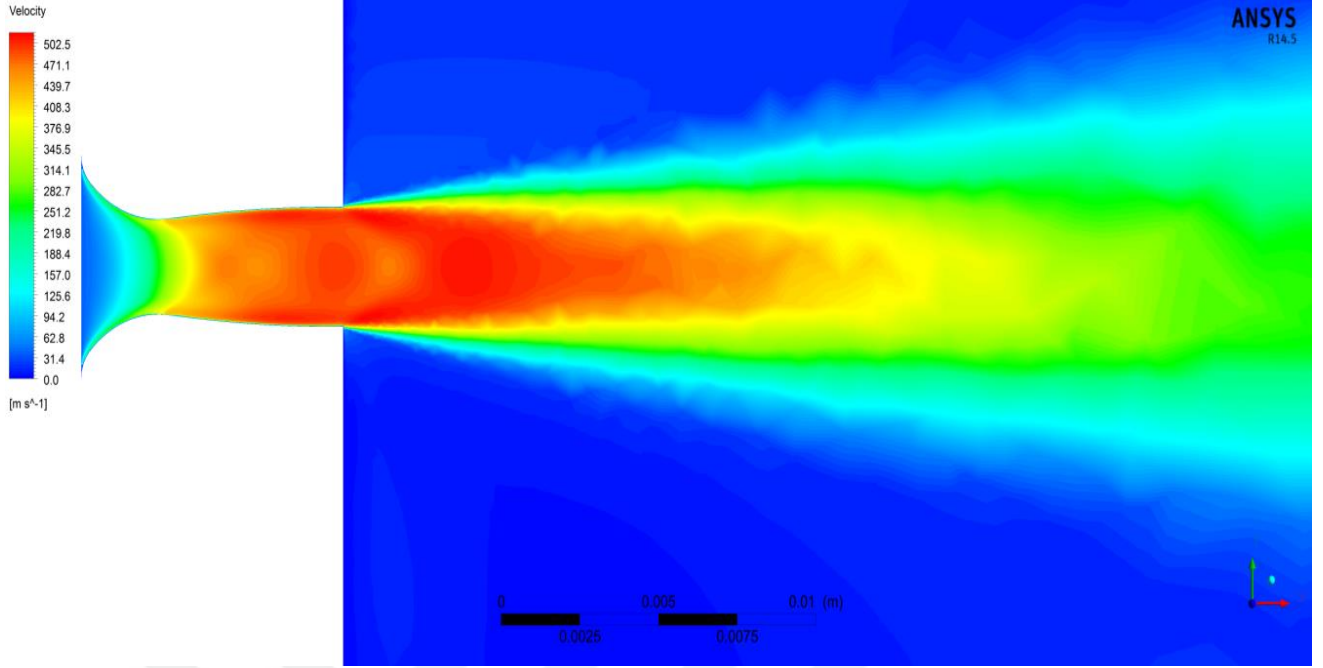
Şekil 4.10. Dairesel kesitli lülenin dış teğeti olarak tasarlanmış kare kesitli lüle.

Şekil 4.11.'de yakınsak – ıraksak lüle geometrisinin eksen yönleri gösterilmiştir. Burada belirtilen eksen yönlerine göre analiz şekil ve grafikleri isimlendirilecektir.



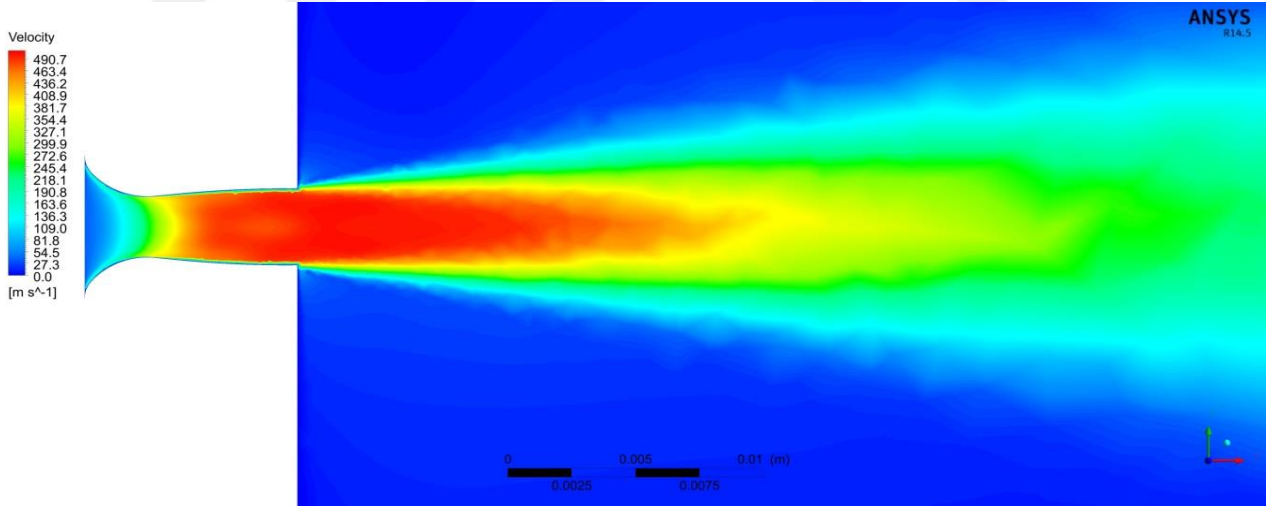
Şekil 4.11. Lüle x- y-z eksen yönlerinin gösterimi.

Şekil 4.12.'de daireseel kesitli lülenin $z=0$ koordinatlarında oluşturulan xy düzleminde hız değışimleri görölmektedir. Lülenin çıkışında elde edilen sesüstü hız değeri ve elde edilen hız dağılımı görölmektedir.



Şekil 4.12. Dairesel kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi hız değişimi.

Şekil 4.13.'de ise aynı sınır şartları uygulanmış kare kesitli lülenin xy eksenine göre hız değişimi oluşturulmuştur.

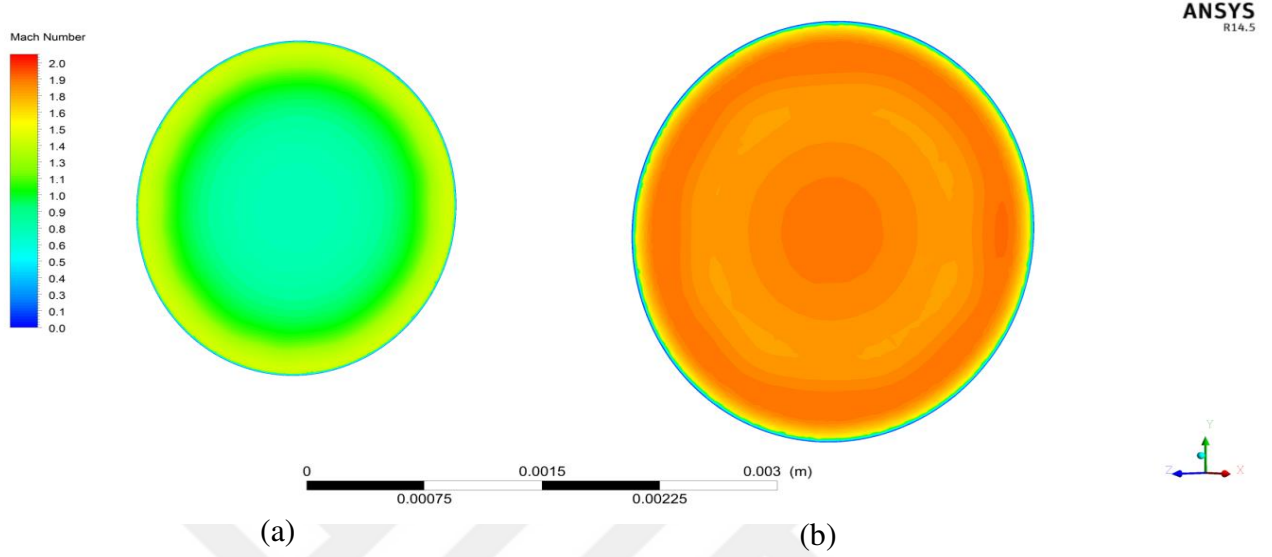


Şekil 4.13. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi hız değişimi.

Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'de dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerde yapılan analiz sonuçlarından, akış yönüne dik kesitindeki (en-kesiti), boğaz şartlarındaki ve çıkış şartlarındaki Mach sayısındaki değişimler görülmektedir.

Şekil 4.14.(a)'da verilen dairesel kesitli lülenin boğaz kesitinde, merkezden cidara doğru yükseldiği, tam cidarda ise düştüğü görülmüştür. Şekil 4.14.(b)'deki çıkış kesiti

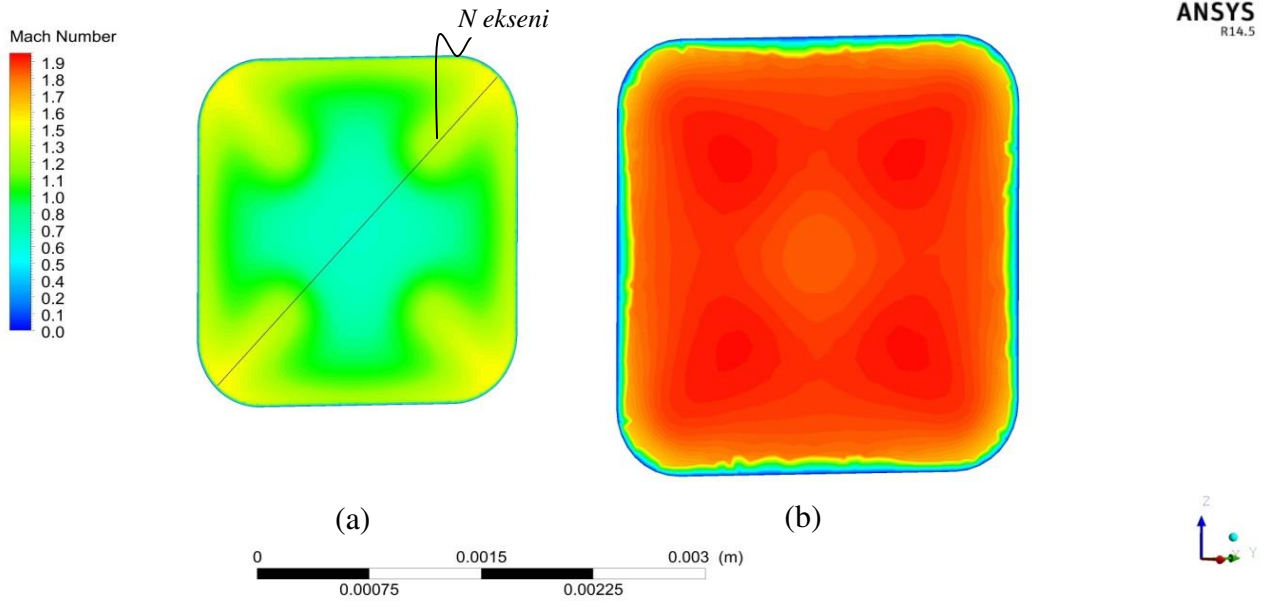
incelendiğinde, Mach sayısındaki değişimin, merkezde maksimum değere ulaştığı, sonra çepere doğru halka dilimler halinde düştüğü, çepere yakın yerlerde tekrar yükseldiği ve tam çeperde en düşük seviyeye indiği görülmüştür.



Şekil 4.14. Daire kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti Mach sayısı değişimi.

Şekil 4.14.(a)'da verilen kare kesitli lülenin boğaz kesitinde hız değerlerindeki değişimleri incelenirse, dairesel kesitli lüleden olduğu gibi, iç cidarın merkeze yakın bölgelerinde daha düşük bir hız bölgesi, uzak bölgelerinde daha yüksek bir hız bölgesi oluşturduğu görülmüştür. Dairesel kesitli lüleden farklı olarak, Şekil 4.15.(a)'da görüldüğü gibi, köşegen N-ekseni üzerinde cidarın yakın etkisi ile (N-eksenini kesen iki kenar), yüksek bir hız bölgesinin oluştuğu görülmüştür.

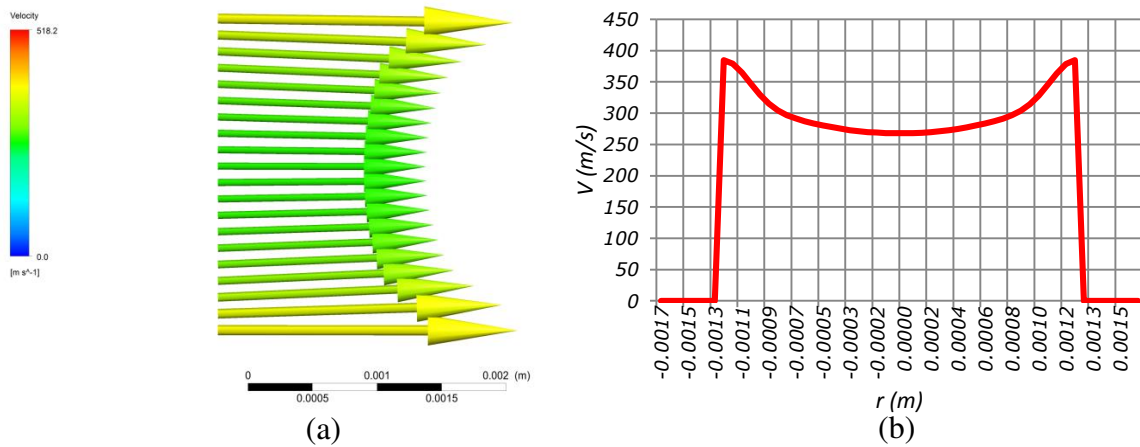
Şekil 4.15.(b)'de görülen kare kesitli lülenin çıkış kesitinde hız değerlerindeki değişimleri incelenirse, tam merkezde nispeten daha düşük bir Mach sayısının bulunduğu bir bölgenin oluştuğu görülmektedir. Yine köşegenler boyunca (N-ekseni), daha yüksek Mach sayılarının oluştuğu dairesel halkalardan oluşan, hız bölgelerinin meydana geldiği görülmektedir. Cidara yakın bölgelerde Mach sayısının azaldığı ve sınır tabakanın etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. Kare kesitli lülenin (a) Boğaz kesiti (b) Çıkış kesiti Mach sayısı değişimi.

Şekil 4.14. ve Şekil 4.15. mukayese edilecek olursa, kare kesitli lüle ile dairesel kesitli lülede, hız değişim bölgelerinin farklı olduğu görülebilir. Yapılan analizler sonucunda, kare kesitli yakınsak-ıraksak lülenin en kesitinde, dairesel kesitli lüleye göre daha kompleks olarak değişen akışkan özellikleri elde edilmiştir. Dairesel kesitli lülenin hız değerleri, adeta yarıçap değerinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de akış yönündeki hız vektörlerinin cidar boyunca değişimleri görülmektedir. Boğaz ve çıkıştaki hız vektörleri (a) ve hız değişim grafiklerinde (b) hızın cidara yakın kısımlarında maksimum olduğu tespit edilmiştir.



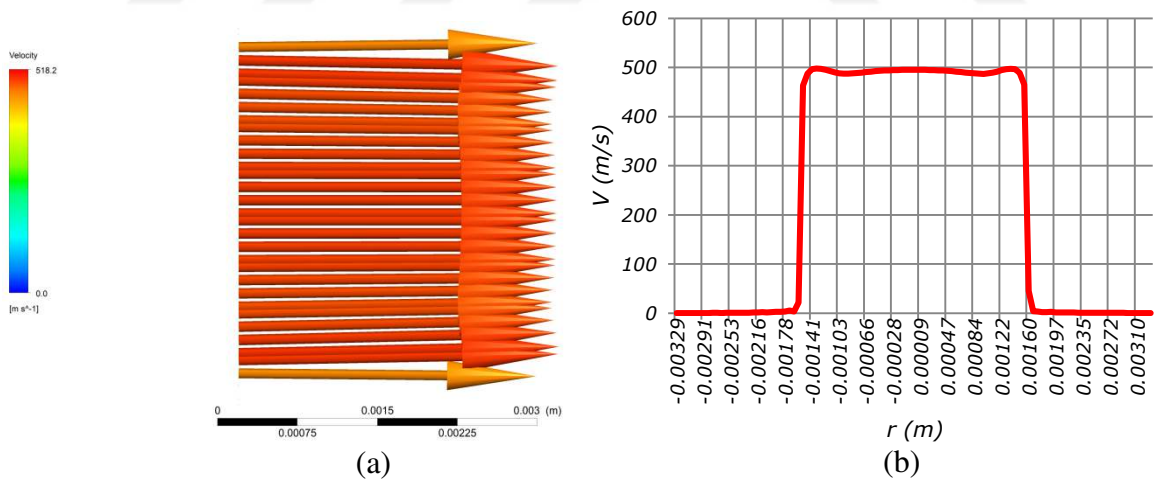
Şekil 4.16. Dairesel kesitli lüledeki boğaz en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.

Şekil 4.16.'da görüldüğü üzere, hız ortalamasının $Mach = 1$ civarında olduğu görülür. Şekil 4.16(a)'da verilen hız vektörleri, tam cidarda hızın sıfır olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde, cidara yakın kısımda ise, hız maksimum değeri almıştır.

Şekil 4.16.(b)'deki hız değerleri sayısal olarak okunabilir. $r = 0$ mm için, boğaz kısmında tam eksendeki hız değeri 267.8 m/s olarak okunmaktadır. Aynı şekilde $r = 0.7$ mm yarıçap değeri için 290.44 m/s hız değeri, $r = 1.2$ mm'de ise 385.3 m/s hız değeri okunmaktadır. Yani boğazda, cidara doğru gidildikçe hız değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır.

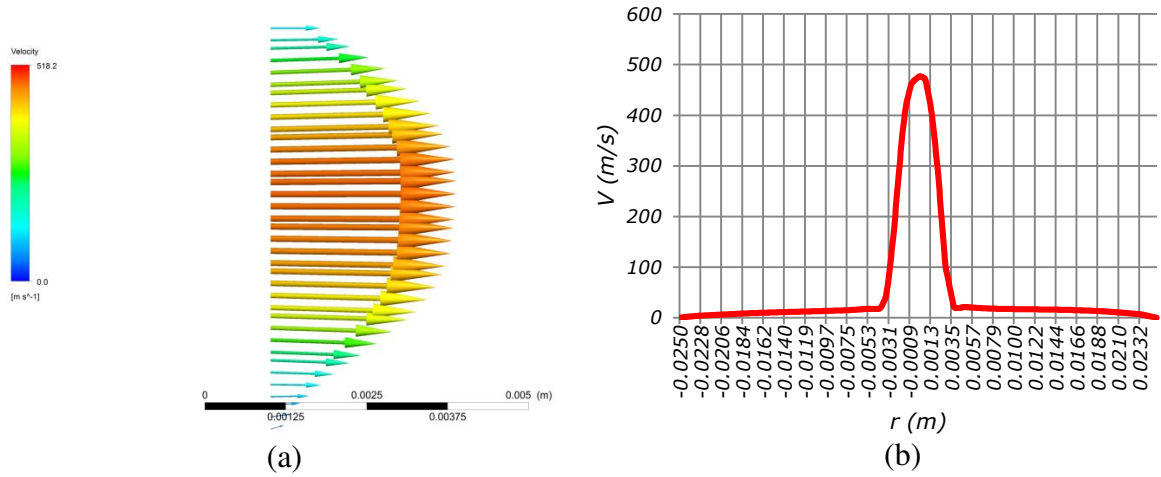
Şekil 4.17.'de dairesel kesitli lülenin çıkış kesitindeki hız vektörü ve en kesitinde yarıçap değişkenine bağlı olarak hız değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Çıkış kesitindeki $r = 0$ için, Mach sayısının 2'ye yakın değerler aldığı grafiklerden okunmaktadır. Şekil 4.17. akışkanın akış eksenine dik ekseni (en kesit) boyunca değişimleri gözlemlenmektedir.

Şekil 4.17.(b) kısmında yakınsak – ıraksak lülenin çıkış kesitinde $r = 0$ mm'de 494.9 m/s, $r = 0.7$ mm'de 490.2 m/s, $r = 1.2$ mm yarıçap değeri için ise 494.3 m/s değerleri okunmaktadır. Grafikten görüldüğü gibi, çıkış kesitinde, cidara yakın kısımda, $r = 1.60$ mm yarıçaplı dairenin dışında hızın sıfır olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.17. Dairesel kesitli lüledeki çıkış en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.

