

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK İRTİFA ROKET TESTLERİ İÇİN GAZ EJEKTÖR TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berkan ERKAN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK İRTİFA ROKET TESTLERİ İÇİN GAZ EJEKTÖR TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berkan ERKAN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511111106 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, “Berkan ERKAN”, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Yüksek İrtifa Roket Testleri için Gaz Ejektör Tasarımı” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nuriye Leman Okşan Çetiner YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 01 Eylül 2015
Savunma Tarihi : 28 Eylül 2015

ÖNSÖZ

Her şeyden önce bana olan desteğini ve güvenini hiçbir zaman esirgemeyen, tezimin yazımı süresince beni motive eden değerli Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS'e teşekkürü bir borç bilirim. İlk günden bu yana yanımda olup bana inandığı, gerekli desteği sağladığı ve yardımlarını asla esirgemediği için kendisine minnettarım.

Benim bu noktalara gelmemde çok büyük emeği olan ve desteklerini benden bir an olsun esirgemeyen kıymetli aileme de çok özel teşekkürlerimi ve minnettarlığımı belirtmek isterim.

Ve yine bu süreç içerisinde her türlü desteğini aldığım ve her zaman kendilerini destekleriyle yanımda hissettiğim değerli arkadaşlarım Ufuk ÖZCAN ve Mesut ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunmak isterim.

Eylül 2015

Berkan ERKAN
Uzay Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	6
1.2 Literatür Araştırması	8
2. TEORİK VE MATEMATİKSEL KISIM	13
2.1 Giriş.....	13
2.2 Korunum Denklemleri ve İdeal Gaz	14
2.3 Mach Sayısı	15
2.4 İdeal Gazın Denklemlere Eklenmesi.....	15
2.5 Nozul	17
2.5.5 Ejektör için nozul tasarımı	18
3. GAZ EJEKTÖRÜNÜN ANALİTİK MODELİ VE BÖLÜMLERİ	21
3.1 Giriş.....	21
3.2 Karışım Modelleri	23
3.3 Difüzör Kısmı.....	25
4. TASARIM.....	27
4.1 Giriş.....	27
4.2. Boyutlandırma.....	29
4.2.1 Nozul.....	29
4.2.1.1 Nozulun alanları.....	29
4.2.1.2 Karışım bölgesi ve daralma bölgesi	31
4.2.2 Hesaplama ağınının oluşturulması	37
4.3 Analiz	41
4.3.1 Kullanılacak malzemeler ve sınır koşulları.....	44
5. ANALİZ VE SONUÇLARI.....	49
5.1 Fluent Analizi	49
5.1.2 Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları.....	49
5.1.3 Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları.....	53
5.1.4 II. Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları	56
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	61
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	65
EK A.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

ρ	: Yoğunluk
A	: Alan
L	: Uzunluk
m	: Kütle miktarı
P	: Basınç
h	: Entalpi
R	: Gaz Sabiti
T	: Sıcaklık
V	: Hız
M	: Mach sayısı
c	: Ortamdaki ses hızı
γ	: Ortamdaki havanın yoğunluğu
P_0	: Giriş basıncı
$P_b=P_e$	: Arkadaki basınç
P_*	: Boğazdaki basınç
P_e	: Çıkışdaki basınç
P_t	: Boğazdaki basınç
P_1	: Birincil akışın basıncı
P_a	: A noktasındaki basıncı
$A_*=A_t$	: Boğazdaki Alan
ρ_*	: Boğazdaki yoğunluk
A_0	: Giriş alanı
$A_e=A_b$	: Çıkış alanı
T_*	: Boğazdaki sıcaklık
T_0	: Giriş sıcaklığı
$T_e=T_b$	: Çıkış sıcaklığı
T_a	: A noktasındaki sıcaklık
T_{p1}	: P1 noktasındaki sıcaklık
T_{p*}	: Boğazdaki sıcaklık
$L1$	: Giriş uzunluğu
$L2$	: Geçiş uzunluğu
$L3$	: Karışım bölgesi uzunluğu
$L4$	: Difüzör Uzunluğu
$d3$	: Karışım bölgesi yarıçapı
D_{inlet}	: Nozul giriş yarıçapı
θ	: Ejektör yakınsama açısı
β	: Difüzör genişleme açısı
V_0	: Giriş hızı
$V_e = T_b$	: Çıkış hızı
V_a	: A noktasındaki hızı
h_a	: A noktasındaki entalpi

h_b	: B noktasındaki entalpi
m_1	: İkincil akışın debisi
m_2	: Birincil akışın debisi
m_{p1}	: P1 noktasındaki debi
m_{p*}	: Boğazdaki akışın debisi
R	: Evrensel gaz sabiti
M_t	: Boğazdaki Mach Sayısı
M_e	: Çıkıştaki Mach Sayısı
h_{p0}	: Durma noktasında ki entalpi
h_{p1}	: Nozul çıkışında ki entalpi
h_{p1s}	: İzentropik koşullar altındaki Nozul çıkışı entalpisi
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar mekaniği

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1: Sınır şartları [20]	42
--	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İlk ejektör çizimi [12].....	2
Şekil 1.2: Günümüzde kullanılan bazı ejektörler [3].....	3
Şekil 1.3: Sıkıştırılamaz akışlarda kullanılan ejektör [1].....	4
Şekil 1.4: Sıkıştırılabilir akışlarda kullanılan ejektör [1].....	4
Şekil 1.5: Birincil ve ikincil akışın görülebileceği bir ejektör [2].	5
Şekil 1.6: Ekzoz gazı ve ejektörün konumu [4].....	7
Şekil 1.7: Yüksek irtifalı roket testlerinde kullanılan bir ejektör [13].....	8
Şekil 2.1 : Herhangi bir kontrol hacmi örneği	14
Şekil 2.2 : Yakınsak ıraksak nozul [14].....	16
Şekil 2.3 : Subsonik ve süpersonik akışlar için nozul ve difüzör [1]	18
Şekil 3.1 : Nozul giriş, boğaz ve çıkış kısımları [15]	21
Şekil 3.2 : Ejektör örneği [6]	23
Şekil 3.3 : Ejektör kontrol hacmi [1]	24
Şekil 3.4 : Difüzör örneği [19].....	25
Şekil 4.1 : Test düzeneği.....	27
Şekil 4.2 : Ejektör çizimi	28
Şekil 4.3 : Nozul çizimi	31
Şekil 4.4 : Makaledeki boyutlar [17]	31
Şekil 4.5: Vakum yapılan basınç ile karışım bölge ve nozul çıkış alanlarının oranının karesi [17].....	32
Şekil 4.6 : Daralma açısı ve vakum basıncı [17]	33
Şekil 4.7 : Lgap ve vakum yapılan havanın grafiği [17]	33
Şekil 4.8 : Yarıçaplar	34
Şekil 4.9 : Karışım bölgesi [1].....	35
Şekil 4.10 : Karışım bölgesinin uzunluğu	35
Şekil 4.11 : Difüzör açısı [1]	36
Şekil 4.12 : Difüzörün boyutları	37
Şekil 4.13 : Nozulun boğaz kısmı.....	38
Şekil 4.14 : Nozulun çıkış kısmı.....	39
Şekil 4.15 : Karışım bölgesine giriş.....	39
Şekil 4.16 : Karışım bölgesinin çıkış kısmı	40
Şekil 4.17 : Difüzör bölgesinin çıkış kısmı	40
Şekil 4.18 : Kaba hesaplama ağı.....	42
Şekil 4.19 : m_1 ve m_2 basınç girişleri.....	45
Şekil 4.20 : Ejektörün kenar kısımları	46
Şekil 4.21 : Nozulun kenar kısımları	46
Şekil 4.22 : Ejektörün çıkış kısmı.....	47
Şekil 4.23 : Aksisimetrik kısım	47
Şekil 5.1 : Mach sayısı.....	50
Şekil 5.2 : Hız vektörleri.....	50

Şekil 5.3 : m_1 girişindeki basınç değeri	51
Şekil 5.4 : Basınç dağılımı	51
Şekil 5.5 : Eksenel hız dağılımı(m/s)	52
Şekil 5.6 : Sıcaklık dağılımı	52
Şekil 5.7 : Mach sayısı	53
Şekil 5.8 : Hız vektörleri	54
Şekil 5.9 : m_1 girişindeki vakum değeri	54
Şekil 5.10 : Basınç dağılımı	55
Şekil 5.11 : Eksenel hız dağılımı(m/s)	55
Şekil 5.12 : Sıcaklık dağılımı	56
Şekil 5.13 : Mach sayısı	57
Şekil 5.14 : Hız vektörleri	57
Şekil 5.15 : m_1 girişindeki vakum değeri	58
Şekil 5.16 : Basınç dağılımı	58
Şekil 5.17 : Eksenel hız dağılımı(m/s)	59
Şekil 5.18 : Sıcaklık dağılımı	59

YÜKSEK İRTİFA TESTLERİ İÇİN GAZ EJEKTÖR TASARIMI

ÖZET

Ejektörler, vakum oluşturmaya yarayan sistemler olarak 20'nci yüzyıl başlarında mühendislik tasarım parametreleri ortaya konularak tasarlanmaya başlanmıştır.

Ejektörler, içerisine gönderilen hava veya sıvının hızını arttırarak basıncını azaltır ve çevrelerindeki havaya veya sıvıya vakum etkisi oluşturarak çalışırlar. Literatürde farklı şekillerde ve farklı kullanımlar için çeşitli ejektörlerin mevcut olduğunu görmek mümkündür. Genel olarak ejektörler, buharlı jet soğutma sistemleri, kimyasallar küçük kazanlara enjekte etmek, tohumların işlenmesi, termik santrallerde külün uzaklaştırılması, inşaat endüstrisinde de su ve beton karışımının pompalanması gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Ejektörün içerisinde kullanılacak nozulun yapısı, boyutlandırılması ve gelen birincil akış debisi, vakum etkisi yapılacak sıvı veya gazın miktarını belirler.