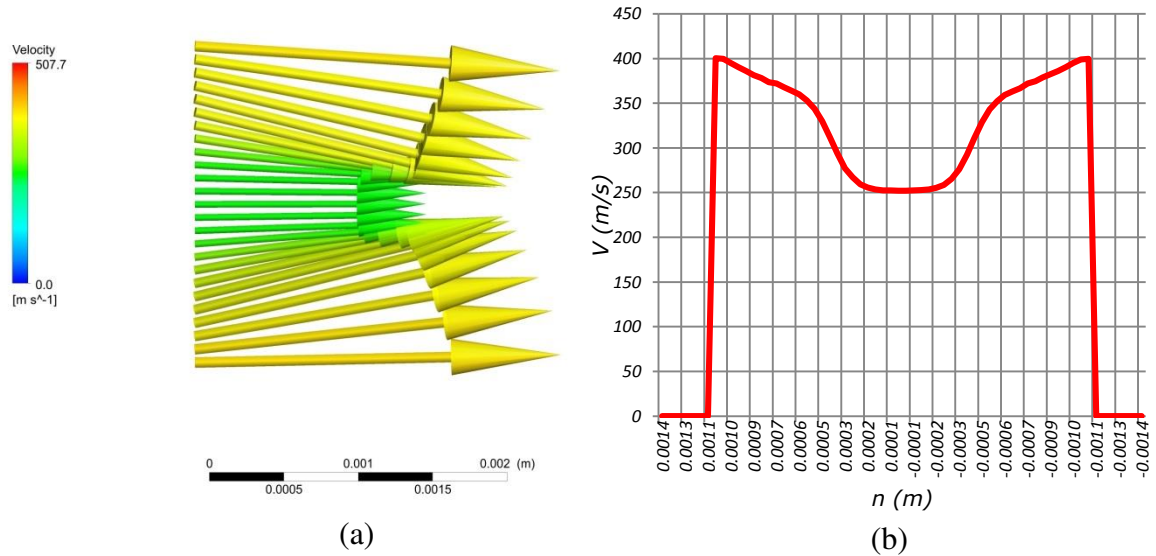
Şekil 4.18.'de akış yönünde, lüle çıkışından $x = 10$ mm'deki hız vektörlerinin cidar boyunca değişimleri görülmektedir. Dairesel kesitli yakınsak ıraksak lülenin, çıkış kesitinin 10 mm önündeki en kesitinde $r = 0$ 'da 477 m/s, $r = 0.7$ mm'de 470 m/s, $r = 1.2$ mm'de ise 403.7 m/s'lik hız değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 4.18. Dairesel kesitli lüledeki çıkış 10 mm en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği.

Şekil 4.19.'da verilen kare kesitli lüle boğaz en kesiti, Şekil 4.15.'de belirtilen N kare köşegen çizgisi N-ekseni boyunca elde edilen hız verileri Şekil 4.19. (b) grafiğinde görülmektedir. Bu grafikten, hız ortalamasının yaklaşık olarak Mach = 1 olduğu görülür. Şekil 4.19.(a)'da ise, hız vektörleri verilmiştir. Burada cidarda hızın sıfır olduğu ve cidarın yakın etkisi ile köşelere yakın yerlerde, hız değerlerinin maksimuma ulaştığı görülmüştür.

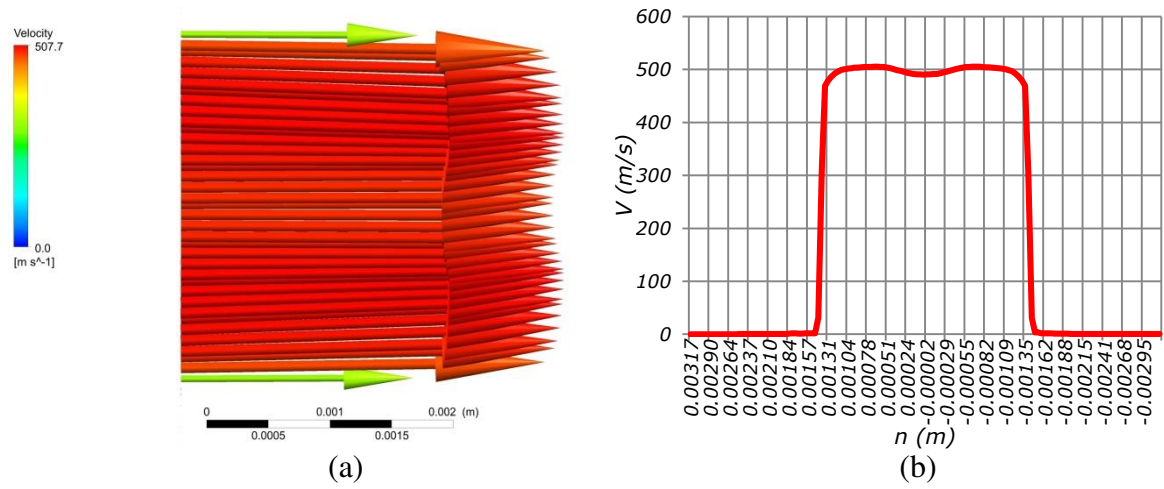
Şekil 4.19.(b)'deki hız değerlerine sayısal olarak bakıldığında, lülenin boğaz kısmında, $n = 0$ mm için eksendeki hız 252 m/s olarak okunmaktadır. Aynı şekilde $n = 0.7$ mm yarıçaplı halkada 371 m/s değeri, $n = 1$ mm yarıçaplı halkada ise 399 m/s değeri okunmaktadır. Burada da, cidara doğru gidildikçe hız değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.19. Kare kesitli lüledeki boğaz en kesitin N eksen (a) hız vektörü (b) hız grafiği

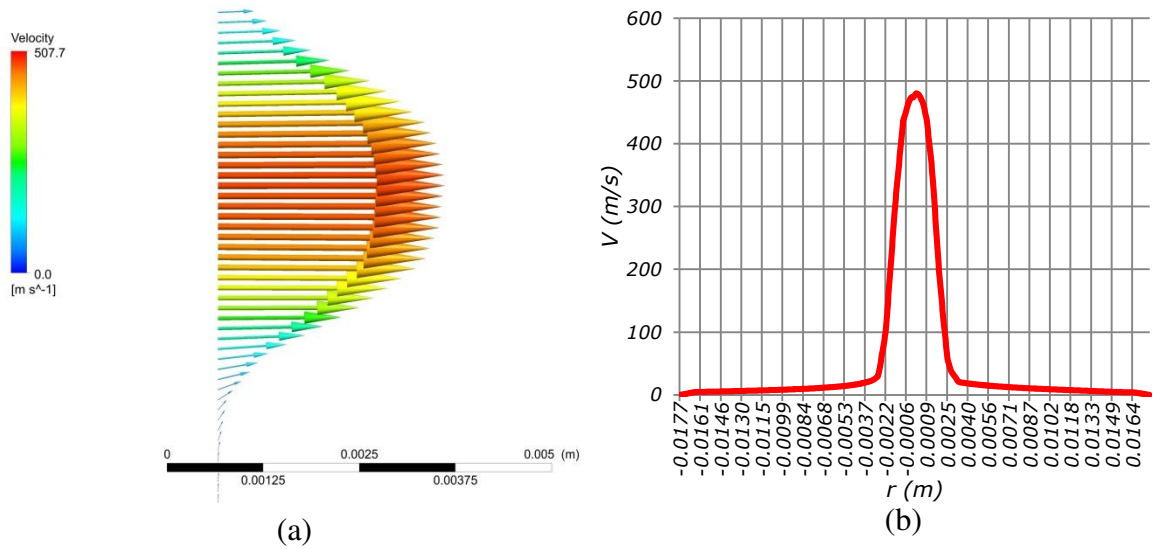
Şekil 4.20’de, kare kesitli lülenin, çıkış kesitindeki N–ekseni boyunca oluşan hız vektörünü ve yarıçap değişkenine bağlı olarak hız değerlerini grafik olarak göstermektedir. Çıkış kesitindeki $n = 0$ için Mach sayısının 2 ye yakın değerler aldığı grafiklerden okunmaktadır. Şekil 4.20’de akışkanın akış eksenine dik eksen boyunca (en kesit) değişimleri gözlemlenmektedir.

Şekil 4.20.(b) ‘de verilen grafikte, yakınsak – ıraksak lülenin çıkış kesitinde $n = 0$ mm’de 490 m/s, $n = 0.7$ mm’de 505 m/s, $n = 1.2$ mm yarıçap değeri için ise 486 m/s değerleri okunmaktadır.



Şekil 4.20. Kare kesitli lüledeki çıkış en kesiti N eksenini (a) hız vektörü (b) hız grafiği

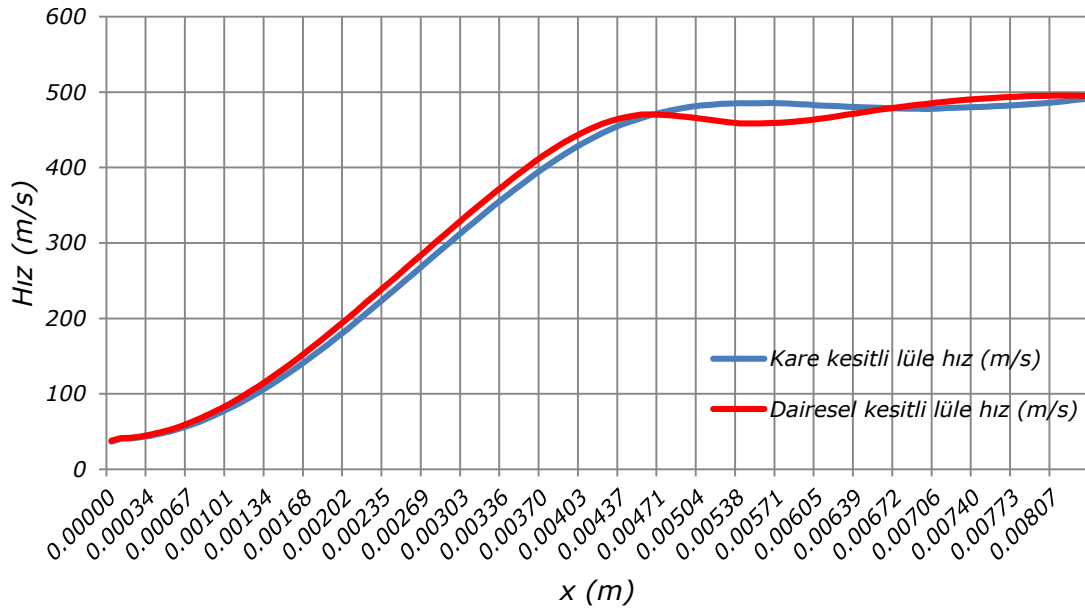
Şekil 4.21.’de kare kesitli yakınsak – ıraksak lüle için, akış yönünde lüle çıkışından 10 mm mesafede, en kesit boyunca değişimleri verilmiştir. Grafikten, $n = 0$ ’da 461 m/s, $n = 0.7$ mm’de 455 m/s, $n = 1.2$ mm’de ise 387 m/s hız değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.21. Kare kesitli lüledeki çıkış 10 mm en kesiti (a) hız vektörü (b) hız grafiği

Şekil 4.18. ve Şekil 4.21. dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin 10 mm önündeki en kesitindeki hız değişimlerine bakıldığında sınır tabaka etkilerinden kurtulmuş olan akışkanın eksen çizgisinde ($r = 0$) hızın maksimum olduğu, cidarda yine hızın sıfır olduğu görülmektedir.

Şekil 4.22. grafiğinde, dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin, akış eksenı boyunca, $r = 0$ 'da hız grafikleri verilmiştir.

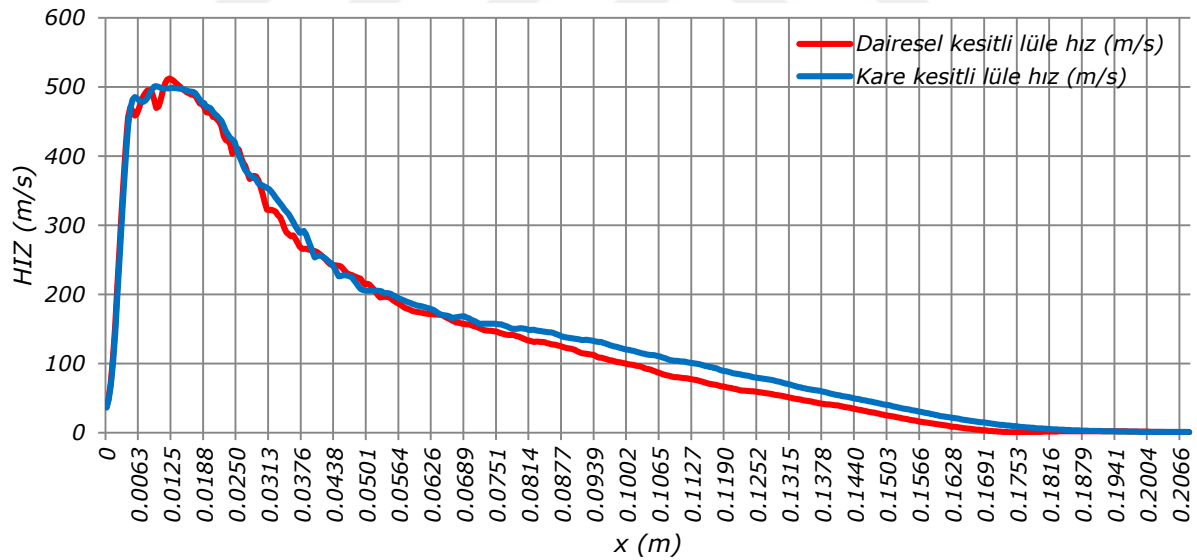


Şekil 4.22. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki aksenal hız değişim grafiği

Daire kesitli ve kare kesitli yakınsak-ıraksak lülelerin $r = 0$ 'da akış yönünde, aksinel hız değişimi, grafik halinde Şekil 4.23.'de verilmiştir. Bu grafikten, dairesel kesitli lülenin çıkışta, $x = 0.0125$ m 'de en yüksek hız değerine ulaştığı ve kare kesitli lülenin daha düşük bir hızda kaldığı görülmüştür.

Şekil 4.23.'de x (m), Hız (m/s) grafiğinde lülenin uzunluğu 8.32 mm olduğu göz önüne alırsa lülenin çıkışından yaklaşık 5 mm önünde hızın tekrar arttığı ve havanın maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Kare kesitli lülede ise lülenin çıkışında maksimum hız elde edildiği grafikten okunmaktadır (490 m/s).

Dairesel kesitli lülenin x eksen uzunluğu boyunca değişen hız grafiğinden; $x = 8.37$ mm'deki 494.8 m/s'lik bir değer almış ardından $x = 9.42$ mm'de 473.6 m/s değeri alarak lülenin dışında da tekrar azaldığı anlaşılmaktadır. $x = 10.4$ mm de tekrar artış göstererek 482 m/s, $x = 11.5$ mm'de 508.7 m/s ve $x = 12.5$ 'de 512.6 m/s'lik maksimum hıza ulaşmıştır. Bu noktadan sonra hız değerleri şekilden de anlaşılabileceği üzere lineer olarak hızın azaldığı görülmektedir.

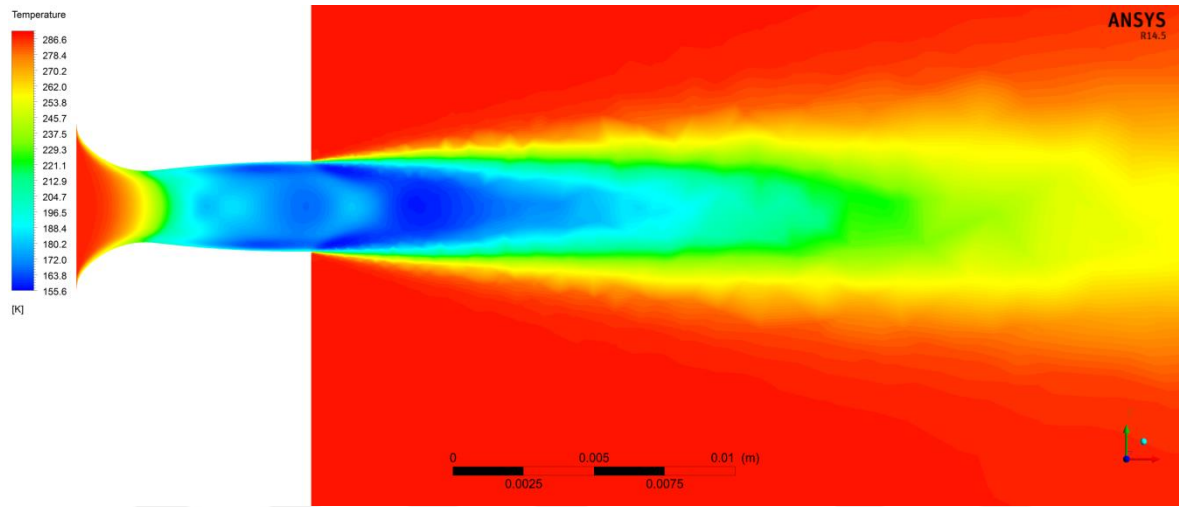


Şekil 4.23. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x -ekseni boyunca hız değişimleri grafiği

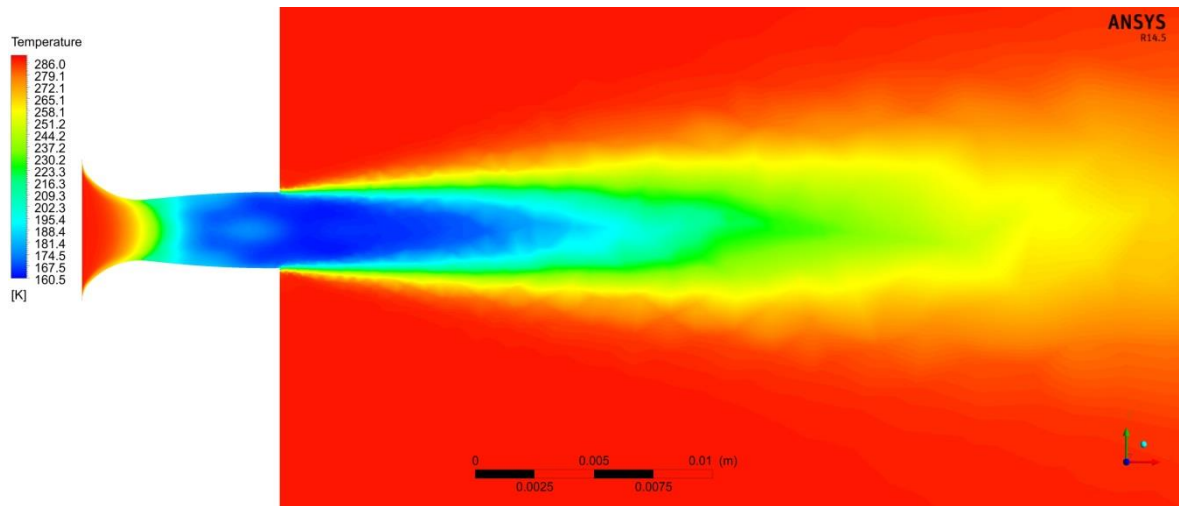
Bununla beraber kare kesitli lüleye nazaran daha düzenli bir artan ve düzgün azalan bir grafik elde edilmiştir. Ayrıca grafikten dikkat edilirse, kare kesitli lüle $x = 10$ cm'de dairesel kesitli lüleye nazaran daha yüksek hız değerleri yakaladığı görülmektedir. Yani 100 m/s değeri referans alınır; kare kesitli lülede yaklaşık $x = 12$ cm'de elde edilirken, dairesel kesitli lüle de $x = 10$ cm'de elde edilmiştir.

Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'de dairesel kesitli ve kare kesitli yakınsak-ıraksak lülelerin $z = 0$ 'daki xy düzleminde sıcaklık değerleri haritalandırılmıştır. Şekil 4.12.'de dairesel kesitli lülede hızın maksimum olduğu yerlere dikkat edildiğinde, Şekil 4.24.'de sıcaklık değerleri için minimum değerlerde kaldığı görülmektedir.

Bu durum, akışın izentropik olmasından kaynaklanmıştır. İzentropik akışta, yoğunluk ile basınç doğru orantılı (Eşitlik 2.23), hız ile süreklilik ise ters orantılıdır ($x = 12.5 \text{ mm}$ 'de $T_{\min} = 155\text{K} = 155 - 273 = -118^\circ\text{C}$).



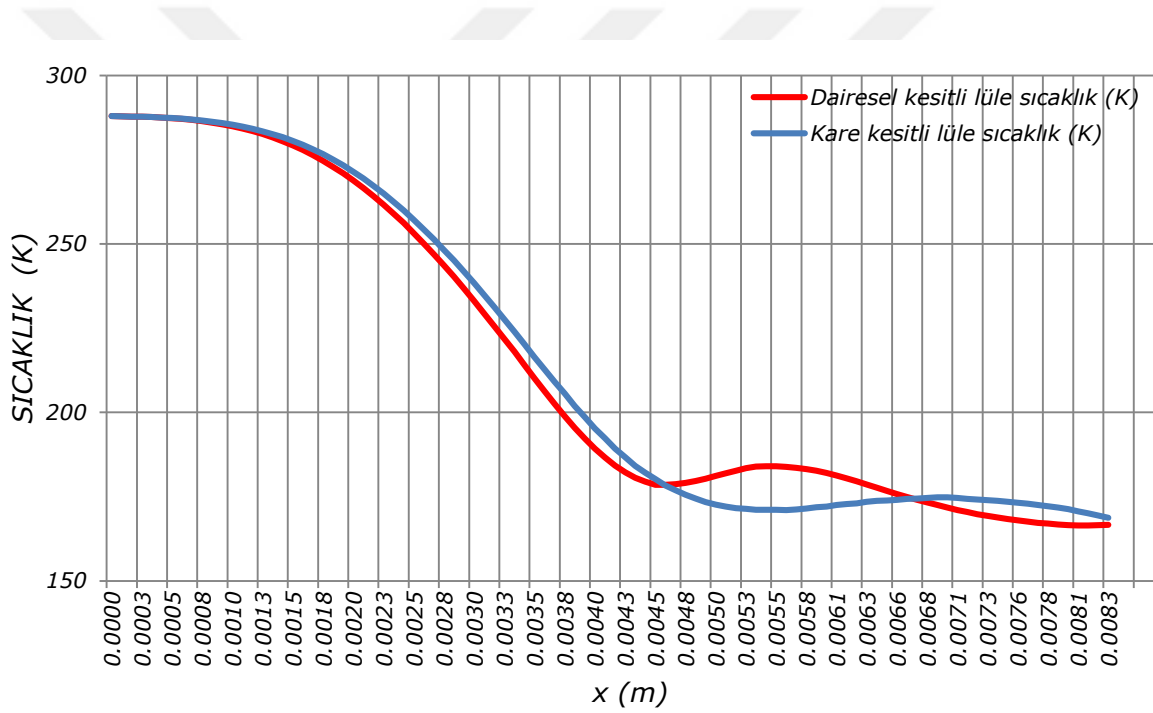
Şekil 4.24. Dairesel kesitli lülenin $z = 0$ koordinatlarında xy düzlemi sıcaklık değişimi



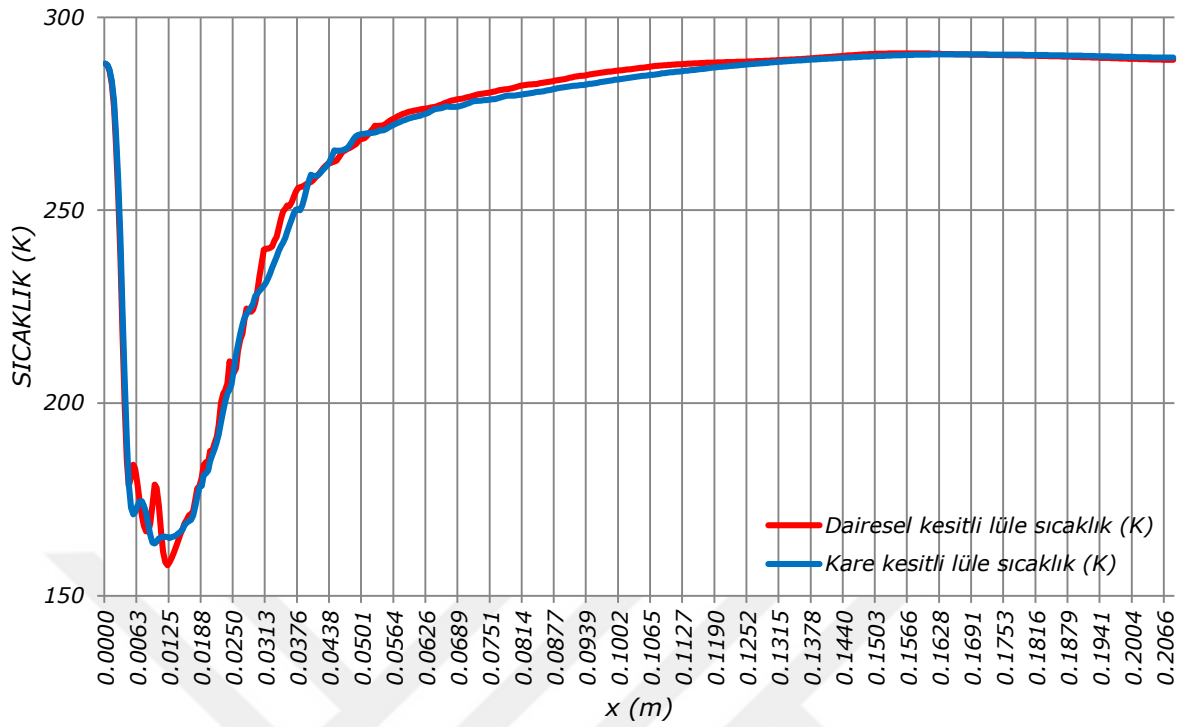
Şekil 4.25. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatlarındaki xy düzlemi sıcaklık değişimi

Şekil 4.26.'da dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin aksel koordinatlarda değişen sıcaklık grafiği görülmektedir.

Şekil 4.26.'da dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin x eksenini boyunca çizdirilmiş sıcaklık grafiği mevcuttur. Dairesel kesitli lüleye ait bazı değerler; $x = 8.4$ mm'de akışkan sıcaklığı 166.7 K, $x = 9.4$ mm 'de 177 K'lik bir sıcaklık değeri almıştır. $x = 10.4$ mm 'de 173 K ardından sıcaklık yukarıda açıklandığı üzere hızın maksimum olduğu yerde $x = 12.5$ mm 'de sıcaklık 158 K'lik minimum değeri almıştır. Kare kesitli lüle de çıkışta ($x = 8.32$ mm) 170 K minimum sıcaklık değerleri okunmaktadır. Bu noktadan sonra iki lüle içinde sıcaklık değerleri lineer olarak artış göstermiştir. Buna göre, $x = 14$ mm'de 166.2 K, $x = 50$ mm'de 268 K değerleri almıştır. Dolayısıyla buradan lülenin $x = 50$ mm'ye kadar sıfırın altında sıcaklıklar elde edildiği görülmektedir.



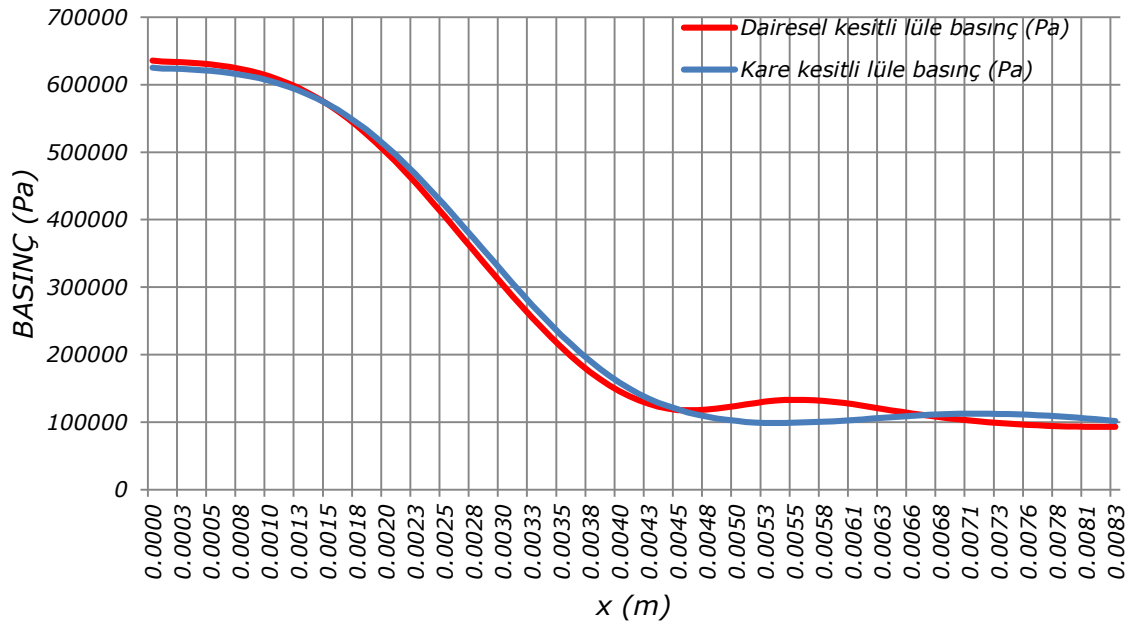
Şekil 4.26. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki aksel sıcaklık değişimleri



Şekil 4.27. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 4.27.'de dairesel kesitli lüle ile kare kesitli lülelerin grafik verileri karşılaştırılarak aynı x uzunluğundaki değerler karşılaştırılmıştır. Kare kesitli lülenin sıcaklık değerlerinde, daha stabil bir şekilde azalma ve artma olduğu görülmektedir. Dairesel kesitli lülide kare kesitli lüle sıcaklık değerlerine göre özellikle lüle çıkışından sonra daha ani ve düzensiz sıcaklık azalışları ve artışları görülmektedir.

Şekil 4.28.'de dairesel kesitli ve kare kesitli lüledeki aksenal basınç grafiği görülmektedir.

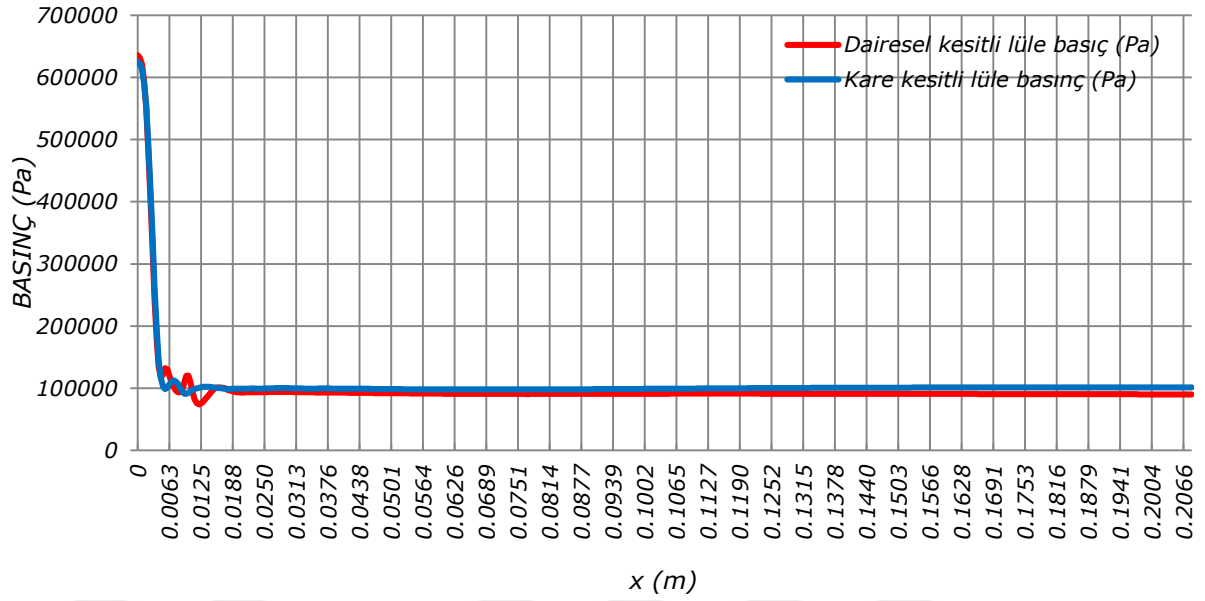


Şekil 4.28. Dairesel kesitli lüle ve kare kesitli lüledeki eksenel basınç değişimi

Dairesel kesitli lülenin x eksenı boyunca basınçtaki değişimi grafik üzerinde gösteren Şekil 4.29.'dan da aynı şekilde lülenin çıkışındaki basıncın atmosfer basıncının altına düştüğü (vakum basıncı) görülmüştür. Şekil 4.29.'da kare kesitli lülede oluşan vakum basıncı dairesel kesitliye göre daha az bir vakum oluşturduğu mukayese edilebilir. Bu oluşan vakum basınçları hız grafikleri ile karşılaştırılırsa aynı bölgelerde maksimum hızların elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.29.'da x eksenı boyunca değişen basınç grafiği görülmektedir. Buradaki bazı değerler; $x = 9.4 \text{ mm}$ 'de 115 kPa, $x = 10.4 \text{ mm}$ 'de 109 kPa, $x = 11.5 \text{ mm}$ 'de 78 kPa'lık basınç değerleri almaktadır. Yakınsak - ıraksak lülenin çıkışından yaklaşık olarak 5 mm önünde $x = 13.6 \text{ mm}$ 'de 85 kPa'lık atmosfer basıncı altında yani vakum basıncı yani burada bir dışarıdan hava çekimi oluşturmaktadır. $x = 15.7 \text{ mm}$ 'de 101 kPa'lık atmosfer şartlarına ulaşmıştır.

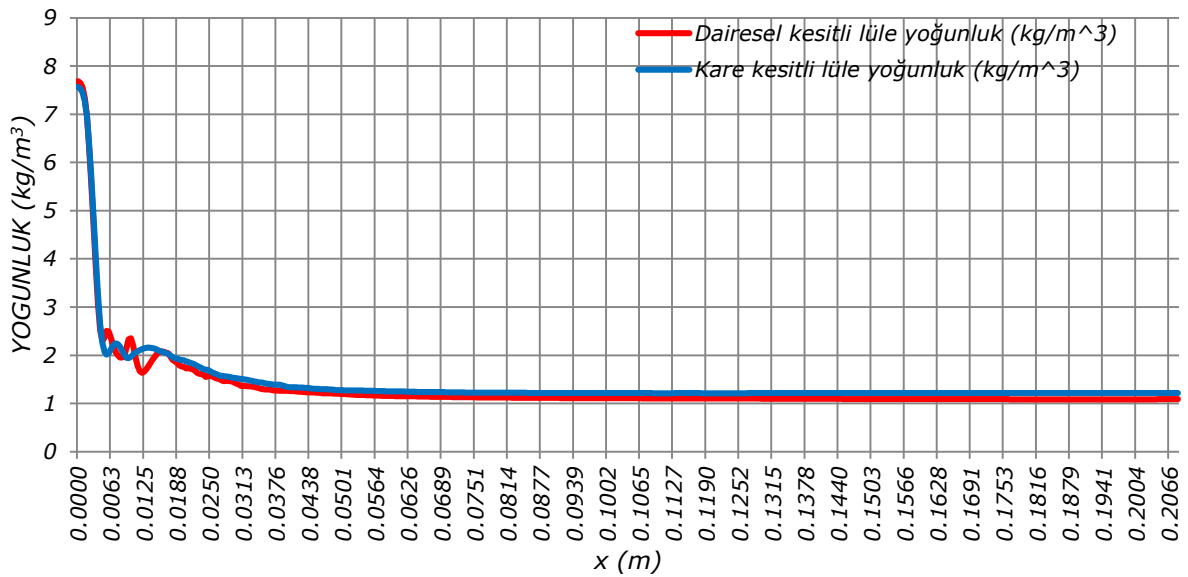
Şekil 4.29.'da dairesel kesitli ve kare kesitli lüle basınç değerlerindeki değişimleri aynı x konumuna göre karşılaştırılmıştır. Yukarıdaki yapılan çıkarımlara paralel şekilde grafikten de görüleceği üzere dairesel kesitli lüle çıkışındaki vakum basıncı kare kesitli lüleden daha güçlü olduğu görülmektedir.



Şekil 4.29. Dairesel kesitli ve kare kesitli x-ekseni boyunca basınç değişimi

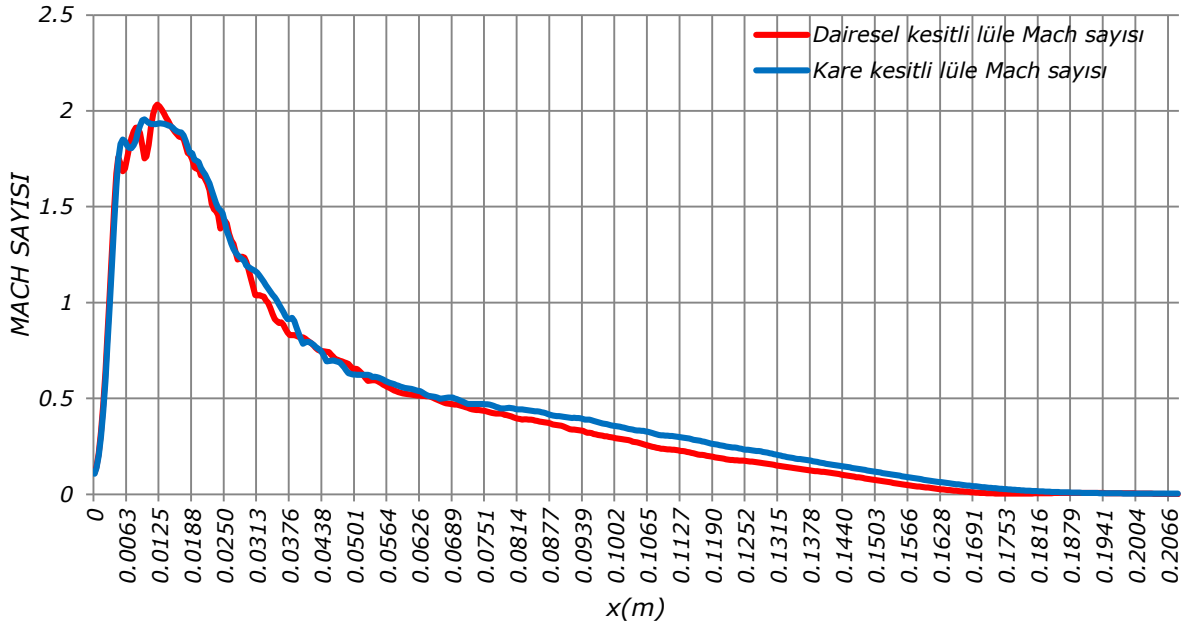
Basınç ve yoğunluk doğru orantılı ama sıcaklıkla ters orantılı olduğu şekillerdeki azalma ve artmalar dikkate alınarak görülebilir.

Şekil 4.30.'da dairese kesitli ve kare kesitli lülelerin x eksteni boyunca yoğunluk değeri aynı grafikte toplanmıştır. Bu grafikte Şekil 4.29. grafiğı bir biriyle orantılı olduğı göze çarpmaktadır. Bu yukarıda da daha önceden de belirtildiğı üzere akışın izentropik özelliğinden dolayı basınç ve yoğunluk doğru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır.

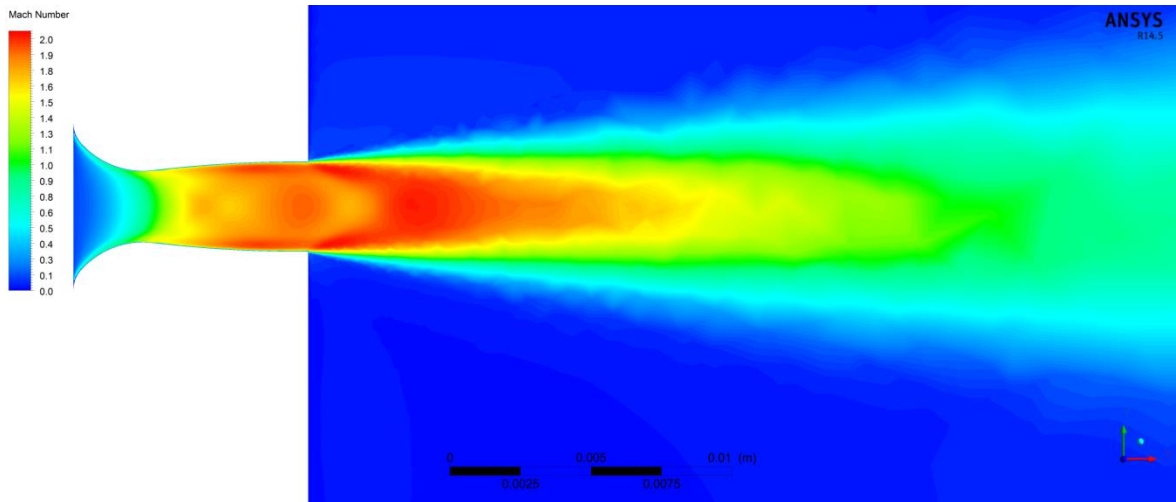


Şekil 4.30. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x-ekseni boyunca yoğunluk değışimi

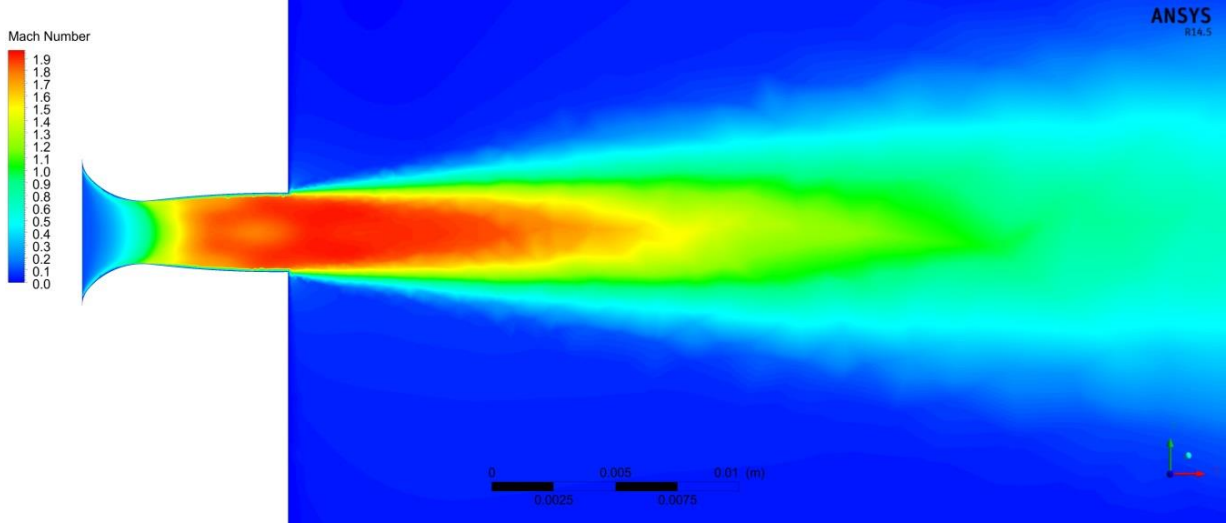
Şekil 4.31.'de dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin x eksenı boyunca Mach sayısı değışimleri gösterilmiştir. Mach sayısı hızın bir fonksiyonu olduğu için hız grafiği ile paralellik göstermektedir. (Şekil 4.32. ve Şekil 4.33.)Burada bir karşılaştırma yapılacak olunursa kare kesitli lülede Mach sayısı 2 ye yakın değerler alırken daire kesitli lülede 2'nin üstünde değerler aldığı görölmektedir. Bu değerlerin lülenin çıkışında elde edildiği ayrıca görölmektedir.