Kullanılan birincil debi, ikincil akış, karışma oranı ve kullanım yeri özelliklerine bağlı olarak ejektörlerin kullanımı değişkenlik gösterebilmektedir.

Ejektör sistemlerinde hareketli parçalar bulunmadığından dolayı bakım maliyetleri yok denilebilecek kadar az düzeydedir. Ayrıca, sessiz çalıştıkları ve vakum sistemleri yerine kullanılabildikleri için, son yüzyıl boyunca kullanım alanları giderek artmış ve bununla beraber uygulamalardaki kullanımı, basit ve uyum yetenekleri sayesinde giderek yaygınlaşmıştır.

Ejektörler sıkıştırılamaz akışkanlarda ve sıkıştırılabilir akışlarda kullanıma uygundur. Sıkıştırılabilir akış, normal akıştan, akış ve termodinamik kuralları gereğince farklılıklar göstermektedir. Sıkıştırılamaz akışkanlarda kullanılan ejektörler de yakınsak nozul, sıkıştırılabilir akışlarda ise yakınsak ıraksak nozul kullanılabilmektedir. Sıkıştırılabilir akışlarda şok dalgalarının oluşma ihtimalleri ve difüzördeki akışın durumu detaylı olarak incelenmelidir.

Çalışmada kullanılacak test düzeneğinde ses üstü akışlarda kullanılabilecek bir ejektör tasarlanacaktır. Tasarlanacak olan ses üstü ejektörde, ejektör içerisinde oluşacak olan şok dalgaları ve difüzör ile atmosfere açılacak olan akışın detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Genellikle ses üstü hızlarda kullanılan ejektörler; roket, türbin ve ramjet (scramjet) motorları test etmek için kullanılmaktadır. Ejektör mekanizmalarının teori kısmı, temel aerodinamik ve matematiksel denklemlerden oluşmaktadır. Yapılan bu çalışmada, matematiksel denklemlerin çıkarılmasının ardından, tasarım geometrisi çizilecek ve "Fluent" programında akış analizi yapılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında bir ejektör tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarım aerodinamik olarak incelenmiştir. Çalışma içerisinde herhangi bir mukavemet analizi yapılmamıştır. Literatürde yer alan tasarım örnekleri, tasarım parametreleri dikkate alınarak bu ejektör tasarımı yapılmıştır. Ejektör tasarımının tamamlanmasında literatürde yer alan tasarım örnekleri ve parametreleri dikkate alınmıştır.

Ayrıca, bugüne kadar ejektörlerin kullanıldığı farklı alanlar ve ses üstü akışlar için kullanılacak ejektörler incelenmiş, tasarım parametreleri ortaya konularak yüksek irtifalı roket testlerinde kullanılacak bir ejektör tasarlanmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın temel amacı, tasarım parametrelerinin ortaya konularak yüksek irtifalı roket testlerinde kullanılacak bir ejektör tasarlanmasıdır. Bu bağlamda, bugüne kadar ejektörlerin kullanıldığı farklı alanlar ve ses üstü akışlar için kullanılacak ejektörler çalışmaya yön verebilmek için incelenmiştir. Yapılan tasarım, son aşamada, akış analizine tabi tutulmuş ve sonuçları ortaya çıkartılmıştır.

STEAM EJECTOR SYSTEM IN HIGH ALTITUDE TEST (HAT) FACILITY

SUMMARY

Steam ejectors are mostly used in variable applications such as propulsion, refrigeration, evacuation and aerospace. Ejectors are systems, which are using to create vacuum. At the beginning of 20th centuries, these systems are started to using by formulation of engineering design parameters. Steam ejectors are widely used in industrial and commercial applications. The purpose of a steam ejector is to decrease the pressure of a gas flow and compose vacuum on secondary gas. Molecular weight gases in a wide range of process applications, steam ejectors provide vacuum in many process industries and utility companies. Ejectors, not only used for liquid but also used for gases. On this thesis, steam ejector, which is used by gases, is designed.

Steam ejector has two inlets, one is motive gas and the other is suction gas. Motive steam, at high pressure and low velocity, enters the inlet and exits the steam nozzle at design suction pressure and supersonic velocity, entraining the vapor to be evacuated into the suction chamber. The nozzle throat diameter controls the amount of steam to pass through the nozzle at a given pressure and temperature.

Ejector and steam ejector is a pump like device that uses the venture effect of a converging-diverging nozzle to convert the pressure energy of a motive fluid to velocity energy, which creates a low pressure zone that draws in and entrains a suction fluid. Ejectors decrease the pressure by increasing the speed of liquid or gas (air) which passed through its inside. Regarding to ejectors working principle, they form vacuum effect to the surrounded air or liquid on it. There are many different kind of ejectors in terms of usage and types according to the literatures. The main numerical approach in investigating the characteristic parameters of steam ejectors was through evaluating the steam as a single-phase gas. To consider the amount of wet steam at the first level is very significant. It is crucial to anticipate the effect of steam condensation on the aerodynamics and thermodynamic performance of steam ejectors at the second level.

A High Altitude Test (HAT) facility generally forms by different sub-systems as the large expansion ratio rocket engine to be analyzed, a vacuum chamber pursing by a second throat diffuser, gas cooler and a second throat ejector system. The vacuum chamber reserves the rocket engine from ambient environment, by sustaining a low pressure value compatible with the flight situation. The big stagnation pressure resulted by combustion in the engine is used to manufacture a high momentum rocket exhaust, after expansion through the large expansion ratio.

The structure, size and first flow rate of the Nozzle that will be used in inside of the ejectors determine the liquid or gas amount of material on which vacuum effect will be created. Rocket, which has been used at high altitude, can be examined by steam ejectors. After rocket start, exhaust gases can be vacuum thanks to steam ejectors. Thus, rocket characteristic can be evaluated at ground level.

The usage of ejectors can be variable according to used first and second flow rate, mixing ratio or area properties. The maintenance cost of ejector systems are approximately zero due to not having any kinetic or movable part. Because of low maintenance cost and easy production, steam ejectors are widely used in industrial and commercial area.

Additionally, throughout the last century their usage area is increased due to their utilization advantage instead of vacuum systems and their silent running properties. Together with these, having simple and adaptable properties provide them to become widespread usage in applications. Ejectors are convenient to use in both compressible and incompressible flows.

Compressible flows show some differences in terms of flow and thermodynamics properties when compared with normal flows. In ejectors, for incompressible flows convergent nozzles, for compressible flows both convergent and divergent nozzles can be used. For incompressible flow, momentum and continuity equations will can be used. In compressible flows, the formation probability of shock waves and condition of flow in the diffuser should be investigated in details.

An ejector, which can be used, for supersonic flow will be designed in the test setup of this project. At the designing of supersonic flow ejector, flow which will be opened to atmosphere by diffuser and formation of shock waves have to be analyzed properly.

In this research, numerical simulation of a steam ejector at normal condition is taken over. In the mathematical modeling of compressible flow within such equipments, steam ejector theory is operated for analyzing the effects of situation inside the ejectors. To authenticate the numerical simulation, steam ejector conclusions have been contrasted with a set of experimental data indicated in the previous research papers. By comparison of the numerical results with experimental data, it was concluded that steam condensation in the nozzle declines the maximum Mach number of supersonic flow, which has a closer agreement with experimental reports.

Ejectors that are used for supersonic speeds are generally used to test the rocket, turbine and scramjet engines. The theoretical part of the ejectors mechanism is formed by combination of aerodynamics and mathematics equations. In this paperwork, after derivation of mathematical equations, some designed ejector's parameters will evaluated. Thanks to this all information, the geometrical design will draw and flow analysis will proceed in 'Fluent' program, then results will be investigated.

Moreover, ejectors have so many benefits, such as no moving parts, simple, quite, compact, nearly maintenance free, no lubricating oil. Ejectors needs only process, utility and structural connections. In this study, first of all, steam ejector will be designed by using compressible aerodynamic equations and produced ejectors. During designed steam ejector, after nozzle parts designed, mixing chamber will be created. Steam ejector's diffuser part will be designed after mixing chamber. Therefore, at the end of nozzle motive air will reach supersonic velocity, so it will be compose suction on secondary gases. Both gases will be mix at the mixing chamber and speed will be decrease in the mixing chamber. On mixing chamber, both gases velocity will reach subsonic value. Gases will enter diffuser area at subsonic level, so speed going to be more decrease and pressure will be increase. Thus, pressure will be reach atmospheric level

All in all, in this study, an ejector design is realized and this design evaluated in terms of aerodynamic properties. Any resistance analysis has not been carried in this design. During the designing of the ejector for high altitude rocket tests, some design models and parameters from technical litterateurs are considered.

As a result, the main aim of this research is to design an ejector for high altitude rocket tests by determining the design parameters. Consequently, different usage areas of ejectors and ejectors for supersonic speed flows are investigated and reviewed to lead the project.

After the completeness of design, flow analyses are carried on and results are evaluated.