Şekil 4.31. Dairesel kesitli ve kare kesitli lüle x-ekseni boyunca Mach sayısı değışimi



Şekil 4.32. Dairesel kesitli lülenin z = 0 koordinatındaki xy düzlemi Mach sayısındaki değışimi



Şekil 4.33. Kare kesitli lülenin $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemi Mach sayısı değişimi

Dairesel kesitli lüle, önceki bölümde belirtildiği gibi, kesit alanının kare kesitli lüleye nazaran daha küçük olması daha fazla sıkıştırmaya sebep olduğundan çıkış kısmında, özellikle dairesel kesitli lülede kritik dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu dalgalanmalar önceki basınç yoğunluk ve sıcaklık grafiklerinden de takip edileceği üzere, termodinamik özelliklerini aynı yönde veya ters yönde etkilemektedir.

Termodinamik hesaplamalarla elde edilen veriler, bilgisayar destekli analiz programında yapılan analizlerle uyum göstermektedir. Bilgisayar destekli program ile yapılan analizlerle, lülenin çıkış kesitinin önündeki bölgede basınç, sıcaklık, yoğunluk ve hız özelliklerindeki değişimler gösterilmiş ve aynı zamanda kare kesitli lüle ile dairesel kesitli lüle karşılaştırması yapılabilmektedir.

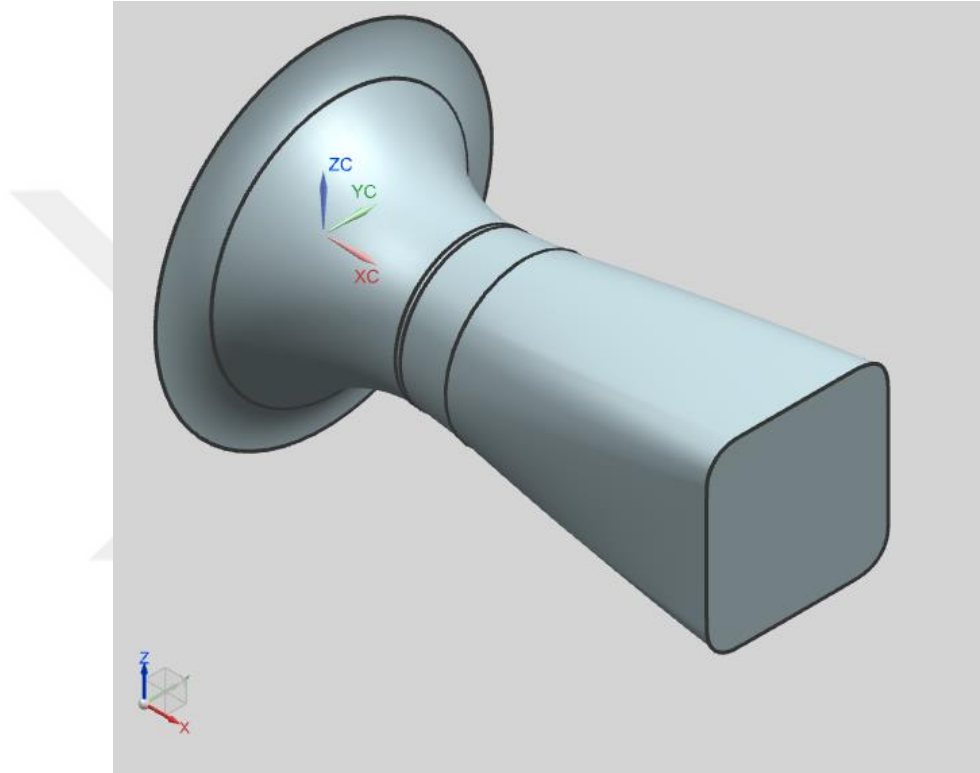
Bu bölümde yapılan analizden elde edilen grafik ve şekiller, kritik görünen ve mühendislik açısından dikkat çekilmesi gereken analiz çıktıları yorumlanmıştır. Bu bölüme ait geri kalan şekiller Ek-3’de gösterilmiştir.

4.5.2. Yakınsak Kısmı Dairesel Kesitli, Iraksak Kısmı Kare Kesitli Lüle Akış Analizi

Önceki bölümde elde edilen analiz sonuçlarına göre tasarımı yapılan dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin birbirlerine göre üstünlükleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak dairesel kesitli lülenin yakınsak kısmında verimli bir sıkıştırma sağladığı için lüle çıkışında güçlü bir itiş kuvveti elde edildiği gözlemlenmiştir. Kare kesitli lülede ise; kesit alanının

dairesel kesitliye nazaran fazla olması nedeniyle, yüksek hacimsel akış debisi elde edilmiştir.

Yapılan bu irdelemeler sonucunda; yakınsak kısmı dairesele kesitli, ıraksak kısmı ise kare kesitli olan bir yakınsak – ıraksak lüledeki akış özelliklerinin nasıl olacağı merak konusu olmuştur. Bu sebeple daha verimli bir çalışma sağlayacağı düşüncesiyle Şekil 4.34. 'de tarif edilen lülenin tasarımı yapılmıştır.



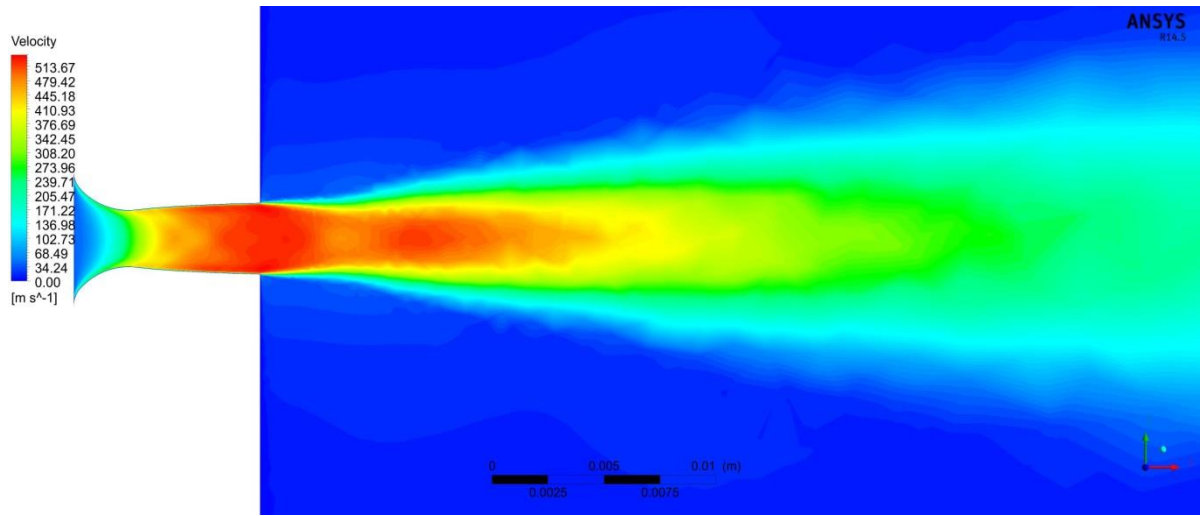
Şekil 4.34. Yakınsak kısmı dairesele ıraksak kısmı kare kesitli lüle üç boyutlu görünümü

Tasarımı yapılan lülede dairesele kesitli ve kare kesitli lülede kullanılan profil çizgisi izlenmiştir. Dolayısıyla aynı başlangıç ve sınır şartlarında, yakınsak-ıraksak lüle boyunca akış özelliklerinin çözümü için ANSYS’de yapılan analizler belirtilen geometriye göre tekrarlanmıştır.

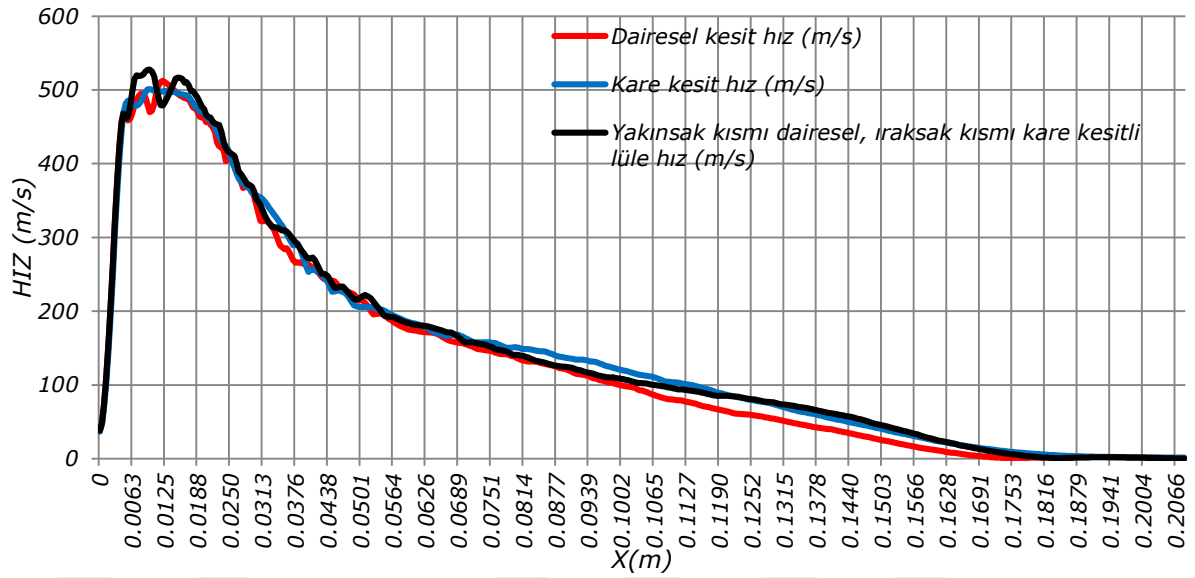
Şekil 4.35.’de lülenin hız değerleri $z = 0$ koordinatlarındaki xy düzleminde haritalandırılarak gösterilmiştir. Şekil 4.36.’daki x boyunca gösterilen grafikten de anlaşılacağı üzere dairesele kesitli ve kare kesitli lüleden daha yüksek hız değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Boğaz şartlarında, dairesele kesitli lüle kullanarak, kare kesitli

lüleye göre daha iyi bir sıkışma elde edilmiştir. Diğer taraftan, ıraksak kısımda ise, akışı kolaylaştırmak için kare kesit kullanılmıştır.

Analiz sonuçlarına bakıldığında gerçekten de yapılan tasarımla elde edilmiş olan lülenin hem dairesel kesitli lüleden hem de kare kesitli lüleden üstün özellikte olduğu görülmektedir. Şekil 4.36.'daki grafikte çıkış kesitinin 4 mm önündeki bölgede akışkan hızının ani bir düşme ve ardından tekrar bir yükselme olduğu görülmüştür. Şekil 4.35.'de bu azalma sarı renkle belirtilmiştir

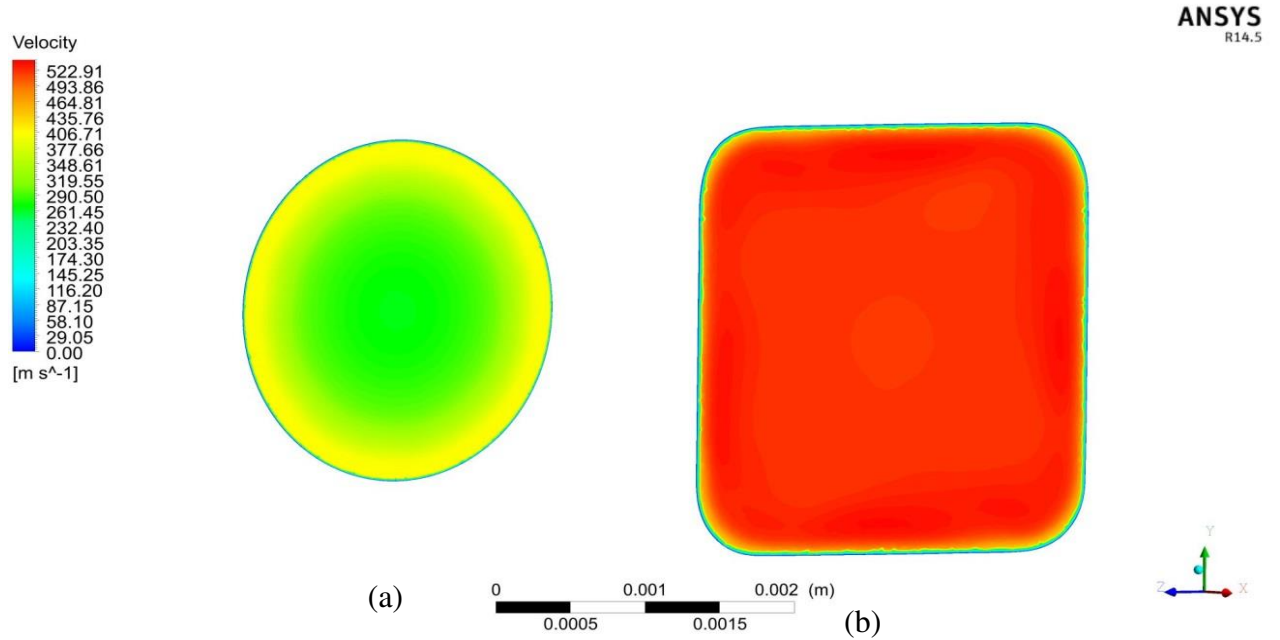


Şekil 4.35. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemindeki hız değişimi

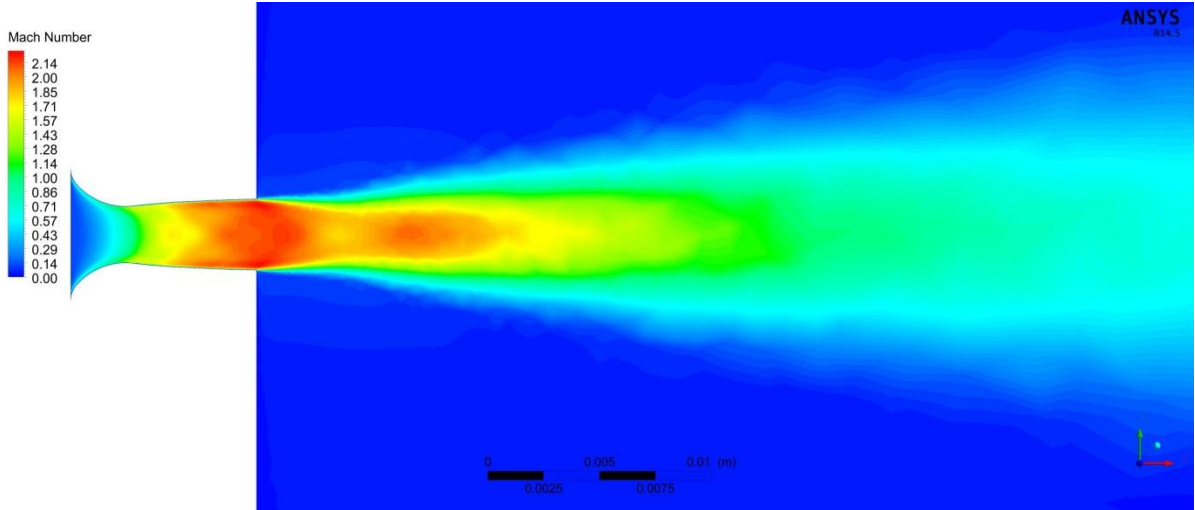


Şekil 4.36. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x eksenini boyunca hız değişim grafiği

Şekil 4.37.(a)'da görülen lülenin boğaz bölgesindeki değerlerin, dairesel kesitli lüle ile benzerlik gösterdiği, Şekil 4.37.(b)'de verilen, lüle çıkışındaki akış hızının, kare kesitli lüleye göre daha homojen bir hız dağılımı gösterdiği görülmektedir. Bu durum çalışmanın en önemli bulgularından biridir.

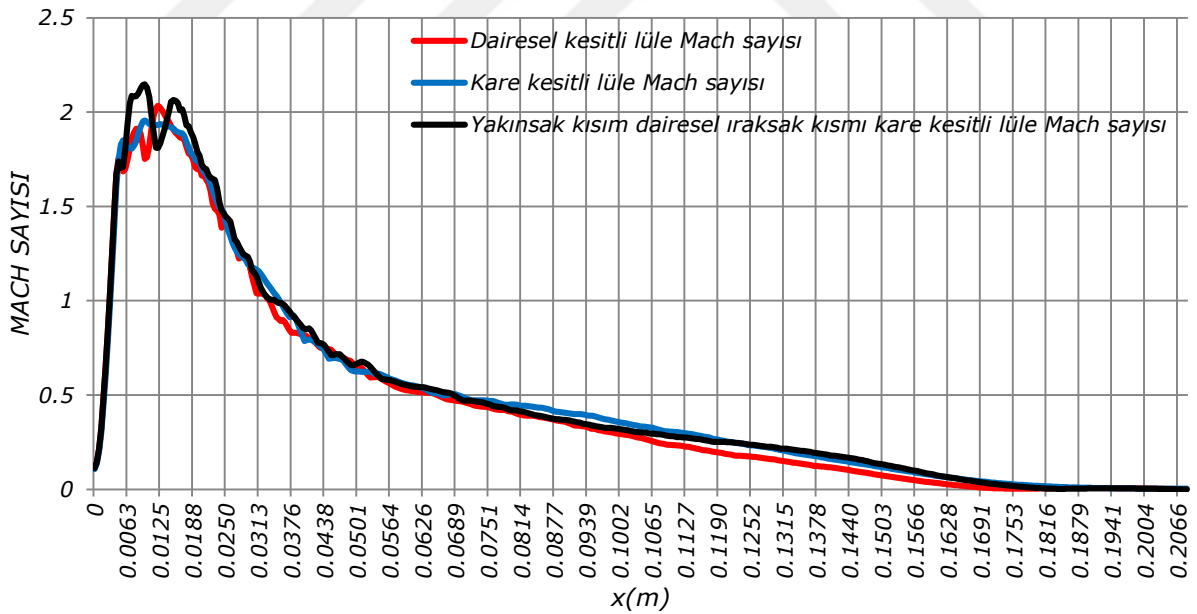


Şekil 4.37. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki hız değişimleri



Şekil 4.38. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle xy düzlemindeki Mach sayısı değişimi