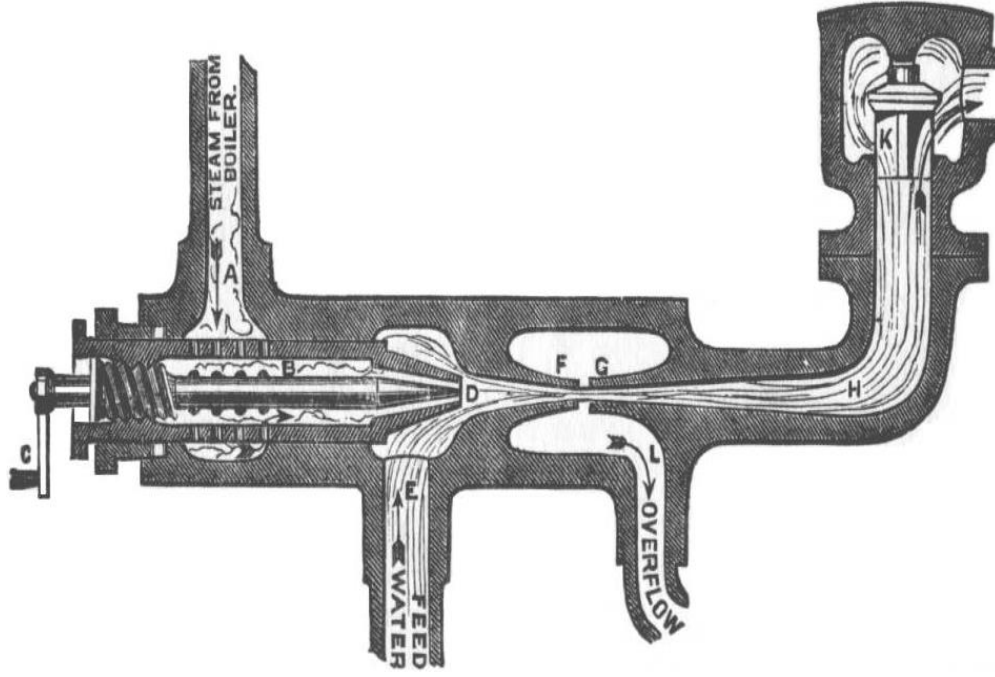
1. GİRİŞ

Ejektörler, içerisine gönderilen hava veya sıvının hızını arttırarak basıncını azaltır ve çevrelerindeki havaya veya sıvıya vakum etkisi oluşturarak çalışırlar. Ejektörler hareketli bir akışkanı yüksek basınçlı enerjiden, düşük basınçlı bir enejjiye geçirerek, hız enejjisini arttırır. Daha yüksek basınçlı olan emme akışkanının, basıncı düşürülen akışkana doğru hareketi sağlanır ve iki akışkanın karışarak dışarı atılmasını sağlar. Hareketli akışkan da, emme akışkanı da gaz veya sıvı olabilir.

Ejektör, Henri Giffard (8 Şubat 1825- 14 nisan 1882) tarafından 1858 yılında icat edilmiştir. İlk ejektörde girişteki hareket kuvveti, yüksek basınç akışkanı olarak sağlanıyordu. Bu ejektör aslen buharlı lokomotiflerde kullanılmıştır. Asıl amacı da buhar tahrikli lokomotiflerde kazan besleme suyunu kazana ve kazandan dışarıya pompalayabilmektir. Buharlı lokomotifler ise 19. ve 20. yüzyılın ortalarına kadar demir yollarında kullanılmıştır. Ancak teknolojinin gelişmesi ile yerlerini dizel ve elektrikli lokomotiflere bırakmışlardır [12].

19. ve 20. yüzyılın ortalarına kadar, teknoloji ve bilim yeteri kadar gelişmediği için ejektörler genellikle ses altı hızlarda kullanılmışlardır. Başka bir bakış açısıyla, ses üstü akış çalışmaları ve denklemleri 20. yüzyılda gelişmeye başladığı için daha öncesinde ejektörler çoğunlukla ses altı hızlarda, yani sıvılarda kullanılmıştır. Teknolojinin gelişmesi sayesinde ise ejektör sistemleri genellikle vakum yapılmasına ihtiyaç duyulan birçok sanayi alanında kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle bu çalışmada üzerinde duracağımız ses üstü akışlarda ejektör kullanımı 20. Yüzyılda artmaya başlanmıştır.

Bunların yanı sıra, ejektörler ikincil bir akışı, birincil akışı kullanarak, momentum ve enerji transferi denklemleri yardımı ile hızlandırır ve hareketini sağlar. Henri Giffard tarafından tasarlanan ilk ejektör tasarımı şekil 1.1 de görülmektedir.



Şekil 1.1: İlk ejektör çizimi [12].

Ejektörler sistemlerinde hareketli parçalar bulunmamaktadır. Bu sebepten, bakım maliyetleri nerede ise yok denecek kadar azdır. Ayrıca, sessiz çalışmaları ve vakum sistemleri yerine kullanılabildikleri için, son yüzyıl boyunca kullanım alanları giderek yaygınlaşmıştır. Bunların yanı sıra uygulamalarda ki kullanımı basit ve uyum yetenekleri her şarta uygundur. 1800’lü yılların sonuna da yapılan ilk tasarım, son yüzyıl içerisinde geliştirmiş ve çok farklı sanayi alanlarında kullanılır hale gelmiştir. Bazı kullanım alanları şu şekildedir:

- Yüksek irtifa roket test sistemleri,
- Havacılık Uzun ve itki sistemleri,
- Kimyasalları küçük, sabit düşük basınçlı kazanlarda, kazana enjekte etmek için,
- Termik santrallerde, kazan zemin külünün (bottom ash) uzaklaştırılmasında buharlı jet soğutma sistemlerinde vakum oluşturmak için,
- İnşaat endüstrisi, suyu ve su bentonit karışımını ve atıkları pompalamakta kullanılırlar. Daha iyi bir vakum oluşturmak için çoklu ejektörlerde günümüzde kullanılmaktadır.

Sanayide kullanılan bazı örnekleri;



Three Stage Hybrid System

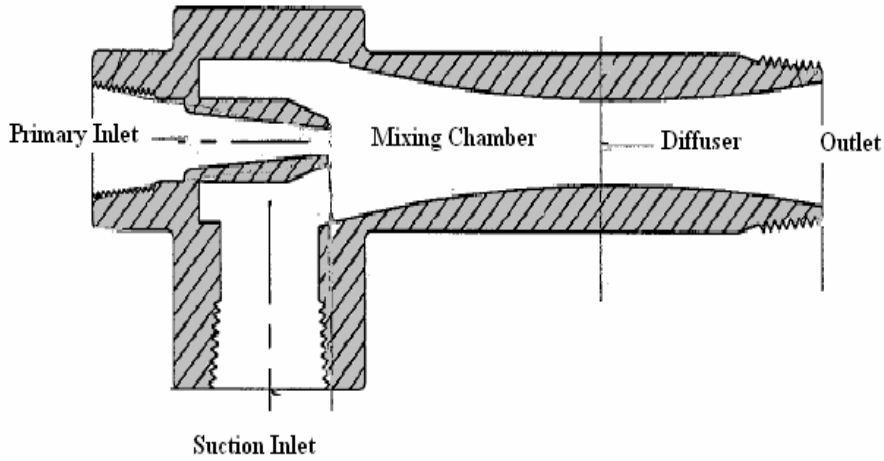


Three Stage Ejector Packaged System

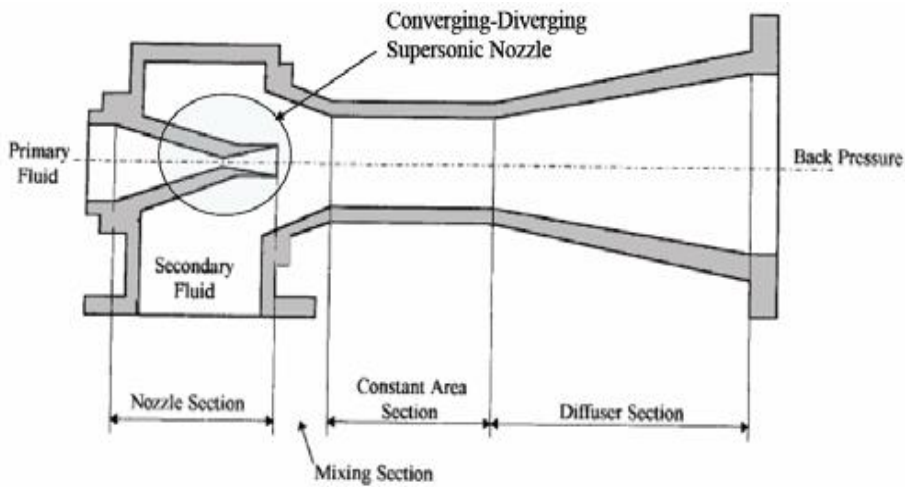
Şekil 1.2: Günümüzde kullanılan bazı ejektörler [3].

Geçtiğimiz 100 yılda ejektörlerin sanayi alanındaki kullanımları ve çok küçük parçacıkları etkiyebilme özellikleri sebebiyle, kullanım alanları giderek artmıştır. Üretim maliyetleri normal vakum pompalarına göre yüksek olsalarda, bakım maliyetleri çok düşük olduğu için kârlı sistemlerdir. Son 50 yılda, araştırmacılar, ejektör sistemlerini optimize ederek verimini arttırmak üzerine çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmaların sonucunda verimi yüksek birçok sanayi alanında kullanılan ejektör sistemleri üretilmiştir. Şekil 1.2 de gösterilmiş olan sanayide kullanılan ejektörler birden fazla ejektörün bir araya gelmesiyle oluşturulmuş. Birden fazla ejektörü ihtiyaca göre pararel olarak veya seri olarak bağlayarak emilim yapılan miktarın artırılması sağlanmıştır.

Ejektörler, birincil bir akış kullanarak momentum ve enerji transferi sayesinde, enerji maliyetlerini düşürerek ikincil bir akışın oluşmasını sağlarlar. Ejektörler sıkıştırılamaz akışkanlarda (sıvılarda) ve sıkıştırılabilir akışlarda (gazlarda) kullanılabilir. Sıkıştırılabilir akış normal akıştan, ses üstü akış denklemleri ve termodinamik denklemlerdeki değişimler sebebiyle farklılıklar göstermektedir. Şekil 1.3 ve şekil 1.4 de görüleceği üzere, sıkıştırılabilir ejektörlerde sıkıştırılamaz ejektörlerde de genel tasarım olarak birbirlerine çok yakındır. Ancak, sıkıştırılamaz akışkanlarda kullanılan ejektörlerde yakınsak nozul, sıkıştırılabilir akışlarda ise yakınsak ıraksak nozul kullanılmaktadır. İki ejektörde şekil 1.3 ve şekil 1.4 de görüldüğü gibi, nozul kısmı, karışım bölgesi ve difüzör bölgelerinden oluşmaktadır.