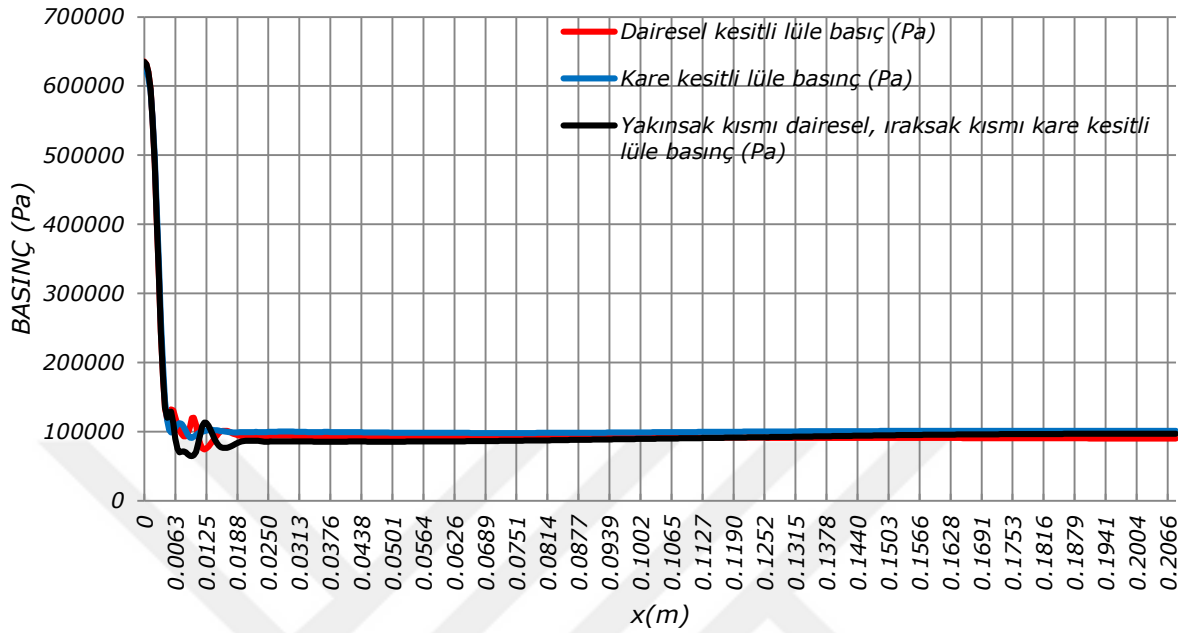
Şekil 4.39’da Mach sayısının değişim grafiği görülmektedir. Burada dairesel ve kare kesitli lülede çıkıştaki Mach sayısı 2’ye yakın değerler aldığı görülürken son olarak tasarlanan yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin çıkışında yaklaşık olarak Mach sayısı 2.15 değerlerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 4.39. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x eksenine boyunca Mach sayısı değişim grafiği

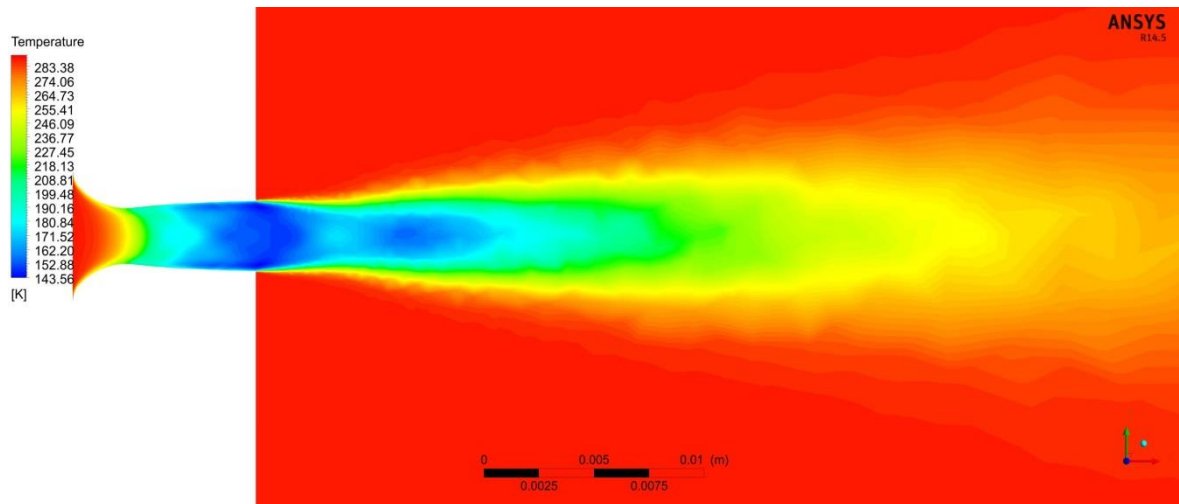
Şekil 4.40’da tasarlanan lülede dairesel kesitli lülenin çıkışında oluşan vakum basınç bölgesinden daha büyük bir alanda oluştuğu görülmüştür. Bu grafiğe bakılınca Şekil 4.36’da hız grafiğinde belirtilmiş olan hızın maksimum olduğu değerler bu vakum basınç

bölgesine denk geldiği görülmektedir. Ardından basıncın tekrar artmasıyla hız değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.

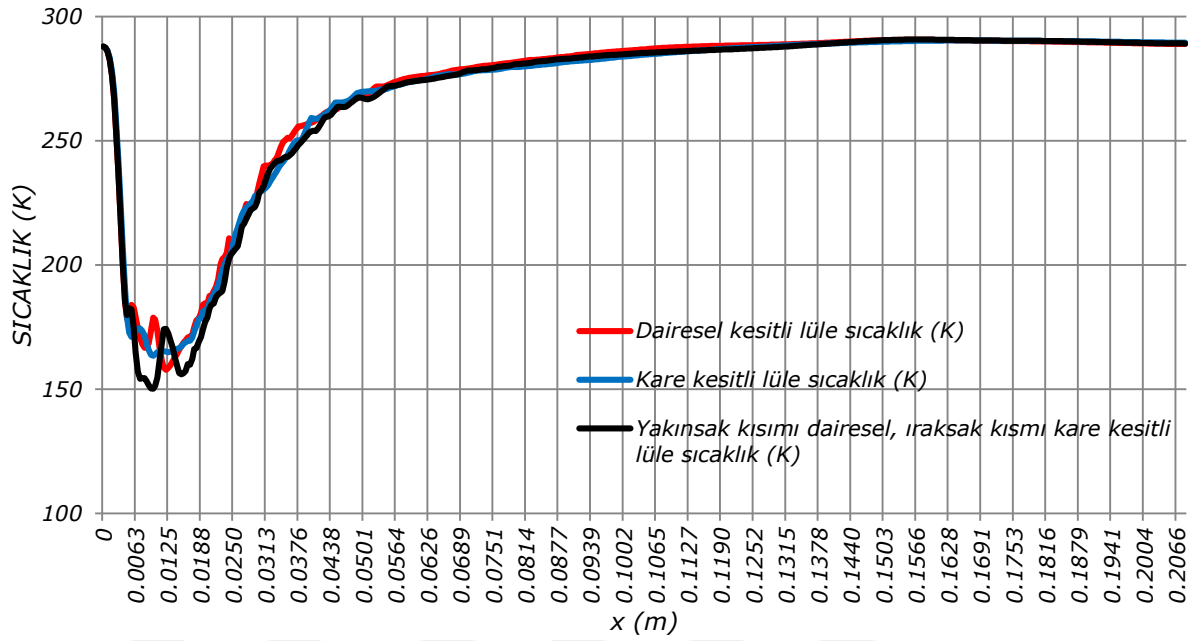


Şekil 4.40. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x eksenı boyunca basınç değışimi grafiği

Şekil 4.41’de yakınsayan kısmı dairesel kesitli ıraksayan kısmı kare kesitli olan lülede $z = 0$ koordinatındaki xy düzlemindeki sıcaklık değeri haritalandırılarak gösterilmiştir. Şekil 4.42.’de ise x eksenı boyunca değışen sıcaklık değeri grafik şeklinde gösterilmiştir. Grafikte yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin, dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerden daha düşük sıcaklık değeri aldığı görülmüştür.

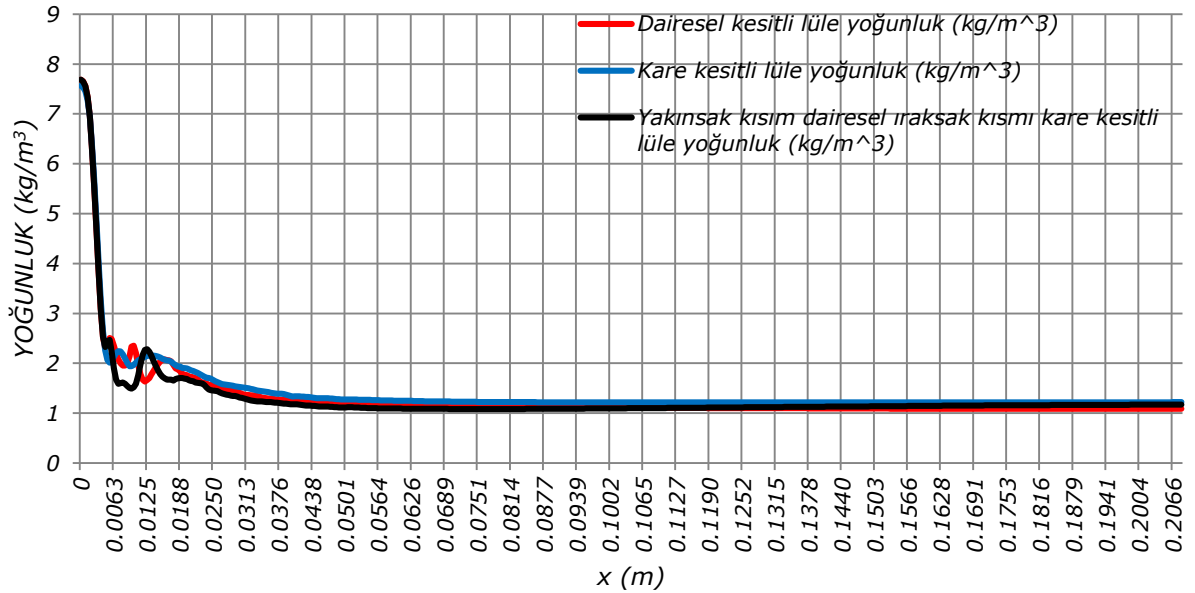


Şekil 4.41. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle xy düzlemindeki sıcaklık değeri haritası



Şekil 4.42. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x eksenini boyunca sıcaklık değişimi grafiği

Şekil 4.43.'de ise x eksenini boyunca değişen yoğunluk değerleri grafik şeklinde gösterilmiştir. Grafik Şekil 4.40.'daki basınç grafiği ile orantılı olduğu aynı şekilde görülmektedir.

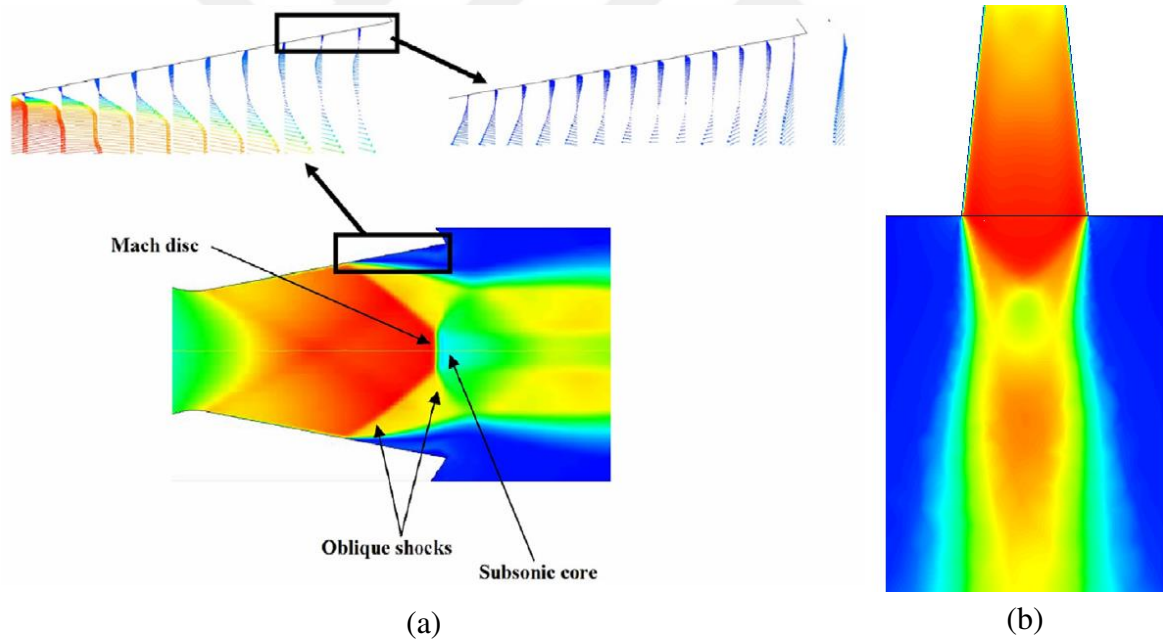


Şekil 4.43. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lüle ile dairesel ve kare kesitli lüle x eksenini boyunca yoğunluk değişimi grafiği.

4.6. Yakınsak – ıraksak Lüle Analiz Çalışmalarımız ve Literatür ile Karşılaştırma

Yakınsak – ıraksak lülelerle alakalı birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, literatürde yer alan bazı çalışmalarla mevcut çalışmanın sonuçları mukayese edilmiştir.

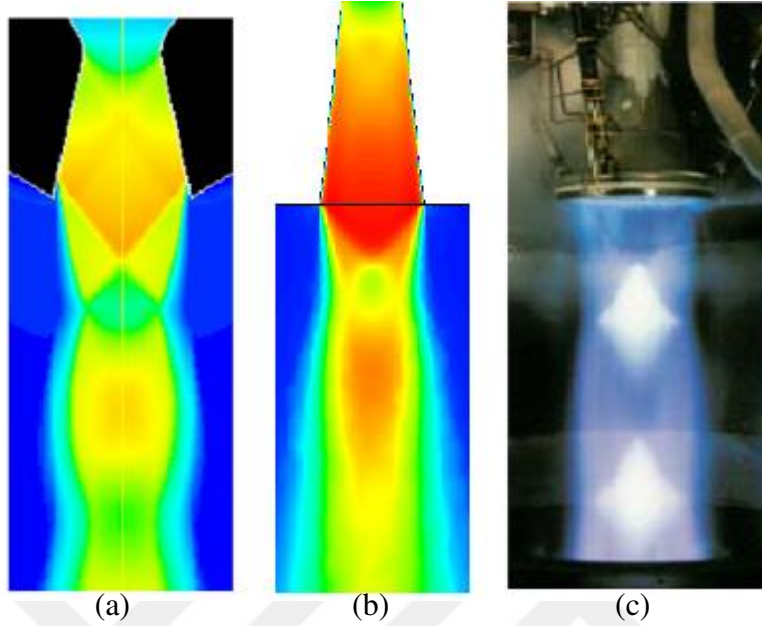
A. Balabel ve arkadaşları [27] çalışmasında; yakınsak – ıraksak lülenin geometrisi sabit tutularak değişik basınç oranlarına (NPR) ve çeşitli türbülans modellerine göre bir dizi analiz yapmış ve oluşan şok dalgalarını incelemiştir. Şekil 4.44.(a)'da, oluşan şok dalgası ve akış görüntüsü verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.44.(b)'de, bu çalışmada kullanılmış olan dairesel kesitli yakınsak – ıraksak lülenin ıraksak kısmı 3 mm uzatılarak alınan sonuçlar gösterilmiştir. Balabel'in [27] çalışmasına göre şok elmasının olduğu yer, lüle çıkışının biraz daha önündedir. Bunun, lüle ıraksak kısmının çok fazla genişlemesinden kaynaklandığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.44.(a) A. Balabel [27] çalışmasında oluşan şok açıklaması, (b) Araştırma konusu mevcut lülenin akış görüntüsü

Şekil 4.45.'de A.Balabel [27] çalışmasında; Östund [19] çalışmasındaki görsel ile referans lüleler için aşırı genişletilmiş olan akış görselleri yan yana getirilmiştir. Bizde aynı şekilde tasarladığımız lülede bazı modifikasyonlar yaparak genişletilmiş bir lüle için sonuçlarımızı karşılaştırdık. Tasarladığımız lüle, ıraksak kısmı ve Şekil 3.4.'de R_4 yarıçapı olarak gösterilmiş yarıçap yerine A_2 açısına sahip çizgi L_3 uzunluğu, 3 mm uzatılmış olarak değiştirilmiştir. Bu sayede lüle çıkış kesiti konikleştirilmiş ve akış kesiti

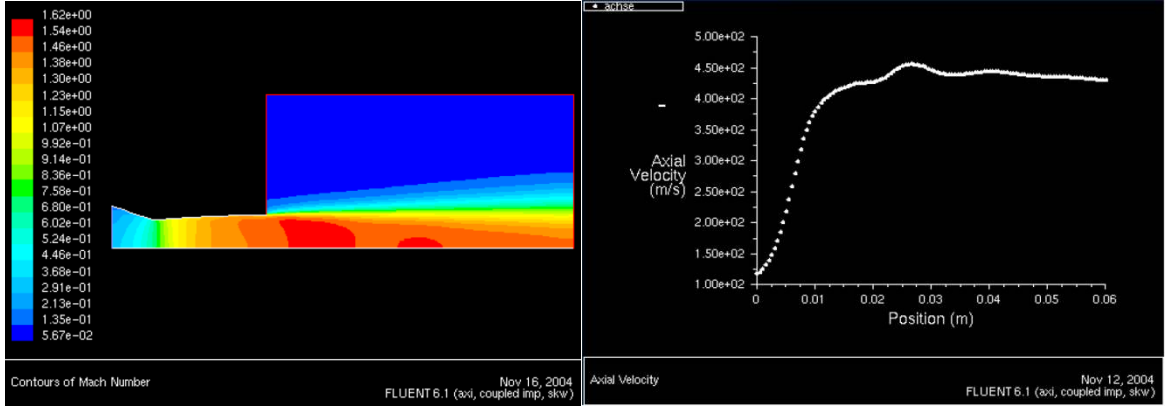
genişletilmiştir. Bu durumda referans çalışmalarla karşılaştırılacak olunursa, A_2 açısının arttırılması ile referans çalışmalara daha fazla yaklaşılacağı düşünülmektedir.



şekil 4.45.(a) A. Balabel [27] 'in çalışması, (b) Mevcut çalışmanın konik lüle analizi, (c) ştlund J.[19]'in çalışması

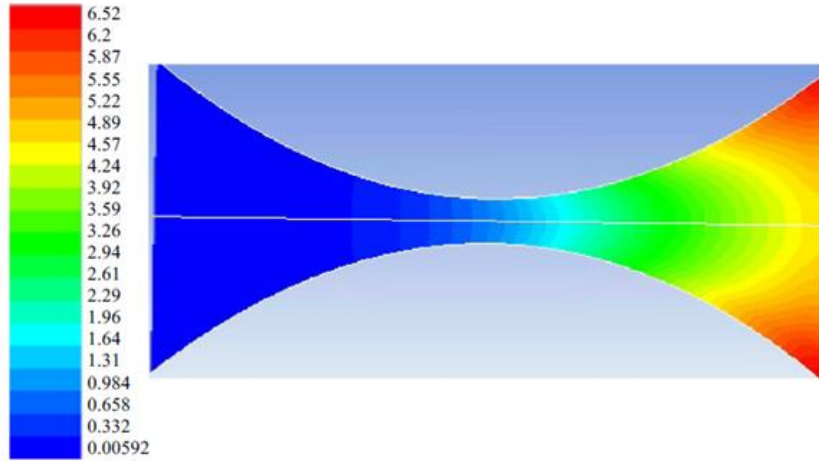
Bergman J. ve diğerleri [10] sayısal ve deneysel olarak yapılan çalışmada, mikroskop altında dairesel kesitli süpersonik lüle kullanarak daha kaliteli bir yüzey kaplama gerçekleştirdiğini detaylı olarak açıklamıştır. Bilgisayar destekli analiz programında tek boyutlu olarak yaptığı akış analiziyle (P_0/P_e) basıncı oranı için 5.5'lik De Laval tip lülenin maksimum Mach sayısı 1.62 olarak bulunmuştur. Ancak, elektrik ark spreyinde asıl kıstas, lüle çıkışında etkili bir pşkrtme alanı oluşturabilmektir. Bu sebeple bu çalışmada, kare kesitli lülede etkili hava alanının daha yüksek olması sebebiyle, daha etkili bir pşkrtme oluşturacaktır.

Bergman J. ve diğerleri [10] çalışmasında, şekil 4.46.'daki yakınsak – ıraksak lüle analizinde elde ettiği eksenel hız grafiğine bakıldığında, bu çalışmaya ait şekil 4.22.'deki hız profili ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. Bergman J. [10] Laval lülesinin Mach sayısı değişimi ve eksenel hız değişim grafiği

Chang P. ve Bai B. [12] çalışmasında, doğalgaz kuyusunda biriken suyu süpersonik lüle vasıtasıyla atomize ederek mikro damlacıklara ayrılarak uzaklaştırılması üzerine deneysel ve sayısal araştırmayı içermektedir. Sonuç olarak bu çalışmada üç farklı doğalgaz kuyusunu tepkileri değerlendirilerek yapılan bir yıllık saha testi sonucunda süpersonik lülelerin verimli bir şekilde gaz üretilmesine ve gaz kuyularının kapanması problemine çözüm sağlamıştır. Şekil 4.47.'deki Mach sayısı dağılımına bakılacak olursa lülenin cidarına yakın kısımlarında maksimum hız elde edildiği görülmektedir. Literatür sonuçları ile bu çalışma paralellik göstermektedir.



Şekil 4.47. Chang P. [12] çalışmasında yakınsak-ıraksak lülenin Mach sayısı dağılımı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; hesaplamalar doğrultusunda akışkanı hava olan bir ses üstü akış elde edilebilen bir lülenin tasarımının gerçekleştirileceği görülmüştür. Yapılan hesaplamalar ile örnek sınır şartlarına göre tasarlanmış lülenin ve lüledeki akışkanın termodinamik özellikleri ANSYS programı kullanılarak analizi yapılmıştır.

Yapılan çalışmada tasarlanan dairesel kesitli ve kare kesitli lülelerin aynı sınır şartlarına göre yapılan analizler neticesinde birbirlerine göre üstünlükleri fark edilmiştir. Bu üstünlüklerin hangi bölgelerde oldukları gözlemlenmiş ve irdelenmiştir. Ayrıca, bu iki farklı lüle sentezlenerek, yakınsak kısmı dairesel, ıraksak kısmı kare kesitli lüleden oluşan yeni bir karma lüle tasarlanmıştır. Bu karma lüle tasarımında; ön görülen şekilde, daha yüksek değerlerde hız verileri elde edildiği analiz sonuçlarından anlaşılmıştır. Ayrıca basınç verilerine bakıldığında özellikle lüle çıkışının önünde oluşan vakum basıncının gerçekten de tasarlanan lülenin püskürtme işlemi için kullanımının faydalı olabileceği görülmüştür.

Yaptığımız çalışmaların bir sonucu olarak, yakınsayan kısmı dairesel kesitli, ıraksayan kısmı kare kesitli olarak tasarlanan karma lülenin, yakınsak kısmı dairesel kesitli olmasından dolayı kare kesitli lüleden daha güçlü bir sıkıştırma elde edilmiştir. Aynı şekilde ıraksak kısmının ise kare kesitli olmasından dolayı dairesel kesitli lüleden daha fazla hacimsel debi değerleri elde edildiği ve genel olarak iki farklı geometrik kesitten oluşan karma lülenin, daha verimli bir lüle olduğu belirlenmiştir.

Dairesel kesitli lüle ile kare kesitli lülenin sentezlenerek oluşturulmuş karma kesitli lülede çıkışında dairesel kesitli lüleye nazaran genişlemiş bir hava akışı sağlanmaktadır. Buna literatürde Balabel'in çalışmasındaki aşırı genişlemiş akışlardaki özellikleri ile karşılaştırıldığında karma kesitli lülenin hız değerleri grafiğindeki ani azalma ve ani artışın sebebi kare kesite geçilmesiyle oluşan aşırı olmayan genişlemeden kaynaklandığı kanısına varılmıştır. Eğer ıraksak kısımda daha fazla bir genişleme sağlanmış olsa idi Balabel'in elde ettiği hız değişimlerinin elde edileceği görülmüştür.

Çalışmada kullanılan analiz modelinin geometrik şartlarının tasarımında kullanılan Unigraphics programı yardımıyla ya da başka bilgisayar destekli çizim programlarıyla

analiz modeli daha farklı şekilde tasarlanabilir. Bu, farklı şekillerde tasarlanan modeller, sonuçları etkileyebilmektedir. Yapmış olduğumuz analizlerde, analizin geometrik modelini; dairesel kesitli, kare kesitli ve karma kesitli lülelerdeki analizlerde aynı model kullanılmıştır. Bu sayede, analizlerin doğruluğu da kanıtlanmıştır.

Yapılan sayısal çalışmalarda; analizin güvenilir olduğunun belirtilmesi için sayısal hesaplamaların, doğruluk çalışması yapılması gerektiği görülmüştür. Bu doğrultuda bazı araştırmalar, hesaplamalar ve analizler yapılmıştır. Bu çalışmalar; lüledeki akışın termodinamik hesaplamalarıyla boğaz ve çıkış kesitindeki termodinamik özellikleriyle CFX’de yapılan analizle elde edilen akışın termodinamik özelliklerinin yakalandığı görülmüştür. Ayrıca referans alınan bir çalışmadaki sınır şartlarına ve geometrik şartlarına göre elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Literatürde çalışmamız ile benzerlik gösteren sesüstü akışlar elde edilen çeşitli makalelerdeki grafikler ve şekiller ile mukayese edilerek benzer hız dağılımları elde edildiği gösterilmiştir. Buda çalışmamızın doğruluğunu kanıtlamıştır.

Yaptığımız araştırma ve geliştirme çalışmasında; çalışma süresince, yapılan çalışmanın daha da geliştirilebilir olduğu tecrübe edilmiştir. Ayrıca çalışma esnasında literatür çalışmalarından ilham alınarak, tasarlanan lülenin daha farklı hangi alanlarda yarar sağlayacağı, ayrıca bir araştırma konusu olabileceği kanısına varılmıştır.

Tasarlanan lülenin kullanım alanlarına örnek olarak; hava gücünden yararlanılarak yapılan bir kazı işleminde kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca, imalat sektöründe, yüzey kaplama işlerinde rahatlıkla kullanılabileceğini söyleyebiliriz. Kısaca hava gücünden yararlanmak istenilen tüm çalışmalarda tercih edilen bir proses haline gelmiştir.

Mühendislik çalışmalarında; araştırma ve geliştirme yapılırken sadece yararlı tasarım yapılmakla kalınmamalıdır. Devam eden süreçte yapılan tasarımın imalatının gerçekleştirilmesi amaçlanmalıdır. Bu durumda, imalat maliyeti de göz önüne alınmalıdır. İmalat aşamasında, dairesel kesitli lülenin, kare kesitli ve yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli karma lüleye nazaran imalatının daha kolay olacağı göz önüne alınarak imalat aşamasına geçilmelidir.

KAYNAKÇA

- [1] **Beşergil, B.**, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü e-makaleler Sıkıştırılabilir Akışkanlar, http://www.bayar.edu.tr/besergil/4_sikistirilebilen_akiskanlar.pdf
- [2] **Prandtl, L., Busemann, A.**, 1929, Näherungsverfahren zur Zeichnerischen Ermittlung von Ebenen Strömungen mit Überschallgeschwindigkeit, , s. 499-509. Stodola Festschrift (Zürich).
- [3] **Foelsch, K.**, 1949, The Analytical Design of an Axially Symmetric Laval Nozzle for a Parallel and Uniform Jet , Journal of the Aeronautical Sciences.
- [4] **Puckett, A. E.**, 1946, Supersonic Nozzle Design, Journal of Applied Mechanics, vol. 13, No. 4.
- [5] **Shapiro, A. H.**, 1983, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Robert E. Krieger Publishing Company, vol. I and II.
- [6] **Crown, J.C.**, 1948, “Supersonic Nozzle Design”, NACA TN-1651. Washington.
- [7] **Wilson, R.E.**, 1952, Turbulent Boundary Layer Growth with Favorable Static Pressure Gradient at Supersonic Speeds Proceedings of the Second Midwestern Conference on Fluid Mechanics, s 277-289, The Ohio State University.
- [8] **Sinyarev and Doborovolskii**, 1957, Zhidkostne LRaketne Drigateli , s.366-367 Moscow.
- [9] **Rao, G.V.R.**, 1960, Approximation of Optimum Thrust Nozzle Contour, ARS Journal, s 561,
- [10] **Bergman, J., Zimmermann, S, Wilden, J., Schwenk, A.,Landes, K.**, 2015, Supersonic Nozzles for the Wire Arc Spraying <https://www.researchgate.net/publication/267299958> Almanya.
- [11] **Lee, M. W., Park, J. J., Kim, D. Y.,Yoon, S. S., Coyle, T., Chandra, S.**, 2011, Optimization of Supersonic Nozzle Flow For Titanium Dioxide Thin-Film Coating by Aerosol Depositio, Journal of Aerosol Science s.771-780.
- [12] **Chang, P., Bai, B.**, 2017, An improved method of gas well deliquification using supersonic nozzle International Journal of Heat and Mass Transfer s. 2262–2272.
- [13] **Wu, J., New, T. H.**, 2016, An Investigation On Supersonic Bevelled Nozzle Jets, Aerospace Science and Technology s. 278.-293.
- [14] **Peremeci, Ö. E.**, 1973, Aerodinamik Sıkıştırılabilir Akışkanlar, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [15] **Hacı, S.**, 1993, Supersonik Akışlı Lüle Dizaynı, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- [16] **Coşkun, K.**, 1990, Akışkan olarak hava, su buharı kullanılan özel dizaynlı lüle süpersonik akış ve şok olayının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] **Çengel, Y., Boles, M.C.**, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Mc Graw-Hill -Literatür yayıncılık İstanbul.
- [18] **Yükselen, A. M.**, Sıkıştırılabilir Aerodinamik, 2006-2007 Bahar dönemi İTÜ ders notları http://web.itu.edu.tr/yukselen/UZB362/UZB362_Index.htm
- [19] **Östlund, J. B.**, 2002, Flow processes in rocket engine nozzles with focus on flow separation and side-loads Technical reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics Stockholm, Sweden.
- [20] **Nestor, C., Cedric, B., Franco, B.**, 2010, Supersonic attrition nozzles in gas-solid fluidized beds Chemical Engineering and Process:Process Intensification s. 227.
- [21] **Çengel, Y., Cimbala, J. M.**, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Güven Kitabevi, İzmir.
- [22] **Kulhanek, S.L.**, 2012, Design, Analysis, and Simulation of Rocket Propulsion System, Aerospace Engineering and The Graduate Faculty Of the University of Kansas.
- [23] **Falcao, J., Goffert, B.**, 2011, Design of a Supersonic First-Throat for a Transonic Wind Tunnel and Numerical Evaluation 20th International Congress of Mechanical Engineering Grarnado, RS, Brazil, November, 15-20.
- [24] **Richard, D. N.**, 1998, “Contoured Supersonic Nozzle” United States Patent, NO: 5,782,414 dated 21 Temmuz, 1998.
- [25] **Zeyrek, M.**, Bazı Türbülans Modellerinin Kullanımı, [www.analizokulu.com/ baziturbulans-modellerinin-kullanimi](http://www.analizokulu.com/baziturbulans-modellerinin-kullanimi)
- [26] **Arina, R.**, 2004, “Numerical Simulaton Near-Critical Fluids” Appied Numerical Mathmatics s. 409-426 Torino İtalya
- [27] **Balabel, A., Hegab, A., Nasr, M., Samy, M., El-Behery**, 2011, Assessment of turbulence modeling for gas flow in two-dimensional convergent–divergent rocket nozzle Applied Mathematical Modelling.
- [28] <http://www.dalgakiran.com/urunler/vidali-kompresorler/tidy-serisi> Dalgakıran Kompresör vidalı kompresör TIDY serisi katalog değerleri, 2017.

EKLER

EK-1. İzentropik akış özellikleri tablosu ($k = 1.4$)

Ek Tablo 1.1 İzentropik akış özellikleri [5]

M	M^*	p/p_0	ρ/ρ_0	T/T_0	A/A^*	F/F^*	$\frac{A}{A^*} \cdot \frac{p}{p_0}$
.95	.95781	.55946	.66044	.84710	1.0021,4	1.0009,3	.5606,6
.96	.96633	.55317	.65513	.84437	1.0013,6	1.0005,9	.5539,2
.97	.97481	.54691	.64982	.84162	1.0007,6	1.0003,3	.5473,2
.98	.98325	.54067	.64452	.83887	1.0003,3	1.0001,4	.5408,5
.99	.99165	.53446	.63923	.83611	1.0000,8	1.0000,3	.5345,0
1.00	1.00000	.52828	.63394	.83333	1.0000,0	1.0000,0	.5282,8
1.01	1.00831	.52213	.62866	.83055	1.0000,8	1.0000,3	.5221,8
1.02	1.01658	.51602	.62339	.82776	1.0003,3	1.0001,3	.5161,9
1.03	1.02481	.50994	.61813	.82496	1.0007,4	1.0003,0	.5103,1
1.04	1.03300	.50389	.61288	.82215	1.0013,0	1.0005,3	.5045,4
1.05	1.04114	.49787	.60765	.81933	1.0020,2	1.0008,2	.4988,8
1.06	1.04924	.49189	.60243	.81651	1.0029,0	1.0011,6	.4933,2
1.07	1.05730	.48595	.59722	.81368	1.0039,4	1.0015,5	.4878,7
1.08	1.06532	.48005	.59203	.81084	1.0051,2	1.0020,0	.4825,1
1.09	1.07330	.47418	.58685	.80800	1.0064,5	1.0025,0	.4772,4
1.10	1.08124	.46835	.58169	.80515	1.0079,3	1.00305	.4720,6
1.11	1.08914	.46256	.57655	.80230	1.0095,5	1.00365	.4669,8
1.12	1.09699	.45682	.57143	.79944	1.0113,1	1.00429	.4619,9
1.13	1.10480	.45112	.56632	.79657	1.0132,2	1.00497	.4570,8
1.14	1.11256	.44545	.56123	.79370	1.0152,7	1.00569	.4522,5
1.15	1.1203	.43983	.55616	.79083	1.0174,6	1.00646	.4475,1
1.16	1.1280	.43425	.55112	.78795	1.0197,8	1.00726	.4428,4
1.17	1.1356	.42872	.54609	.78507	1.0222,4	1.00810	.4382,5
1.18	1.1432	.42323	.54108	.78218	1.0248,4	1.00897	.4337,4
1.19	1.1508	.41778	.53610	.77929	1.0275,7	1.00988	.4293,0
1.20	1.1583	.4123,8	.53114	.77640	1.0304,4	1.01082	.4249,3
1.21	1.1658	.4070,2	.52620	.77350	1.0334,4	1.01178	.4206,3
1.22	1.1732	.4017,1	.52129	.77061	1.0365,7	1.01278	.4164,0
1.23	1.1806	.3964,5	.51640	.76771	1.0398,3	1.01381	.4122,4
1.24	1.1879	.3912,3	.51154	.76481	1.0432,3	1.01486	.4081,4
1.25	1.1952	.3860,6	.50670	.76190	1.0467,6	1.01594	.4041,1
1.26	1.2025	.3809,4	.50189	.75900	1.0504,1	1.01705	.4001,4
1.27	1.2097	.3758,6	.49710	.75610	1.0541,9	1.01818	.3962,2
1.28	1.2169	.3708,3	.49234	.75319	1.0581,0	1.01933	.3923,7
1.29	1.2240	.3658,5	.48761	.75029	1.0621,4	1.02050	.3885,8
1.30	1.2311	.3609,2	.48291	.74738	1.0663,1	1.02170	.3848,4
1.31	1.2382	.3560,3	.47823	.74448	1.0706,0	1.02292	.3811,6
1.32	1.2452	.3511,9	.47358	.74158	1.0750,2	1.02415	.3775,4
1.33	1.2522	.3464,0	.46895	.73867	1.0795,7	1.02540	.3739,7
1.34	1.2591	.3416,6	.46436	.73577	1.0842,4	1.02666	.3704,4
1.35	1.2660	.3369,7	.45980	.73287	1.0890,4	1.02794	.3669,7
1.36	1.2729	.3323,3	.45527	.72997	1.0939,7	1.02924	.3635,5
1.37	1.2797	.3277,4	.45076	.72707	1.0990,2	1.03056	.3601,8
1.38	1.2865	.3231,9	.44628	.72418	1.1042,0	1.03189	.3568,6
1.39	1.2932	.3186,9	.44183	.72128	1.1095,0	1.03323	.3535,9
1.40	1.2999	.3142,4	.43742	.71839	1.1149	1.03458	.35036
1.41	1.3065	.3098,4	.43304	.71550	1.1205	1.03595	.34717
1.42	1.3131	.3054,9	.42869	.71261	1.1262	1.03733	.34403
1.43	1.3197	.3011,9	.42436	.70973	1.1320	1.03872	.34093
1.44	1.3262	.2969,3	.42007	.70685	1.1379	1.04012	.33787

Ek Tablo 1.1 İzentropik akış özellikleri (devamı) [5]

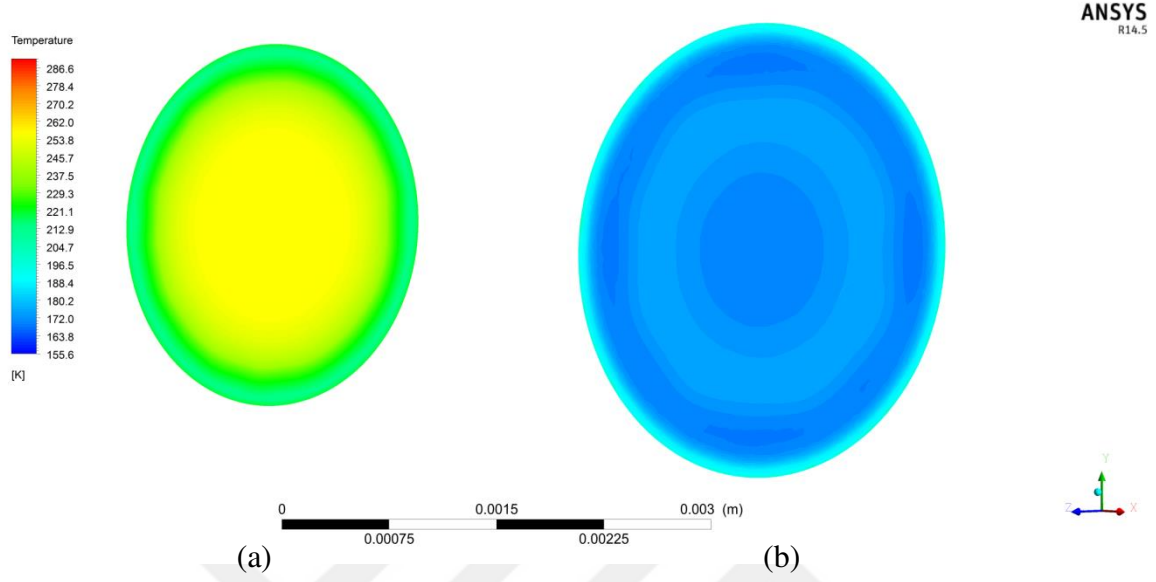
M	M^*	p/p_0	ρ/ρ_0	T/T_0	A/A^*	F/F^*	$\frac{A}{A^*} \cdot \frac{p}{p_0}$
1.45	1.3327	.2927,2	.41581	.70397	1.1440	1.04153	.33486
1.46	1.3392	.2885,6	.41158	.70110	1.1502	1.04295	.33189
1.47	1.3456	.2844,5	.40738	.69823	1.1565	1.04438	.32896
1.48	1.3520	.2803,9	.40322	.69537	1.1629	1.04581	.32607
1.49	1.3583	.2763,7	.39909	.69251	1.1695	1.04725	.32321
1.50	1.3646	.2724,0	.39498	.68965	1.1762	1.04870	.32039
1.51	1.3708	.2684,8	.39091	.68680	1.1830	1.05016	.31761
1.52	1.3770	.2646,1	.38687	.68396	1.1899	1.05162	.31487
1.53	1.3832	.2607,8	.38287	.68112	1.1970	1.05309	.31216
1.54	1.3894	.2570,0	.37890	.67828	1.2042	1.05456	.30948
1.55	1.3955	.2532,6	.37496	.67545	1.2115	1.05604	.30685
1.56	1.4016	.2495,7	.37105	.67262	1.2190	1.05752	.30424
1.57	1.4076	.2459,3	.36717	.66980	1.2266	1.05900	.30167
1.58	1.4135	.2423,3	.36332	.66699	1.2343	1.06049	.29913
1.59	1.4195	.2387,8	.35951	.66418	1.2422	1.06198	.29662
1.60	1.4254	.23527	.35573	.66138	1.2502	1.06348	.29414
1.61	1.4313	.23181	.35198	.65858	1.2583	1.06498	.29169
1.62	1.4371	.22839	.34826	.65579	1.2666	1.06648	.28928
1.63	1.4429	.22501	.34458	.65301	1.2750	1.06798	.28690
1.64	1.4487	.22168	.34093	.65023	1.2835	1.06948	.28454
1.65	1.4544	.21839	.33731	.64746	1.2922	1.07098	.28221
1.66	1.4601	.21515	.33372	.64470	1.3010	1.07249	.27991
1.67	1.4657	.21195	.33016	.64194	1.3099	1.07399	.27764
1.68	1.4713	.20879	.32664	.63919	1.3190	1.07550	.27540
1.69	1.4769	.20567	.32315	.63645	1.3282	1.07701	.27318
1.70	1.4825	.20259	.31969	.63372	1.3376	1.07851	.27099
1.71	1.4880	.19955	.31626	.63099	1.3471	1.08002	.26882
1.72	1.4935	.19656	.31286	.62827	1.3567	1.08152	.26668
1.73	1.4989	.19361	.30950	.62556	1.3665	1.08302	.26457
1.74	1.5043	.19070	.30617	.62286	1.3764	1.08453	.26248
1.75	1.5097	.18782	.30287	.62016	1.3865	1.08603	.26042
1.76	1.5150	.18499	.29959	.61747	1.3967	1.08753	.25838
1.77	1.5203	.18220	.29635	.61479	1.4071	1.08903	.25636
1.78	1.5256	.17944	.29314	.61211	1.4176	1.09053	.25436
1.79	1.5308	.17672	.28997	.60945	1.4282	1.09202	.25239
1.80	1.5360	.17404	.28682	.60680	1.4390	1.09352	.25044
1.81	1.5412	.17140	.28370	.60415	1.4499	1.09500	.24851
1.82	1.5463	.16879	.28061	.60151	1.4610	1.09649	.24660
1.83	1.5514	.16622	.27756	.59888	1.4723	1.09798	.24472
1.84	1.5564	.16369	.27453	.59626	1.4837	1.09946	.24286
1.85	1.5614	.16120	.27153	.59365	1.4952	1.1009	.24102
1.86	1.5664	.15874	.26857	.59105	1.5069	1.1024	.23919
1.87	1.5714	.15631	.26563	.58845	1.5188	1.1039	.23739
1.88	1.5763	.15392	.26272	.58586	1.5308	1.1054	.23561
1.89	1.5812	.15156	.25984	.58329	1.5429	1.1068	.23385
1.90	1.5861	.14924	.25699	.58072	1.5552	1.1083	.23211
1.91	1.5909	.14695	.25417	.57816	1.5677	1.1097	.23039
1.92	1.5957	.14469	.25138	.57561	1.5804	1.1112	.22868
1.93	1.6005	.14247	.24862	.57307	1.5932	1.1126	.22699
1.94	1.6052	.14028	.24588	.57054	1.6062	1.1141	.22532