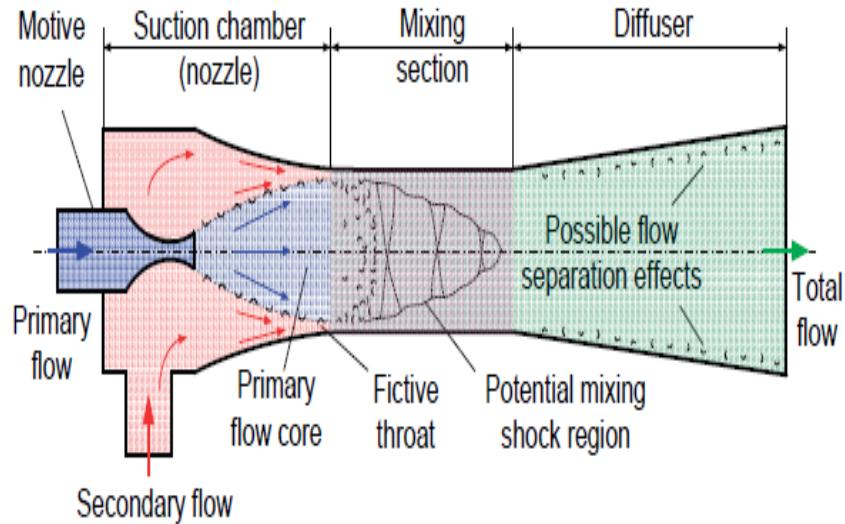


Şekil 1.3: Sıkıştırılamaz akışlarda kullanılan ejektör [1].



Şekil 1.4: Sıkıştırılabilir akışlarda kullanılan ejektör [1].

Şekil 1.5 de ki ejektör sistemini incelediğimizde, düşük basında akış hızlanacağı için nozul sistemleri kullanılarak birincil akış hızlandırılıyor ve ikincil akışın üzerine vakum etkisinin oluşması sağlanıyor. Arkasından gelen karışım bölgesinde akışlar karışmakta ve arkasına difüzör eklenmektedir. Difüzör kısmı, karışım çemberindeki sıvı veya gazların hızlarının azalarak çıkmasını sağlar. Karışım bölgesinin girişindeki daralma, akışın sıkışarak karışım bölgesine doğru ilerlemesini sağlamıştır. Karışım bölgesinde ise, oluşabilecek şoklar ile akışın hızının düşürülmesi planlanmaktadır. Hızı düşürülerek basıncı arttırılan akış, ses hızının altında difüzör bölgesine girmektedir. Ses hızının altında difüzör bölgesine giren akış ise, giderek yavaşlayarak ve basıncı artarak dışarı çıkar. Difüzör çıkışındaki basınç ise atmosferik basınca eşittir.



Şekil 1.5: Birincil ve ikincil akışın görülebileceği bir ejektör [2].

Ejektörler basit geometrilere sahip ve hareketli parçaları olmayan sistemlerdir. Bu sebeple kullanımlarında elektrikselsel ve mekanik enerjiye ihtiyaçları yoktur. Bakım maliyetleri çok düşüktür. Vakum amaçlı kullanılan sıvı ejektörlerin diğer vakum sistemlerine göre aşınmaları çok düşüktür. Ejektörlerin bu özelliğinden yararlanarak, yeni yapılacak uzay araçlarında radyasyon koruma (waste heat transport) olarak kullanılması planlanmaktadır [2]. Bunun yanı sıra, gaz ejektörleri yüksek irtifalı uçakların itki düzenlemelerinde kullanıma çalışmaları bulunmaktadır [2].

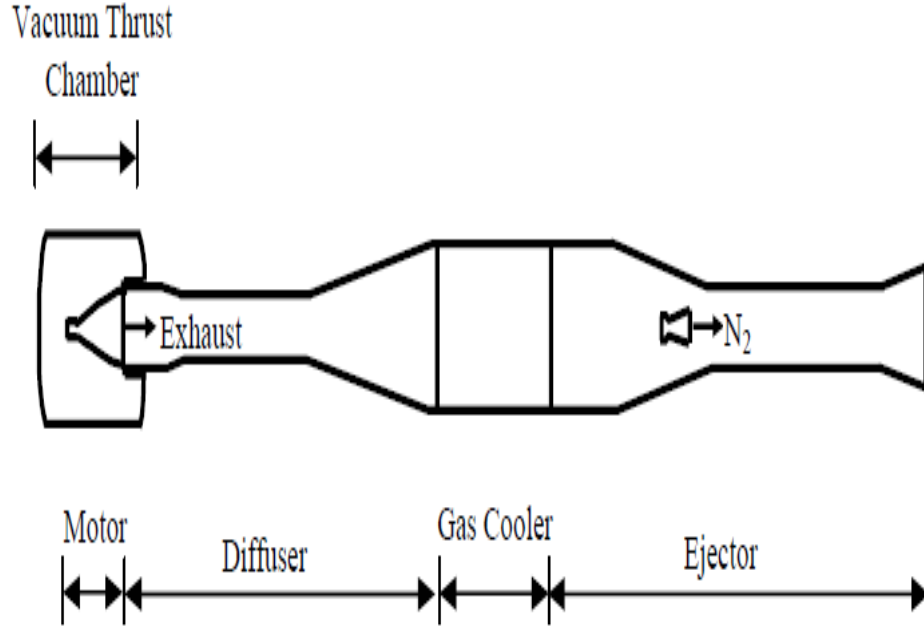
1.1 Amaç

Ejektörler çok geniş alanlarda uygulamalı olarak kullanım sahasına sahiptirler. Bu sebeple tasarlanacak olan ejektörün kullanım amacı bulunmaktadır. Bu tezin amacı, Ejektörlerin matematiksel modelinin ve analitik denklemlerinin anlatılması, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için ejektörlerin incelenmesi, arkasından yüksek irtifa roket test sistemleri için kullanılacak ejektör test düzeneği tasarımının ve bilgisayarlı analizlerinin yapılmasıdır. Test düzeneği ile ses üstü akışı kullanarak düzenekteki ejektörün etrafından ses üstü akış üzerine vakum yapılması sağlanacaktır. Karışım bölgesinde karışan akışın ses altı hızlara düşmesi sağlanacak ve arkasından difüzör ile akışın yavaşlayarak atmosferik koşullara çıkması sağlanacaktır. Genellikle ses üstü hızlarda test düzeneklerinde roketler, türbinler ve ramjet/scramjet motorları test edilmektedir.

Literatürde bulunan tasarım örnekleri, tasarım parametreleri dikkate alınarak bu çalışma kapsamında yeterli sayıda analiz ve hesaplamalarla birlikte ejektör tasarımı gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tasarım adyabatik olarak aerodinamik ve momentum denklemlerinden yararlanarak oluşturulmuştur. Ancak mukavemet ve ısı analizler gerçekleştirilmemiştir.

Vakum genel olarak negative basınç anlamına gelmektedir ve atmosfer basıncının altında ki her basınç vakum basıncıdır ve birimi Pascal olarak adlandırılmaktadır. Tasarlamayı planladığımız ejektörde 5000 pa veya altında bir basınca düşülerek vakum oluşturulması amaçlanmaktadır.

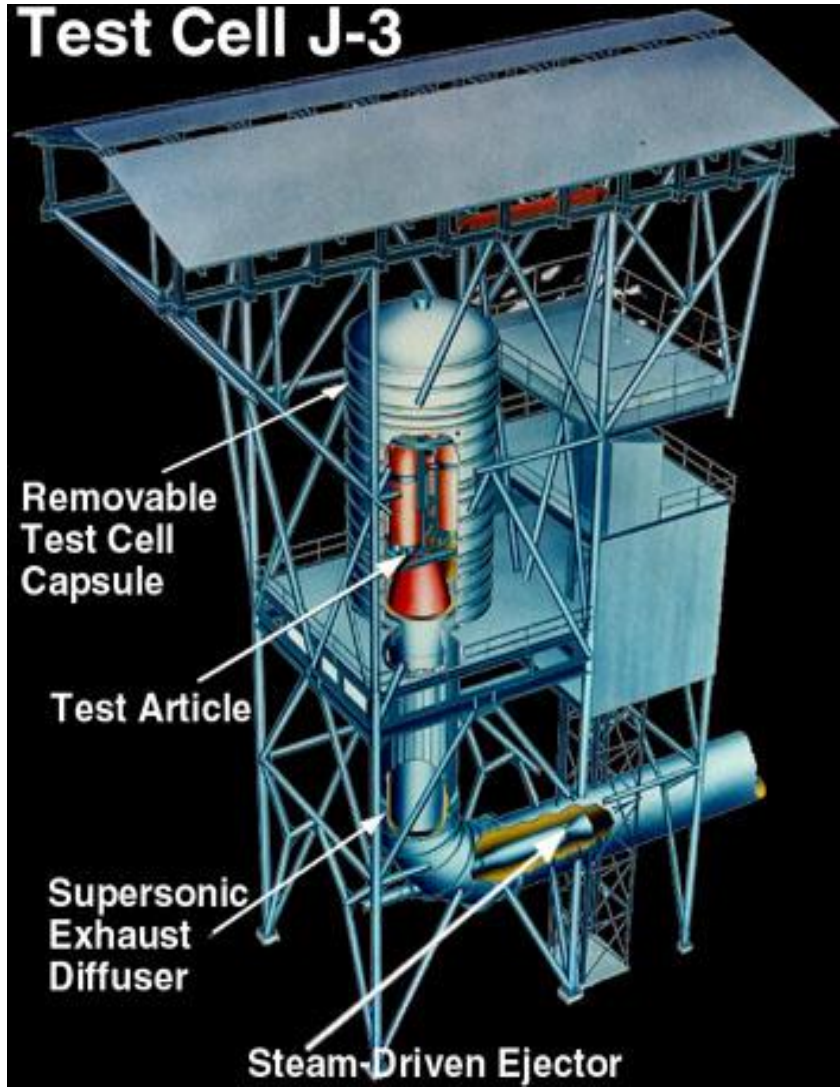
Ejektör mekanizmalarının teori kısmı temel aerodinamik denklemlerinden sıkıştırılabilir aerodinamik denklemleri üzerinde durulmuştur. Matematiksel denklemlerin çıkarılmasının ardında, tasarım geometrisinin elde edilmesi için literatürdeki tasarlanmış olan ejektörlerden yararlanılmıştır. Tasarım boyutlandırmasının arkasından, “Fluent” programında akış analizi yapılarak sonuçları incelenmiştir. Yapılacak olan analizlerde iki boyutlu aksisimetrik ejektör modeli olacaktır. Analiz sonucunda 5000 Pa’lık basınçlı bir akışın üzerinde vakum oluşturulması planlanmaktadır.



Şekil 1.6: Ekzoz gazı ve ejektörün konumu [4].

Bu çalışma kapsamında ise bir ejektör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aerodinamik olarak çalışılmış ve çalışma içerisinde test ve herhangi bir mukavemet analizleri gerçekleştirilmemiştir. Literatürde yer alan tasarım örnekleri, tasarım parametreleri dikkate alınarak, ejektörün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bugüne kadar ejektörlerin kullanıldığı farklı alanlar ve ses üstü akışlar için kullanılabilecek ejektörler incelenmiş, tasarım parametreleri ortaya konularak yüksek irtifalı roket testlerinde kullanılabilecek bir ejektör tasarlanması amaçlanmıştır. Bu çalışmada tasarladığımız ejektörün, 5000 Pa'lık basınçlı bir akışa vakum yapması ve belirli bir miktar debinin vakum oluşturulan alandan geçmesi amaçlanmaktadır. Şekil 1.6 ve şekil 1.7 de tasarlamayı planladığımız test düzeni ve ejektör örneği görülmektedir.

Şekil 1.6 da görüldüğü gibi, motorun egzoz gazı, ejektörden verilen N_2 birincil akışı ile emilmektedir. N_2 akışın ejektörün yakınsak ıraksak nozul bölünümünde dışarı çıkmaktadır. Motorun egzoz gazının emilmi ile birlikte N_2 gazı ve egzoz gazını ejektörün karışım bölgesine girerek ses altı bir hıza düşürülmesi hedeflenmiştir. Difüzör bölgesine ses altı bir hızda giren akışın daha da yavaşlayarak atmosfer şartlarında ki bir basınç ile atmosfere çıkarılması amaçlanmıştır.



Şekil 1.7: Yüksek irtifalı roket testlerinde kullanılan bir ejektör [13].

1.2 Literatür Araştırması

Ejektörler, 20. yüzyılın başlarında mühendislik tasarım parametreleri ortaya konularak kullanılmaya başlandı. Literatürde farklı şekillerde ve farklı kullanımlar için çeşitli ejektörler mevcuttur. Bu ejektörlerin türlerinin kullanımı ise kullanılan birincil debi, ikincil akış, karışma oranı ve kullanım yeri özelliklerine bağlıdır. En önemli iki farklı türü ise yukarıda bahsetmiş olduğumuz sıkıştırılamaz akışlarda kullanılan ejektörler ve sıkıştırılabilir akışlarda kullanılan ejektörlerdir. Aslında temel olarak iki ejektör türünde aynı prensiplerde çalışmaktadır.

Ancak, bu iki ejektörde farklı nozul tipleri kullanılarak akışlar düzenlenmektedir ve matematiksel modelleri farklıdır. Bu çalışmada sıkıştırılabilir akışlı ejektör sistemleri detaylı olarak incelenmiştir.

Nozulun yapısı boyutlandırması ve gelen birincil akış debisi vakum etkisi yapılacak sıvı veya gazın miktarını belirler. Ayrıca sıkıştırılabilir akışlarda şok dalgalarının oluşma ihtimalleri ve difüzörde ki akış durumu detaylı olarak incelenmelidir. 1950 yılında Keenan ve Neumann [1] tarafından yayınlanan makalede, ejektör üzerine ilk terori ve deneysel çalışmaları yapılmıştır.

Tek boyutlu hava ejektörlerini difüzör kısmı olmadan tasarlamışlardır. Bunu tasarlariken momentum, süreklilik ve enerji denklemlerinin çözümlerinden yararlanmışlardır. 1951 yılında Johannesen'in yapmış olduğu detaylı çalışmalar ejektör tasarımı üzerine önemli etkilere sahiptir.

Birçok farklı ejektör tasarımı yapmayı denemiş ve bunları farklı açılardan test etmiştir. Analizlerinin bir kısmı teorik, bir kısmı ise deneyseldir [5]. Matsuo et al (1981, 1982), süpersonik hava ejektörlerinin performansları üzerine çalışmalar yapmıştır. Buldukları en önemli sonuç, optimum bir boğaz alan oranı, ikincil akışda ki vakum performansı maksimuma getirir.

Dutton ve Carroll (1986) supersonik ejektör optimizasyon problemlerini çözmek için bir boyutlu sabit akış modellerine dayalı teknikler geliştirmişlerdir. İstenilen performansı elde etmek için nozul giriş Mach sayısı ve ejektör alan oranı gereklidir. Sasic ve Petrovic (1987) ejektör geometrisini ve akışı ele alarak, karışım kayıplarını minimuma indirme üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma ile ejektörün kullanılabilir enerjisinin maksimuma çıkacağını iddia etmişlerdir.

Bu çalışmaya ek olarak, birçok araştırmacı giriş nozulun konumunun ejektör verimini etkileyeceğini ve maksimum ejektör verimi için nozulun optimum bir yerinin olduğunu söylemişlerdir. Bu düşüncüyü, Johannesen (1951), Watanabe (1972) ve Vyas, kar (1975) desteklemişlerdir [5].

DeFrate ve Hoerl [1], sabit basınçlı karışım modelini ideal gaz kanunu ve molekül ağırlıklarını kullanarak tasarlamıştır. Emanuel [1], sabit basınçlı karışımın entalpisini göz önüne alarak ve basit analitik metodları kullanarak, zamandan bağımsız bir ejektör performansı hesaplamıştır. Rice ve Dandachi [1], Gaz ejektörlerinde giriş kısmındaki akışı tahmin etmek için gerekli olan hesaplamaları sürtünme ve karışım bölgesinde ki kayıpları ihmal ederek yapmışlardır.

Son yıllarda yapılan araştırlardan biri, süpersonik bir ejektörün tasarımı üzerinedir ve D.W. Sun and I.W. Eames tarafından 1995 yılında yapılmıştır [1]. Birçok Ejektör difüzör performans hesaplama methodları kullanılmıştır. Ana method tek boyutlu analiz ve finite element methodlarıdır. Literatüre göre çoğu araştırma tek boyutlu yaklaşımla yapılan modellemelerden oluşur [9]. Bauer, Muse ve Tinsley 1-D yaklaşım yaparak hipersonik testler yapmışlardır. İki boyutlu süpersonik teori Dr. Korst tarafından geliştirilmiştir ve Bauer tarafından düzenlenerek aksisimetrik ejektör sistemleri tasarlanmıştır.

Bazı araştırmacılar, ejektörlerde ki akış durumunu inceleyebilmek için 2-D modelleme yöntemini kullandı. Goff ve Coogan [1] iki boyulu ejektör performansını ilk incelemeyi düşünenlerdir. Hedges ve Hill (1974) [5], ilk defa finite element methodunu işleyerek, Hesaplamalı Akışlar Dinamiği (CFD) ile gaz ejektörlerini incelemişlerdir.

1990'lı yıllarda ticari olarak Hesaplamalı Akışlar Dinamiği programları üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. CFD programları, o yıllarda çok yeni olarak kullanılmaya başlanmıştı. Bu programların büyük potansiyelleri olmasına rağmen çok az sayıda ki araştırmacı bu programları ejektör analizlerinde kullanmıştır. Riffat et al [1], Ejektörlerin CFD analizlerini ticari amaçlı kullanılan FLUENT ile yapmıştır.

Chen et al (1994) ikinci dereceden bir şekilde süpersonik akıştaki ikince boğaz ve ejektör difüzör sistemlerini incelemiştir. Yaptıkları model, akışlardaki ayrılmaları çok iyi çözümleyebilmişti. Çıkardıkları sonuç giriş nozulun optimum bir yeri olduğudur [5].

Riffat et al (1996) ticari bir CFD programı kullanarak bir ejektör ısı pompası tasarlamış ve analizini yapmıştır. Ejektör analizi için üç boyutlu bir akış kullanmış ve sıkıştırılamaz bir akış modellemişlerdir. Desevaux et al (2002) süpersonik ejektörlerde oluşan şok dalgalarını ve karışım bölgesindeki akışları incelemek için CFD'yi kullanmışlardır. Ayrıca, bilgisayarlı hesaplamalar ile deneysel çalışmaların sonuçları kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda CFD sonuçlarının deneysel çalışma sonuçlarıyla yeterince yakın olduğunu gözlemlemişlerdir [5].

2000’li yıllara gelindiğinde ejektör sistemleri yüksek irtifalardaki test düzenekleri içinde kullanılmaya başlanmıştır. Tezin ilerleyen aşamalarında da bu konu üzerinde durulacaktır.

Roketler gibi yüksek irtifalara çıkan cihazları test etmek için, o irtifadaki hava şartlarına ve hava akışına ihtiyaç vardır. Bu koşullar ejektör sistemleri kullanılarak rahatlıkla elde edilebilmektedir.

2009 yılında Kumaran, Sundararajan ve Manohar yüksek irtifalara test sistemleri için ejektörlerin CFD si üzerine çalışmışlardır [4]. Sreekireddy, Kumar ve Bhramara 2012 yılında buhar ejektörlerinin yüksek irtifalı test sistemlerinde kullanılması üzerine farklı ejektörleri iki boyutlu aksisimetrik modelleme kullanarak CFD analizi yapmışlardır [16].