EK-2 Kompresör katalog değerleri

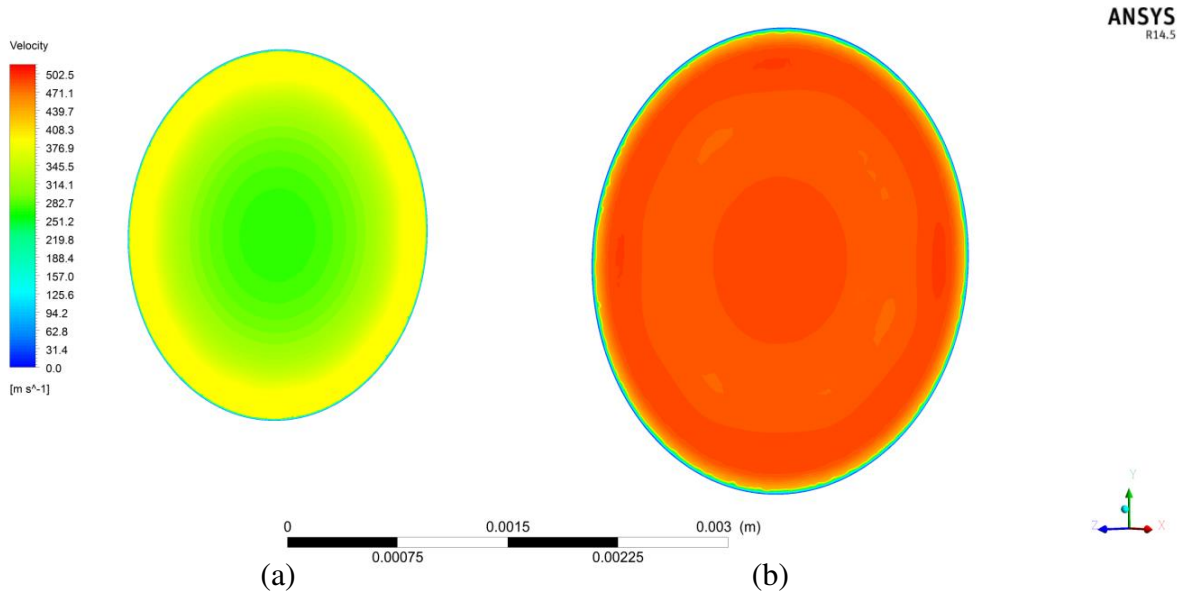
Ek Tablo 2.1 Örnek çalışmada referans alınan kompresör katalog değerleri [28]

TEKNİK VERİLER												
MODEL	BASINÇ		KAPASİTE		HAVA TANKI İT BAĞLANTISI	MOTOR CÜCÜ kW/HP	HAVA BAĞLANTISI	BOYUTLAR mm			AĞIRLIK kg	SES SEVİYESİ dB(A)
	Bar	PSI	m³/dak	SCFM				En	Boy	Yükseklik		
TİDY 3	7,5	110	0,38	13,4	200/250	2,2/3,0	1/2"	1500	550	1350	240	68
TİDY 4	7,5	110	0,41	14,5	200/250	3,0/4,0	1/2"	1500	550	1350	245	68
	10	145	0,36	12,7								
TİDY 5	7,5	110	0,56	19,8	200/250	4,0/5,5	1/2"	1500	550	1350	250	69
	10	145	0,46	16,3								
	13	190	0,35	12,3								
TİDY 7	7,5	110	0,80	28,3	200/250	5,5/7,5	1/2"	1500	550	1325	272	69
	10	145	0,65	23								
	13	190	0,53	18,7								
TİDY 10	7,5	110	1,15	40,6	500	7,5/10	3/4"	1810	640	1520	385	69
	10	145	0,95	33,6								
	13	190	0,77	27,2								
TİDY 15	7,5	110	1,70	60	500	11/15	3/4"	1880	650	1600	414	69
	10	145	1,40	49,5								
	13	190	1,16	41								
TİDY 20	7,5	110	2,25	79,5	500	15/20	3/4"	1880	650	1600	450	69
	10	145	1,96	69,2								
	13	190	1,61	56,9								
TİDY 20 B	7,5	110	2,70	95,4	-	15/20	1"	1275	850	1465	410	69
	10	145	2,30	81,2								
	13	190	1,90	67,1								
TİDY 25	7,5	110	3,30	116,6	-	18,5/25	1"	1275	850	1465	420	69
	10	145	2,80	98,9								
	13	190	2,40	84,8								
TİDY 30	7,5	110	3,80	134,2	-	22/30	1"	1275	850	1465	450	70
	10	145	3,50	123,6								
	13	190	3,00	106,0								
TİDY 40	7,5	110	4,60	162,5	-	30/40	1 1/4"	1575	1030	1750	683	70
	10	145	4,00	141,3								
	13	190	3,60	127,1								
TİDY 40 B	7,5	110	5,20	183,7	-	30/40	1 1/4"	1575	1030	1750	710	70
	10	145	4,30	151,9								
	13	190	3,70	130,7								
TİDY 50	7,5	110	6,40	226	-	37/50	1 1/4"	1575	1030	1750	742	70
	10	145	5,40	190,7								
	13	190	4,30	151,9								

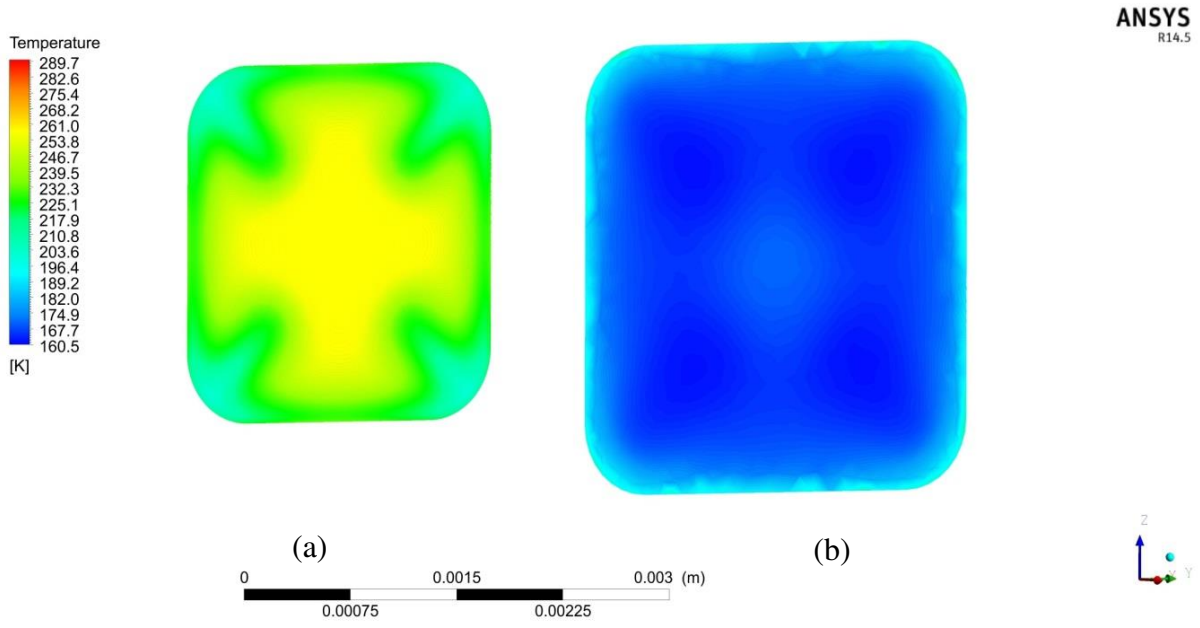
EK-3 ANSYS analiz sonuçları



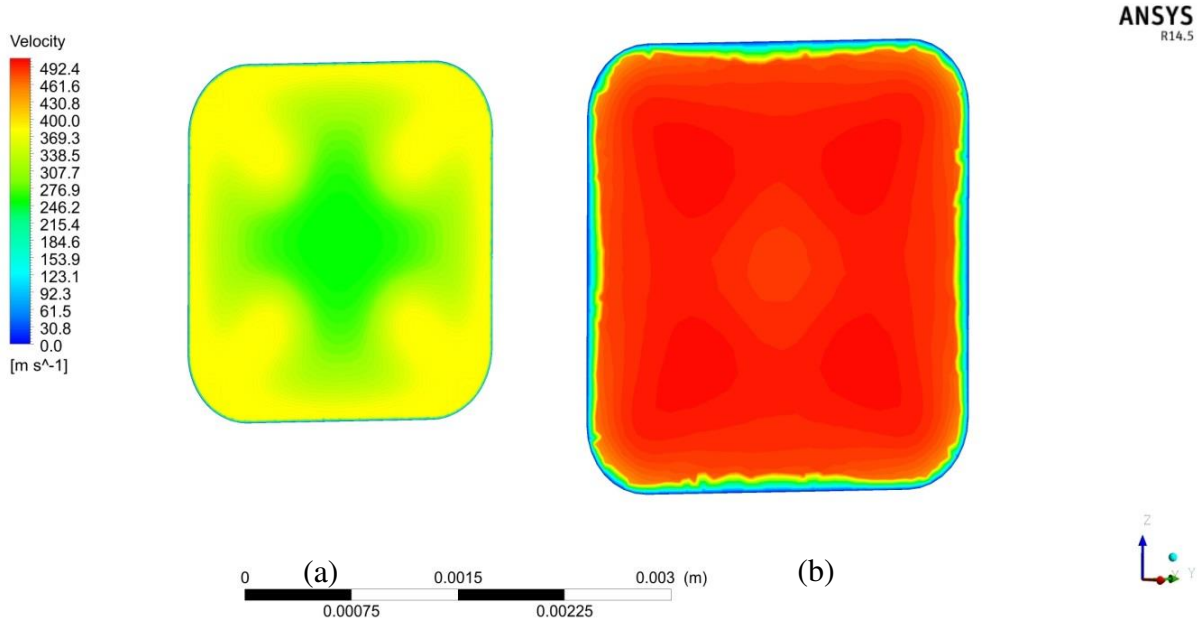
Ek Şekil 3.1. Dairesel kesitli lülenin (a) Boğaz kesiti (b) Çıkış kesiti sıcaklık değişimi.



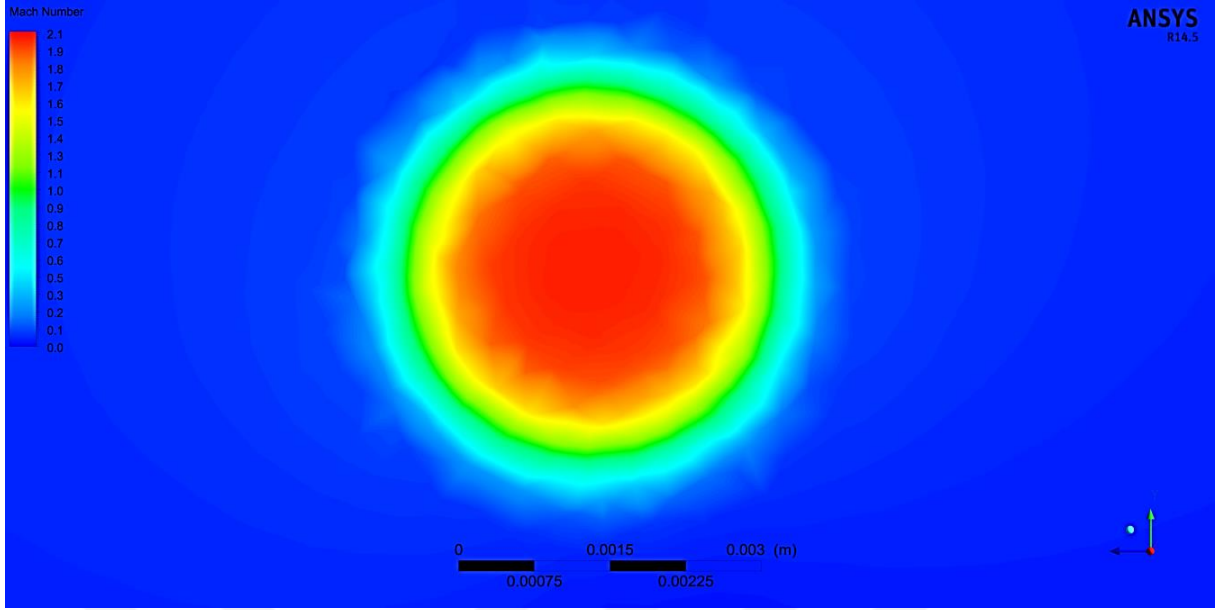
Ek Şekil 3.2. Dairesel kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti hız değişimi.



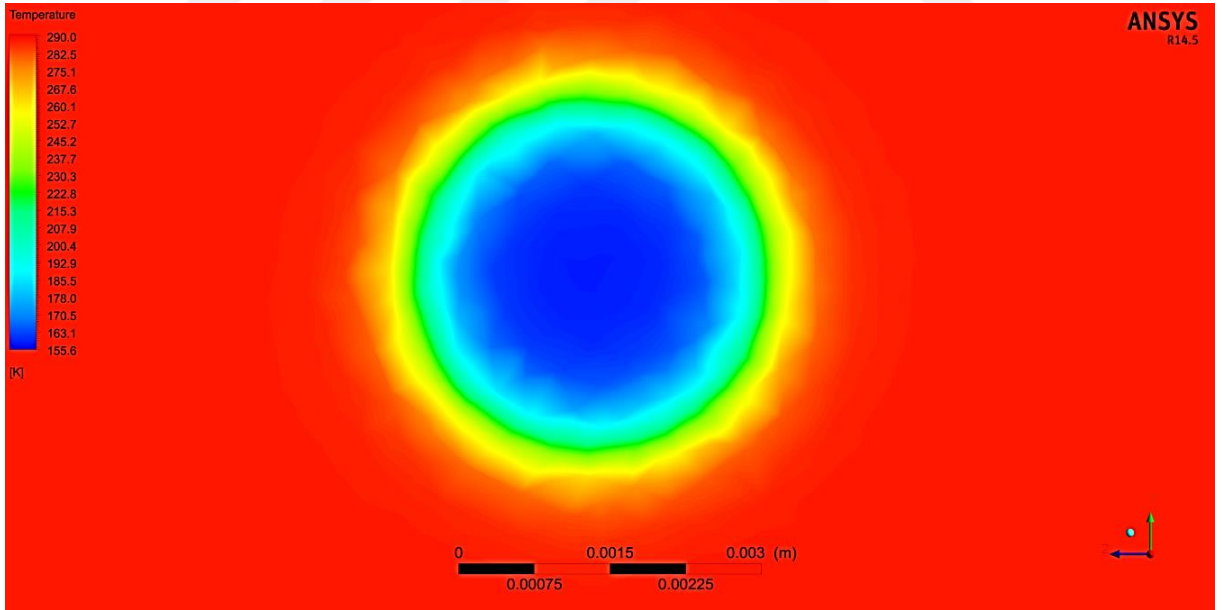
Ek Şekil 3.3. Kare kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti sıcaklık değişimi.



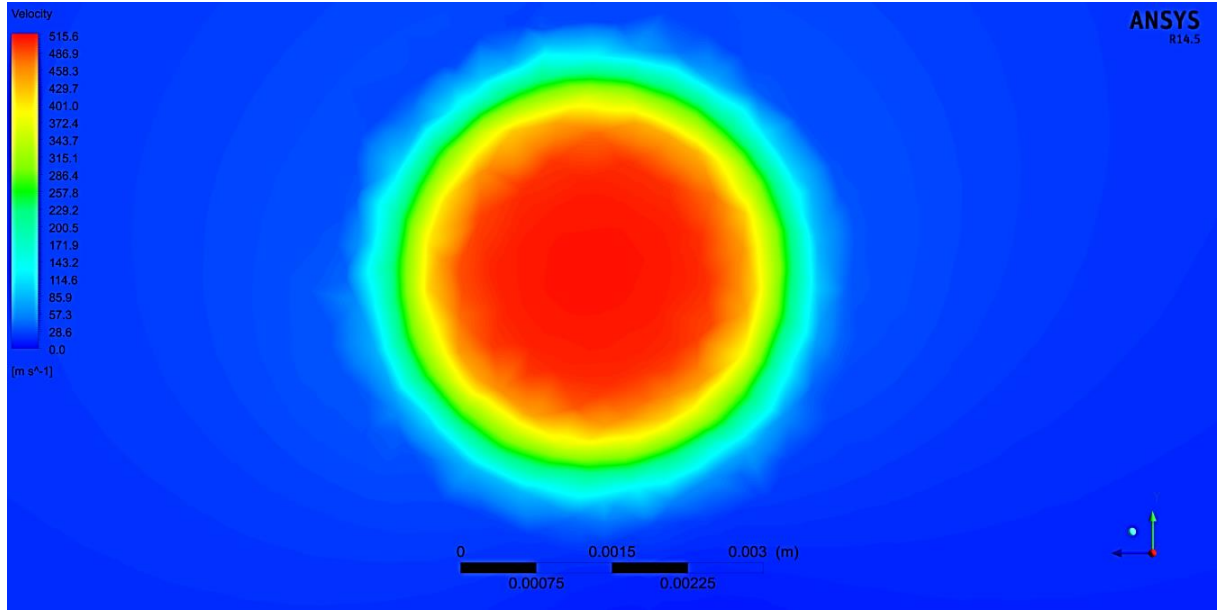
Ek Şekil 3.4. Kare kesitli lülenin (a) boğaz kesiti (b) çıkış kesiti hız değişimi.



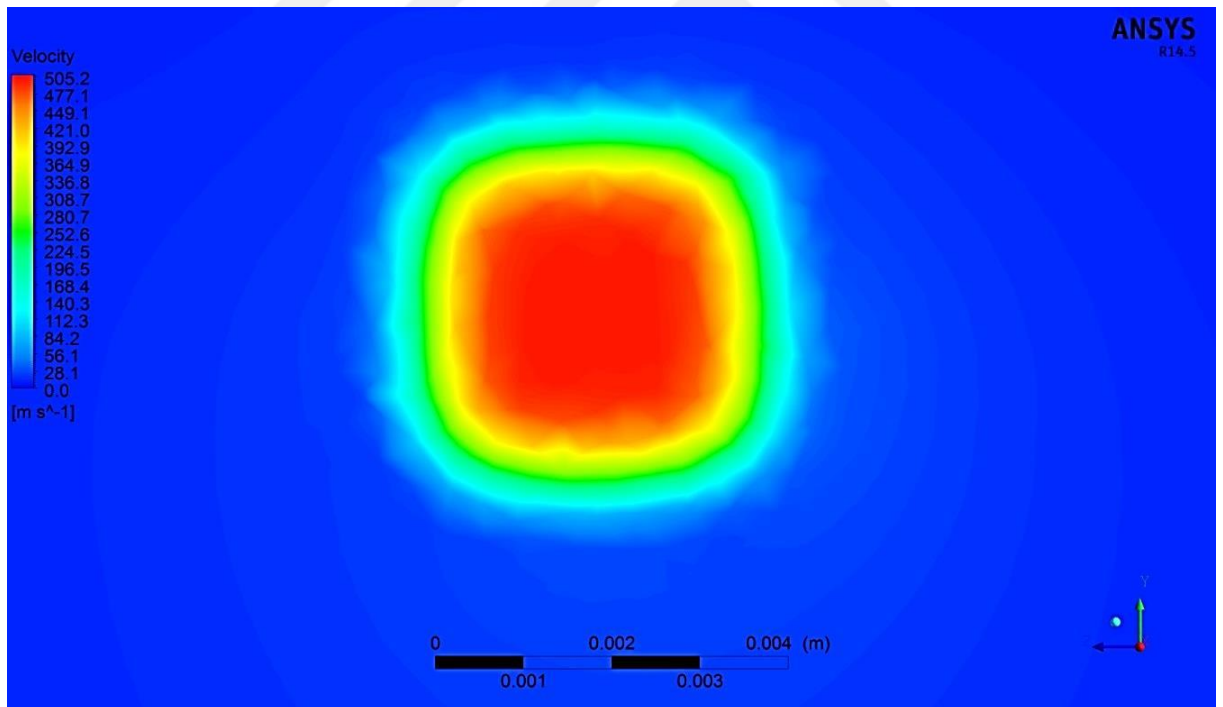
Ek Şekil 3.5. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki Mach sayısındaki değişim.