2. TEORİK VE MATEMATİKSEL KISIM

2.1 Giriş

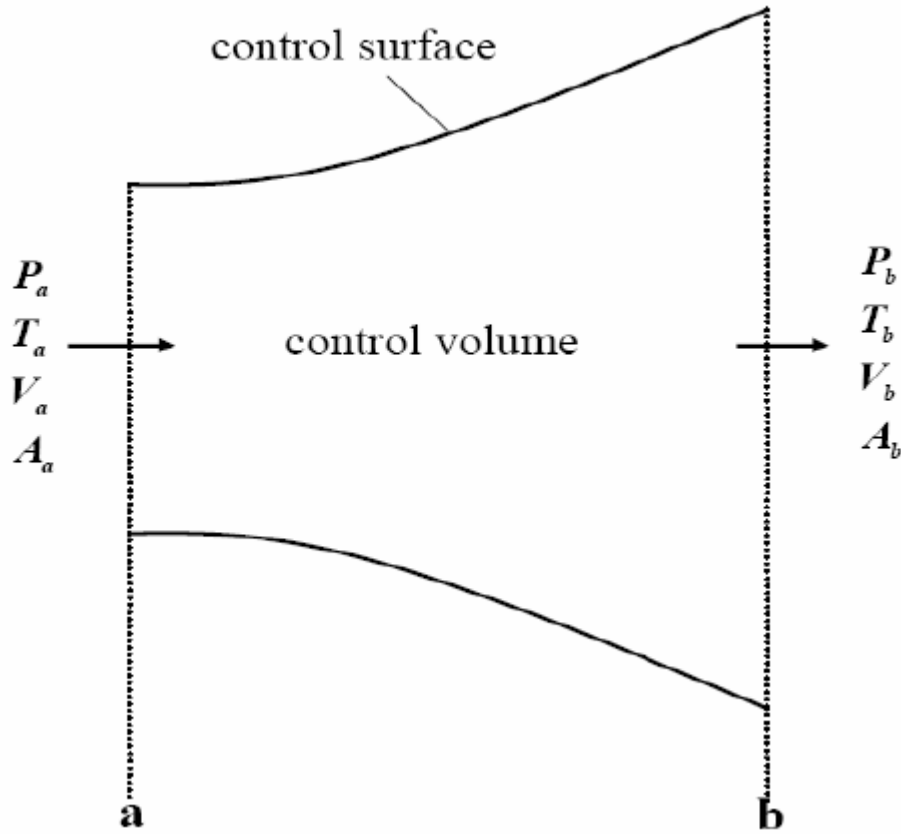
Bu bölümde gaz ejektörlerinin bir boyutlu analitik denklemleri ve onların çözümlenmesi hakkında bilgi verilecektir. Bütün bir boyutlu sıkıştırılabilir gaz ejektörleri incelenirken süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin korunumu ile ideal gaz yasasından yararlanılır. Sıkıştırılabilir akışlarda ki en önemli boyutsuz parametre hız ifadeleri için kullanılan Mach sayısıdır. Genellikle denklemler çözülürken adyabatik (sabit entropi) varsayımı yapılır. Ancak bazı araştırmacılar, deneysel datalardan yararlanarak, sürtünme veya farklı kayıp faktörlerinin de denklemlere eklemişlerdir.

Gaz ejektörlerinin temel mantığı, yakınsak-ıraksak nozul yardımıyla süpersonik hıza ulaştırılmış birincil gaz, vakum etkisi yapılacak olan ikincil gazın olduğu bölüme iletilir. Bu sayede yüksek hızlı ve düşük basınçlı birincil gaz, ikincil gaz üzerinde emme etkisi yaratır. Birçok ejektör sisteminde yakınsak-ıraksak nozulun arkasından karışım bölümü gelir ve bu bölüme, akışın çıkış basıncını düzenlemek için difüzör sistemi eklenir. Bu bölümde genel olarak yakınsak-ıraksak nozulun sıkıştırılabilir akışı hızlandırması ve yavaşlatması; akışın basıncını arttırması ve azaltması üzerine denklemler ve bilgiler verilecektir.

Ses altı ejektör tasarımları yapılırken, akış hesaplama denklemleri ve incelemeleri daha kolay olduğu için tasarlanması daha rahattır. Diğer taraftan, ses üstü akışlarda kullanılacak ejektör tasarımlarında, sıkışabilir akışların denklemleri, sıkışan akıştan kaynaklı, akışın bozulmasına yol açan şok dalgaları, tasarım parametrelerini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda, ejektörün karışım bölgesinde ses üstü olan hızlarda bulunan akışın, difüzöre gelmeden ses altı hızlara ulaştırılması gereklidir. Akış, difüzöre ses altı hızlarda girmez ise, yavaşlayarak basıncı artmaz ve ejektör sıkışında ortam basıncı elde edilemez.

2.2 Korunum Denklemleri ve İdeal Gaz

Herhangi bir şekil üzerinde bir boyutlu sıkıştırılabilir akış için korunum denklemleri ve kontrol hacmi şekil 2.1 de görülmektedir.



Şekil 2.1: Herhangi bir kontrol hacmi örneği [1].

Süreklilik Denklemi:

$$m = \rho_a V_a A_a = \rho_b V_b A_b \quad (2.1)$$

Momentum denklemi:

$$P_a A_a + m_a V_a + \int_{A_a}^{A_b} P dA = P_b A_b + m_b V_b, \quad (2.2)$$

Enerji Denklemi:

$$h_a + \frac{V_a^2}{2} = h_b + \frac{V_b^2}{2} \quad (2.3)$$

İdeal gaz kanunu:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (2.4)$$

2.3 Mach Sayısı

Mach sayısı (M) sıkıştırılabilir, süpersonik, akışlar için çok önemli boyutsuz bir parametredir. Mach sayısı, akış hızının ses ortamdaki ses hızına oranı ile elde edilir.

$$M = \frac{\text{ortamdaki akışın hızı}}{\text{ortamdaki sesin hızı}} = \frac{V}{c} \quad (2.5)$$

Ortamdaki ses hızı havanın sıcaklığı ve koşulları ile orantılıdır:

$$C = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.6)$$

2.4 İdeal Gazın Denklemlere Eklenmesi

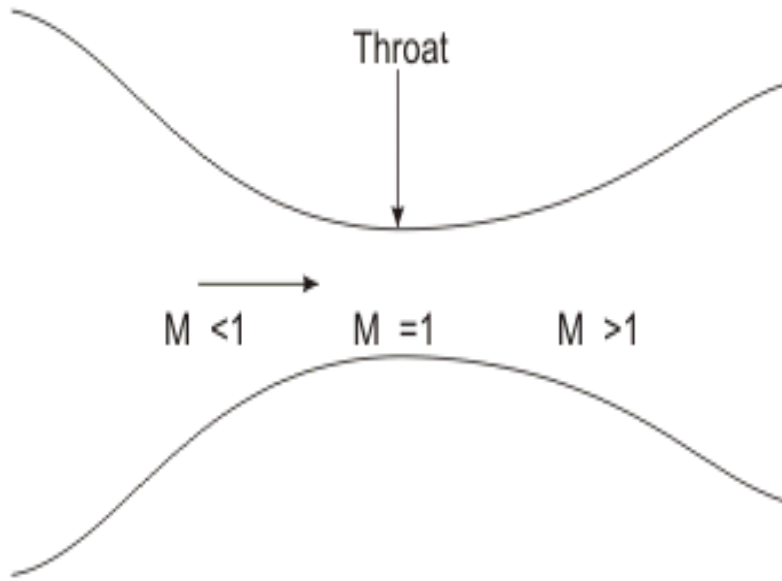
Temel denklemler olan süreklilik, momentum, enerji ve bu denklemlerin eşitlenmesine ek olarak, ortamdaki basınç, sıcaklık ve yoğunluk ile durma noktasında ki bu değerler arasında yazılabilen denklemler (2.7), (2.8), (2.9)'dur. Bu denklemlerdeki “0” ın anlamı durma noktasıdır.

$$\text{Basınç için} \quad : \quad \frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.7)$$

$$\text{Sıcaklık için} \quad : \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (2.8)$$

$$\text{Yoğunluk için} \quad : \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.9)$$

P_e ve P_b nozulun çıkışındaki ve arkasındaki statik basıncı gösterir. Nozulun arkasındaki basıncın yani P_b basıncının değişimi, akışın nozulun boğazındaki durumunu etkiler. Bu durumlara göre ses üstü veya ses altı akışa karar verilir. Ses üstü akışlarda kritik sayı denilen parametreler vardır.



Şekil 2.2: Yakınsak ıraksak nozul [14].

Nozuldaki arka basınç (P_b), nozul çıkış basıncından (P_e) yeterince küçük ise, akış boğazda $M = 1$ a ulaşır. Yakınsak-ıraksak nozul tasarımında boğaz $M = 1$ i elde etmek gereklidir. Bu şartlara kritik şartlar denilir. Ortaya çıkan kritik arka basınç P_* olarak gösterilir. P_0 da nozul giriş basıncı olarak alınır ve basınç oranları ve denklemleri ile nozul tasarımı gerçekleştirilir. Bu şartları düşünerek, $M=1$ için (2.7), (2.8), (2.9) denklemlerini kullanırsak;

$$\frac{P_*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.10)$$

$$\frac{T_*}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1} \quad (2.10)$$

$$\frac{\rho_*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.11)$$

Kritik şartlarda ki kütle akışı:

$$\dot{m} = \rho_* V_* A_* \quad (2.12)$$

$A_* = A_t$ olduğu yerde;

$$\dot{m} = \frac{A_t P_0}{T_0} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.13)$$

2.5 Nozul

Nozullar, ilk keşfedildikleri dönemlerde, sıvıların yönlendirilmesi, hızlandırılması veya yavaşlatılması üzerine kullanılmışlardır. Teknojik araştırmaların artması ile gaz üzerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Son yüzyılda, nozullar, birçok roket ve motor sistemlerinde, ses altı ve ses üstü akışlarda kullanılmışlardır. Ejektörlerde de, ses altı ve ses üstü hızlar da kullanımlarına göre farklı nozullar, ejektör tasarımlarına eklenmiştir.

Adyabatik akışlar için momentum denklemlerini farklı şekillerde yazarsak şu denklemleri elde ederiz:

$$\frac{dP}{\rho} + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0 \quad (2.14)$$

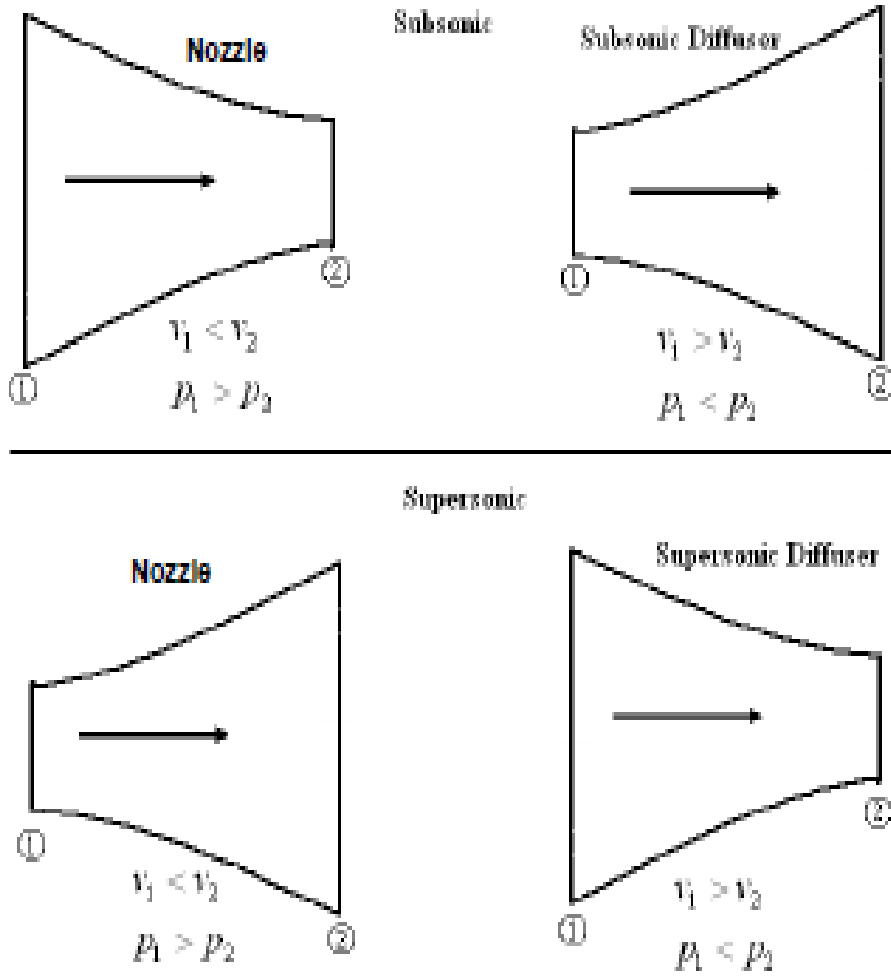
$$\rho VA = \text{constant}$$

Daha önce ki denklemlerden yararlanarak, akış alanıyla ilgili şu denklemi elde ederiz:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V}(1 - M^2) \quad (2.15)$$

Yukarıdaki analitik denklemi göz önüne alırsak, $M < 1$ için, herhangi bir alan değişiminde hız ters oranda değişecektir. Bu sebeple, subsonik akışlarda, akışı hızlandırmak için alanı küçülten nozula (Yakınsak nozul) ihtiyaç vardır. Aynı zamanda, $M > 1$ durumunda ise, alan değişimi, aynı oranda hız ve basınç değişimine sebep olur. Başka bir ifade ile süpersonik akışları hızlandırmak için, alanı artan nozula ihtiyaç vardır.

Şekil 2.3'deki örneklerde de görüldüğü gibi ses altı hızlarda, yakınsak nozula giren akışın hızı artarak, basıncı düşmektedir. Aynı zamanda, ıraksak nozula giren akışta ise akışın hızı yavaşlarken, basıncı artmaktadır. Şekil 2.3'deki ses üstü akışı incelersek, ıraksak nozula giren akışın hızı artarak, basıncı düşmektedir. Bunun yanı sıra, yakınsak nozula giren akışın hızı azalarak, basıncı artmaktadır.



Şekil 2.3 : Subsonik ve süpersonik akışlar için nozul ve difüzör [1].

Süpersonik bir akışı hızlandırmak için öncelikle, yakınsak nozul kullanılarak, hızın boğazda teorik olarak $M=1$ 'e ulaşması sağlanır. Boğazın hemen arkasına ıraksak nozul eklenirse, akışta hızlanma elde edilir. Bu sebepten dolayı, tasarlanacak olan ejektör sisteminde yakınsak-ıraksak nozul modeli kullanılacaktır.

2.5.5 Ejektör için nozul tasarımı

Tasarımı yapacağımız ejektör, yüksek irtifa roket test sistemlerinde kullanılacağı için ses üstü hızlardaki denklemler ele alınmıştır. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi, gaz ejektörlerinin nozul tasarımı yakınsak ıraksak nozul kullanılarak, nozulun çıkış kısmında süpersonik akış oluşturulabilir. Arka basınç, çıkış basıncından az olduğu sürece akış nozuldan rahatlıkla ayrılır.

Çıkış Mach sayısı, A_e/A_* 'a bağlıdır. Korunum kanunlarından yola çıkarak ve (2.6), (2.8), (2.9) ve (2.13) denklemlerini kullanarak, A_e/A_* ve Mach sayısına bağlı şu denklem bulunur.

$$\frac{A_e}{A_*} = \frac{1}{M} \left(\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2}} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.16)$$

Kritik durumla ilgili $A_* = A_t$ 'dır. (2.7), (2.8), (2.9) ve yukarıda denklemi kullanarak, adyabatik koşullar altında, nozul çıkış değeleri olan T_e , P_e , A_e ve ρ_e hesaplanır.

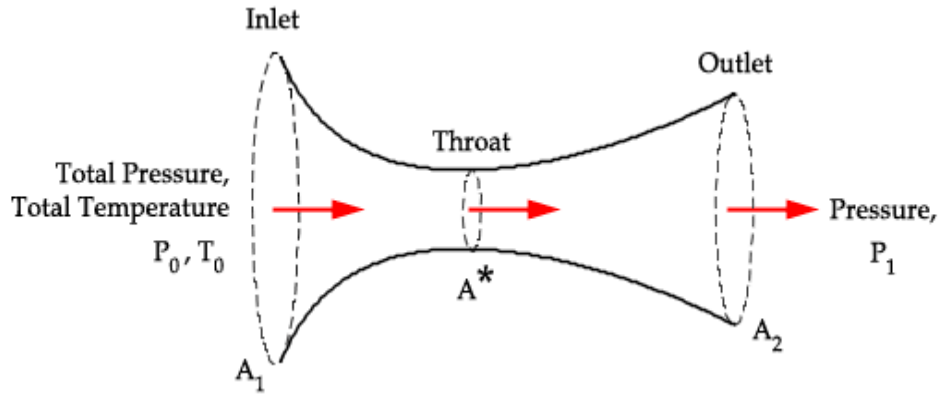
Gaz ejektörü tasarlamının ilk kısmı nozul tasarımıdır. Bu bölümde temel aerodinamik denklemlerini kullanarak süpersonik akışlar için nasıl bir nozul kullanılması gerektiğine karar verilmiş ve tasarım denklemleri incelenmiştir.

3. GAZ EJEKTÖRÜNÜN ANALİTİK MODELİ VE BÖLÜMLERİ

3.1 Giriş

Bu bölümde ejektör tasarımı için gerekli olan süpersonik giriş nozulu, karışım bölümü ve difüzör kısımlarının matematiksel denklemleri hakkında bilgi verilecektir. Karışım bölgesindeki hava akışının durumu ejektör tasarımları için en önemli faktörlerden birisidir. Ejektörlerde en çok sabit basınçlı karışım bölgesi ve sabit alanlı karışım bölgesi olmak üzere iki farklı karışım bölgesi kullanılır [1]. Bu bölgede, birbirinden tamamiyle farklı moleküler yapısı, moleküler ağırlığı ve termodinamik özellikleri olan birincil ve ikincil akışların karıştığı bölüm olduğu için ejektörün en önemli bölümlerinden birisidir. Ayrıca, bu bölümde sabit basınçlı karışım bölgesi ve sabit alanlı karışım bölgelerinin denklemleri ve kullanımları hakkında detaylı bilgi verilecektir.

Bir önceki bölümde nozul olarak yakınsak iraksak nozul kullanacağımız karar vermiş ve sebepleriyle açıklamıştık. Kullanacağımız nozul giriş bölümü, boğaz ve çıkış bölümünden oluşmaktadır.



Şekil 3.1 : Nozul giriş, boğaz ve çıkış kısımları [15].

Ayrıca, bir önceki bölümde yazdığımız ve hesapladığımız bütün denklemler, geri dönüştürülebilir ve adyabatik şartlar için yazılmıştır. Ancak, gerçek hayatta oluşacak entalpi kayıplarından dolayı oluşacak bir kat sayı, η_n , hesaplarız.