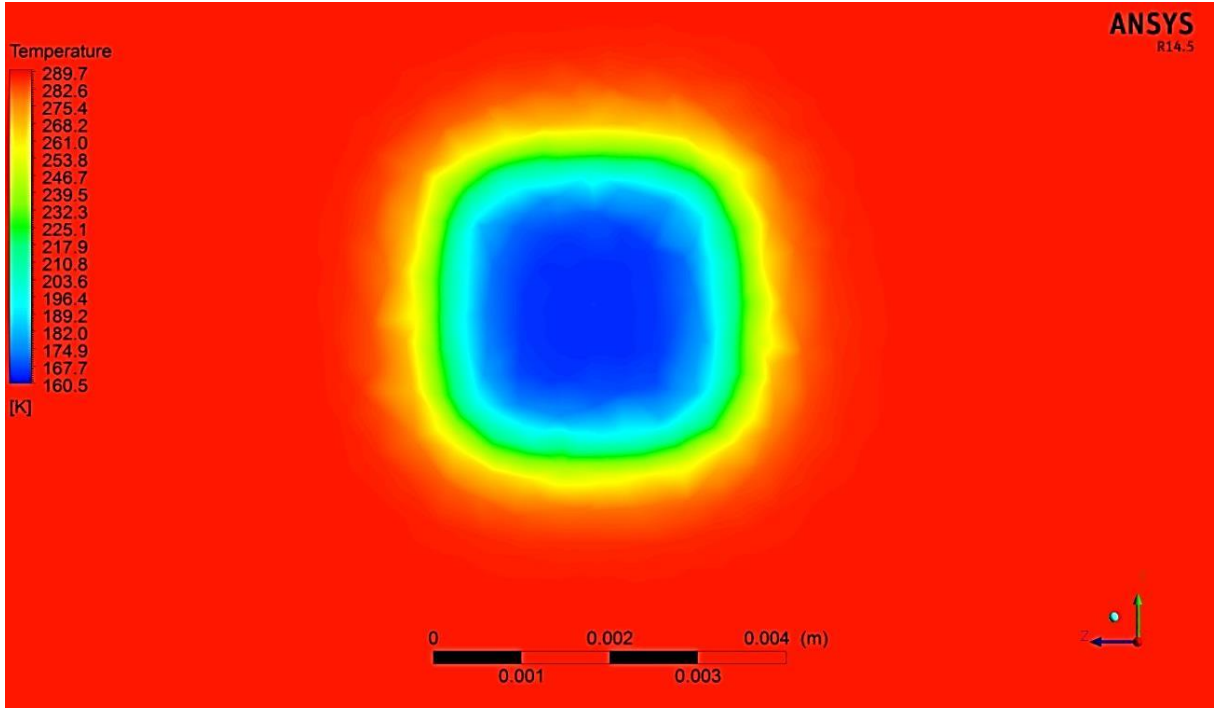
Ek Şekil 3.6. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki sıcaklık değişim.



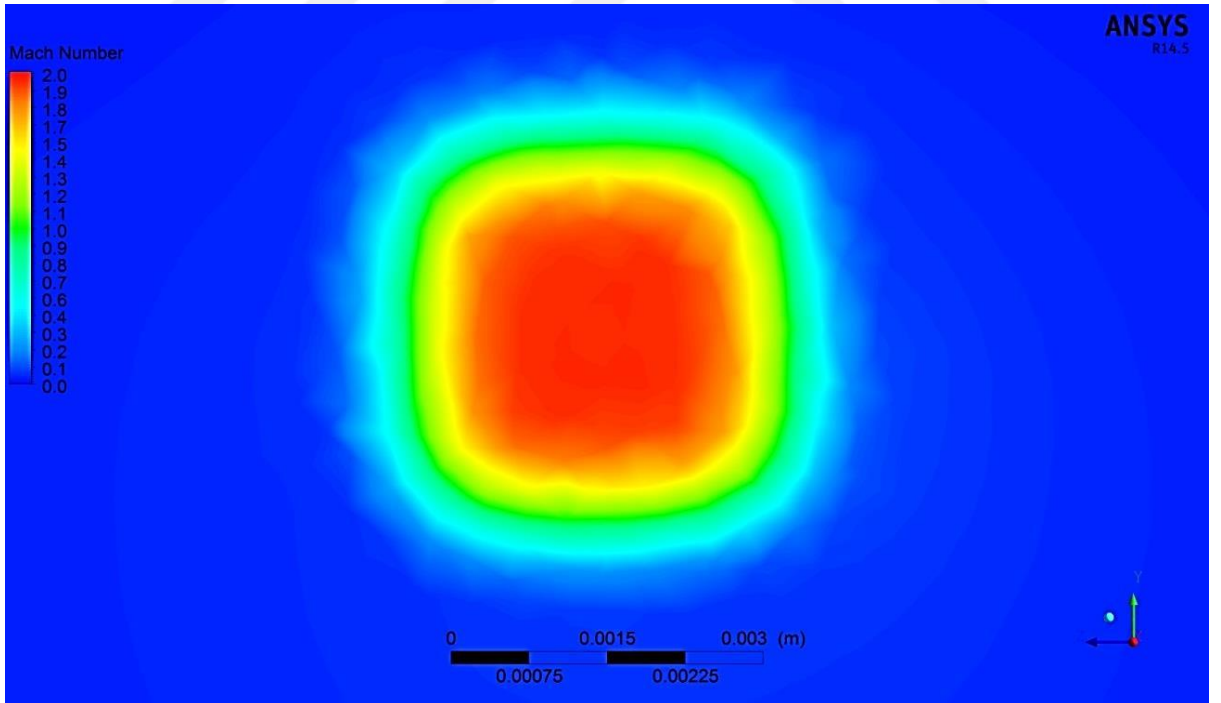
Ek Şekil 3.7. Dairesel kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki hız değişim.



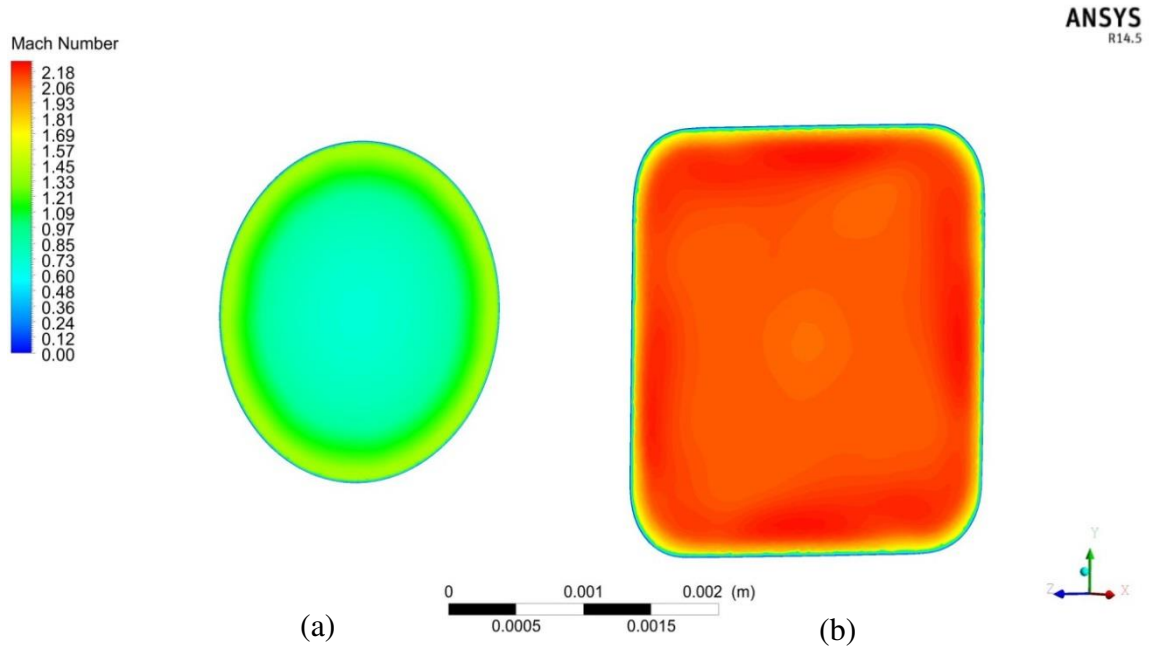
Ek Şekil 3.8. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki hız değişim.



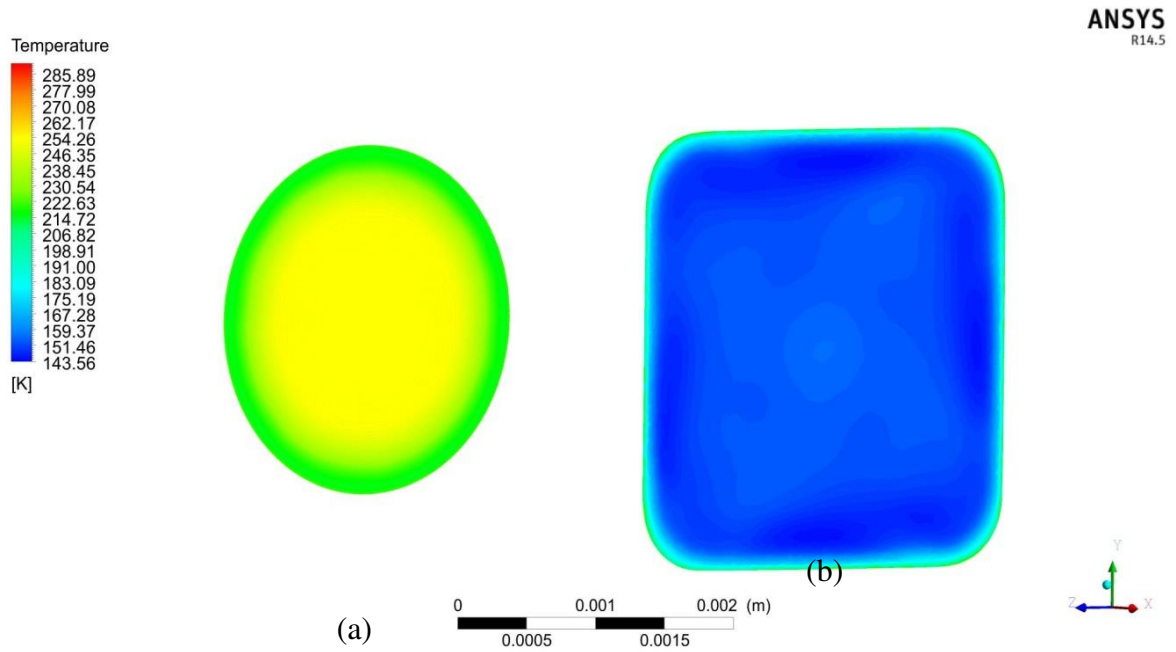
Ek Şekil 3.9. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki sıcaklık değişim.



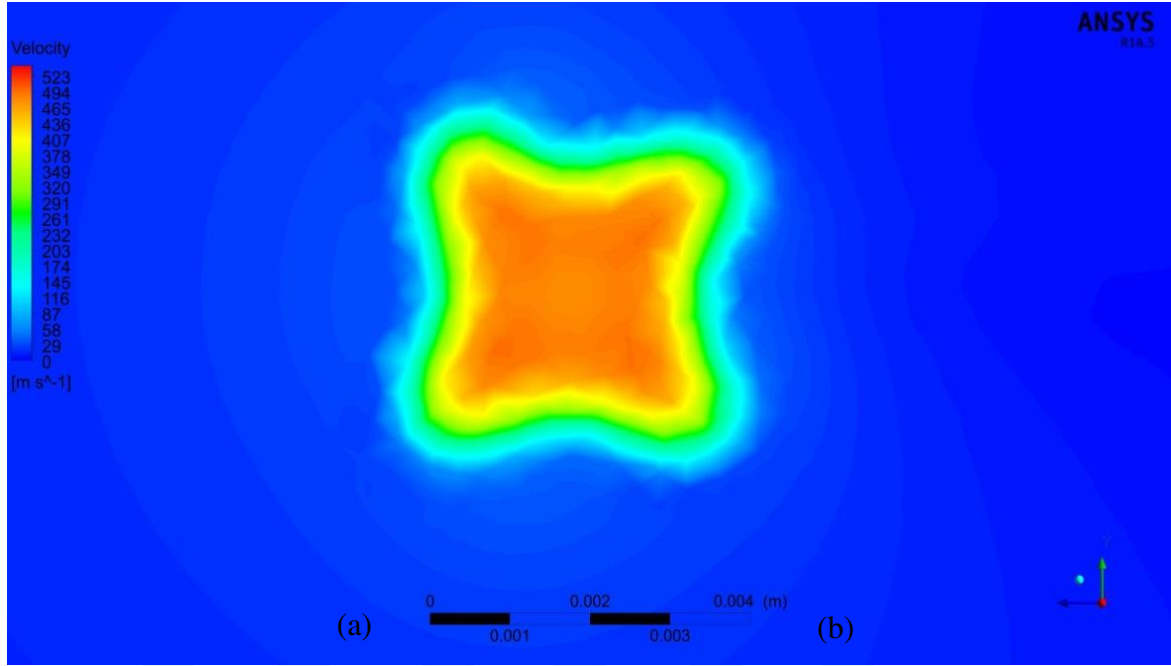
Ek Şekil 3.10. Kare kesitli lüle çıkış kesitinin 4 mm önündeki Mach sayısındaki değişim.



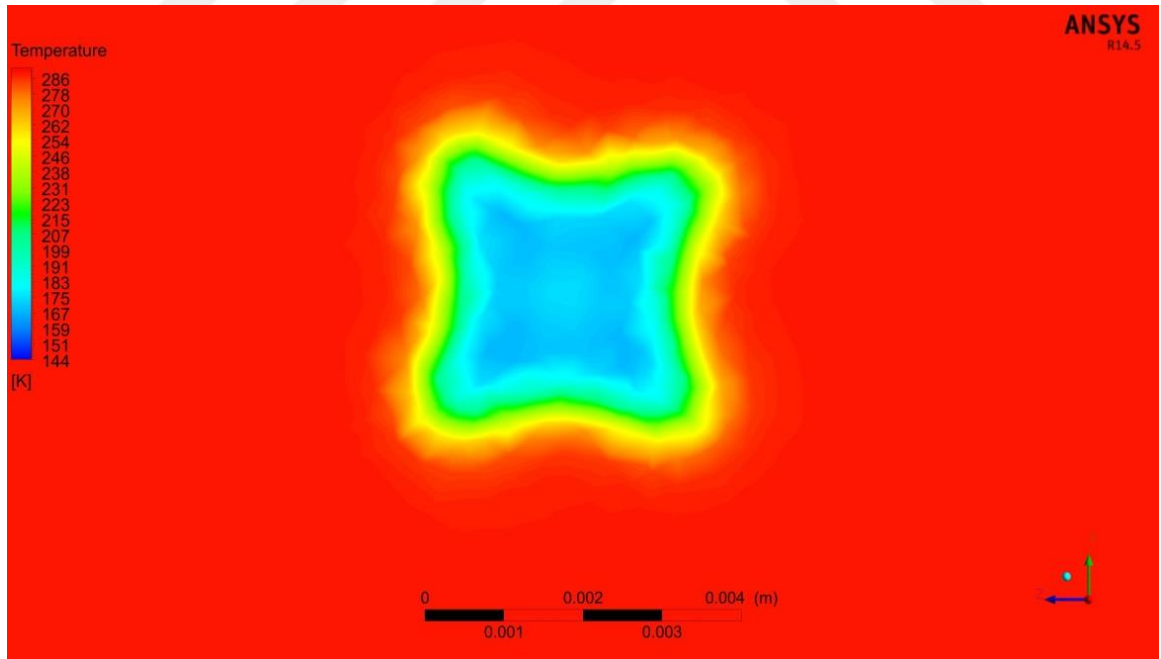
Ek Şekil 3.11. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki Mach sayısı değişimleri.



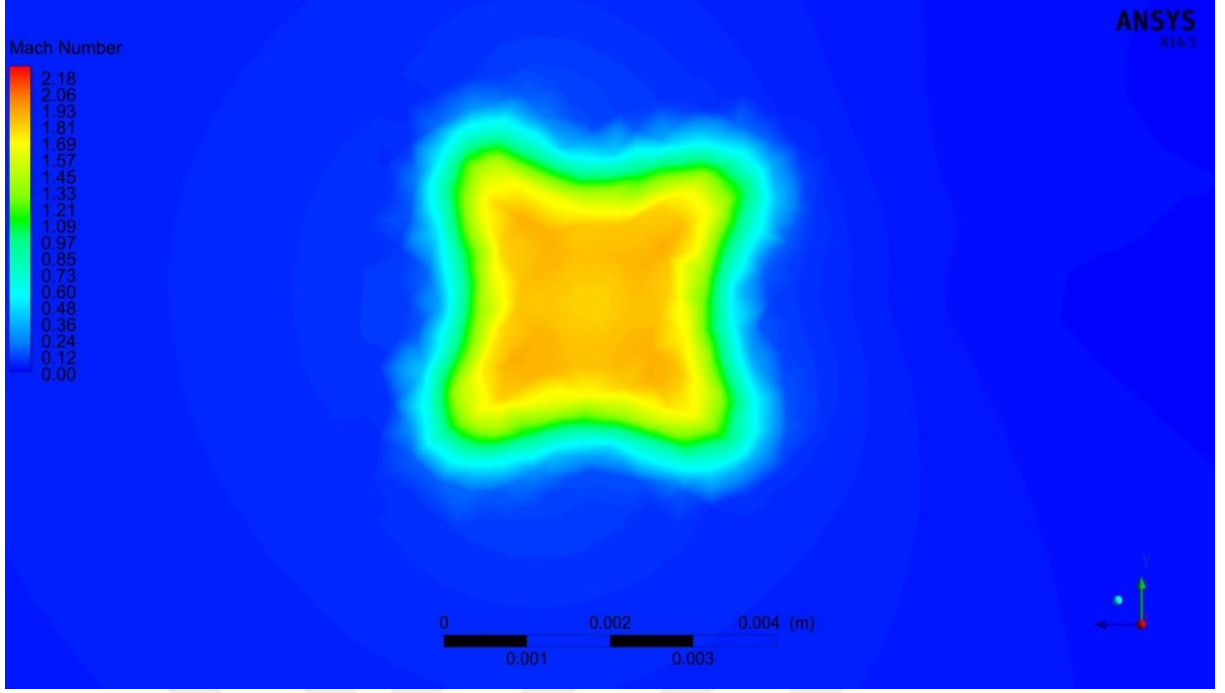
Ek Şekil 3.12. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin (a) boğaz (b) çıkış kesitindeki sıcaklık değişimleri.



Ek Şekil 3.13. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lümenin 4mm önündeki en kesitindeki hız değişimi.



Ek Şekil 3.14. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lümenin 4mm önündeki en kesitindeki sıcaklık değişimi



Ek Şekil 3.15. Yakınsak kısmı dairesel ıraksak kısmı kare kesitli lülenin 4mm önündeki en kesitindeki Mach sayısı değişimi.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlker COŞAR

Adres: CENNET MAH. ALPARSLAN CAD.
NO:73/17 Küçükçekmece/İSTANBUL

Telefon: 0 534 314 33 25

Mail: ilkerccosar@gmail.com

Doğum Tarihi: 04.04.1991

Unvanı: Makine Mühendisi

Derece	Alan	ÜNİVERSİTE	MEZUNİYET ORT.	YIL
Lisans	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ	FIRAT ÜNİVERSİTESİ	3.21 (86)	2009-2013

Bilgisayar Bilgisi: AUTOCAD, SOLIDWORKS, UNIGRAPHICS, CATIA,
ANSYS, MATLAB, PHOTOSHOP CS2, MS OFİCE

Yapılan Staj Yerleri:

FİRMA	GÖREV	YIL
TETAŞ A.Ş.	Atölye Stajı	2011
THY-TEKNİK A.Ş.	Organizasyon Stajı	2012

İş Tecrübeleri:

FİRMA	GÖREV	YIL
GURBETÇİLER	Tasarım Mühendisi	08.2013 - 11.2013
ARGE KİMYA	AR-GE Mühendisi	12.2013 - 09.2014
EMAK MÜHENDİSLİK	Proje Mühendisi	09.2014 - 12.2015
TSE	Muayene Uzmanı	04.2016 - devam ediyor.