Nozul un yakınsak kısmını izentropik olarak kabul edebiliriz. İkinci bölümde kullanmış olduğumuz denklemleri kullanarak, kütle akışını şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$m_p = \frac{A_t P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma_p}{R_p} \left(\frac{2}{\gamma_p + 1}\right)^{\frac{\gamma_p + 1}{\gamma_p - 1}}} \quad (3.1)$$

Nozul ıraksak kısmı için ise şu formülü yazabiliriz [1]:

$$\eta_n = \frac{h_{p0} - h_{p1}}{h_{p0} - h_{p1s}} \quad (3.2)$$

Bu denklemdeki h_{p0} durma noktasındaki entalpi, h_{p1} nozul çıkışındaki gerçek entalpi h_{p1s} ise izentropik şartlar altındaki entalpi değeridir. Buradan yola çıkarak entalpiyle ilgili şu denklemi yazabiliriz:

$$h_{p0} = h_{p1} + \frac{V_{p1}^2}{2} \quad (3.3)$$

$h = c_p T$ ve 3.2 deki denklem ile, şu denklemi elde ederiz:

$$\frac{T_{p1s}}{T_{p0}} = 1 - \frac{1}{\eta_n} \left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p0}}\right) \quad (3.4)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (3.5)$$

Adyabatik hesaplamalardan elde edilen formüller ve (3.4) ile (3.5) denklemlerinden yararlanarak nozuldaki basınç oranlarıyla ilgili şu denklem elde edilir:

$$\frac{P_{p1}}{P_{p0}} = \left(1 - \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_n \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2\right)}\right)^{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1}} \quad (3.6)$$

Kütlenin korunumunu düşünürsek, girişteki akış miktarı ile boğazdaki miktar aynıdır.” $m_{p1} = m_{p*}$ " Buradan yola çıkarak;

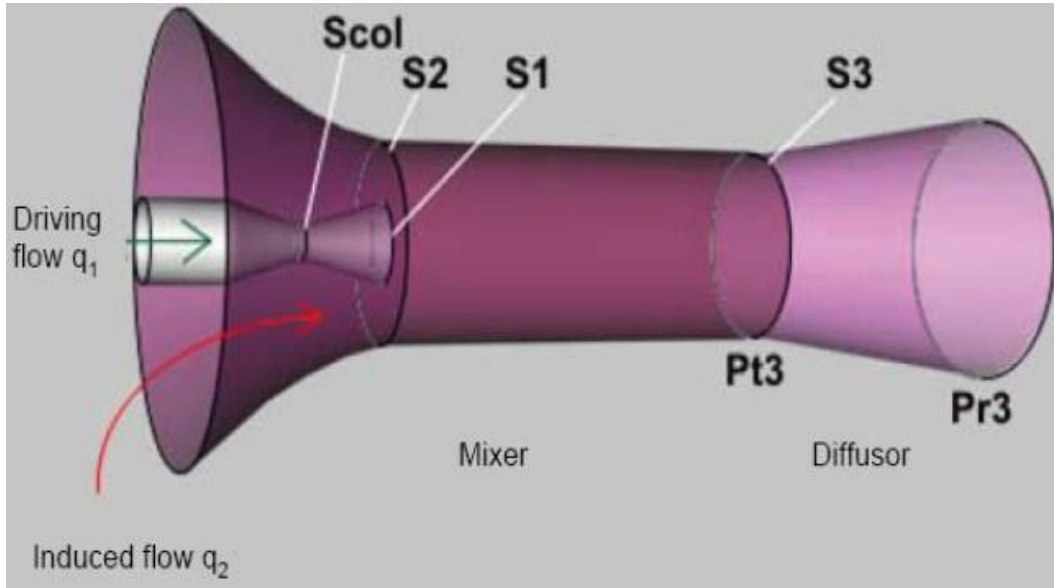
$$\frac{A_{p1}}{A_t} = \frac{P_{p*}}{P_{p1}} \frac{1}{M_{p1}} \left(\frac{T_{p1}}{T_{p*}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Bütün bu denklemlerden yararlanarak:

$$\frac{A_{p1}}{A_t} = \frac{1}{M_{p1}} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \left(1 - \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_n \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2\right)}\right)^{\frac{-(\gamma_p + 1)}{2(\gamma_p - 1)}} \quad (3.8)$$

3.2 Karışım Modelleri

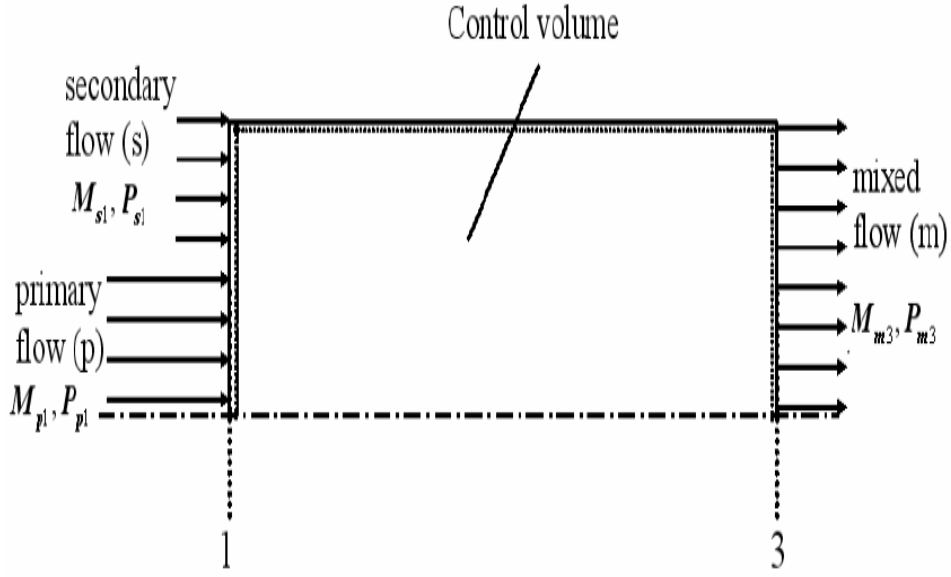
Ejektörün içerisindeki, yakınsak-ıraksak nozulun çıkışında bulunacak olan birincil ve ikincil akışların sabit bir alan içerisinde karıştığı bölümdür. Nozul çıkışında birincil akış sayesinde, giriş bölgesinden çekilen hava karışım bölgesinin içerisinde karışır ve düzenli hale gelir. Ejektör performansında çok önemli yeri olan karışım bölgesi Şekil 3.2 de gösterilmiştir. Karışım bölgesinin fazla kısa olması, gelen akışın ses altına düşmeden difüzöre ulaşmasını sağlar ve gelen akışın basıncı ejektör dışarısına çıkmadan düşürülemez. Karışım bölgesinin çok uzun olması ise, üretim esnasında maliyetleri arttıracak ve ejektörün kullanım alanlarını sınırlayacaktır. Bu sebeple, optimum karışım bölgesi uzunluğu kullanılmalıdır.



Şekil 3.2 : Ejektör örneği [6].

Ejektörün boyutlarını hesaplamadan önce, elimizde birincil ve ikincil akışın basınçları, P_1, P_2 bunlarla alakalı, sıcaklıkları, T_1, T_2 , karışım oranları q_2/q_1 , Difüzör çıkış basıncı olan P_{r3} bulunur ve bunlardan yararlanarak ejektörün boyutlarını hesaplayabiliriz. Şekil 3.2 de sabit alanlı bir karışım modeli görülmektedir.

Ayrıca sabit basınçlı karışım bölgeleride bulunmaktadır. Ancak, biz bu çalışmamızda sabit alanlı karışım bölgesini kullanacağız. Sabit alanlı karışım bölgeleri için kütle, momentum ve enerjinin korunum denklemlerini kullanarak ihtiyacımız olan formülleri bulabiliriz.



Şekil 3.3: Ejektör kontrol hacmi [1].

Şekil 3.3'deki gibi bir kontrol hacmi aldıktan sonra, birincil ve ikincil akışların 3 numaralı çıkışta tamamen karıştığını, akışların ideal gaz olduğu, 1 ve 3 numaralı duvarlar arasının adyabatik olduğu varsayılarak yapılan hesaplamalarla şu denklemler elde edilir.

$$\frac{P_{m3}}{P_{p1}} = \left(\frac{T_{m0}}{T_{p0}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R_m}{R_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{A_{p1}}{A_{m3}} \frac{f_2(\gamma_p M_{p1})}{f_2(\gamma_m M_{m3})} (1 + \omega) \quad (3.8)$$

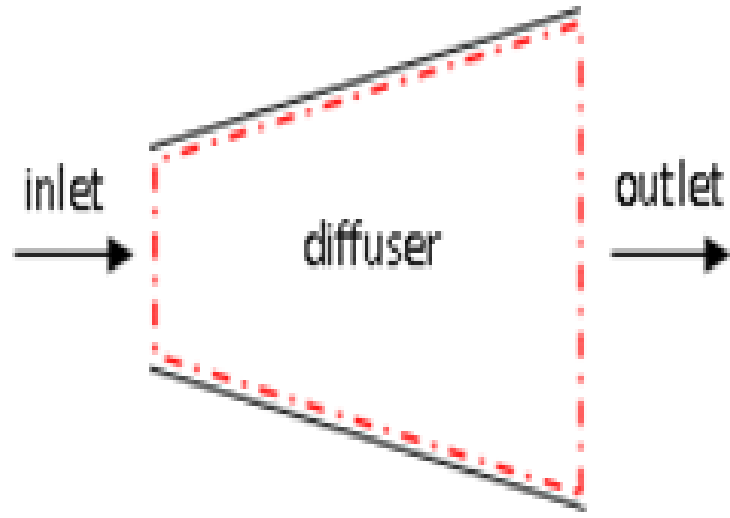
$$\frac{T_{m0}}{T_{p0}} = \frac{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{R_s T_{s0}}{R_p T_{p0}} \omega}{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{R_s}{R_p} \omega} \quad (3.9)$$

$$M_{m3} = \sqrt{\frac{-(\alpha^2 - 2) \pm \sqrt{(\alpha^2 - 2)^2 + 2 \left(\frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m} \right) (\alpha^2 - \frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1})}}{(\gamma_m - 1) \left(\alpha^2 - \frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1} \right)}} \quad (3.10)$$

Mach sayısı 3.10 numaralı denklemden, statik basınç ve sıcaklık 3.8 ve 3.9 numaralı denklemler yardımıyla hesaplanabilir [1].

3.3 Difüzör Kısımı

Difüzör kısmı, karışım bölgesinin arkasına eklenerek, statik basıncı düzenler ve akışın dışarıya açılmasını sağlar. Karışım bölgesinin arkasından difüzöre akış ses altı bir hızla girer ve yavaşlayarak dışarıya çıkar. Akışın basıncı arttırılarak hızı yavaşlatılır. Ejektörün çıkışı atmosfere açılacağı için, difüzör akışın basıncını arttırarak atmosferik basınca ulaştırarak, akışı ortama atar.

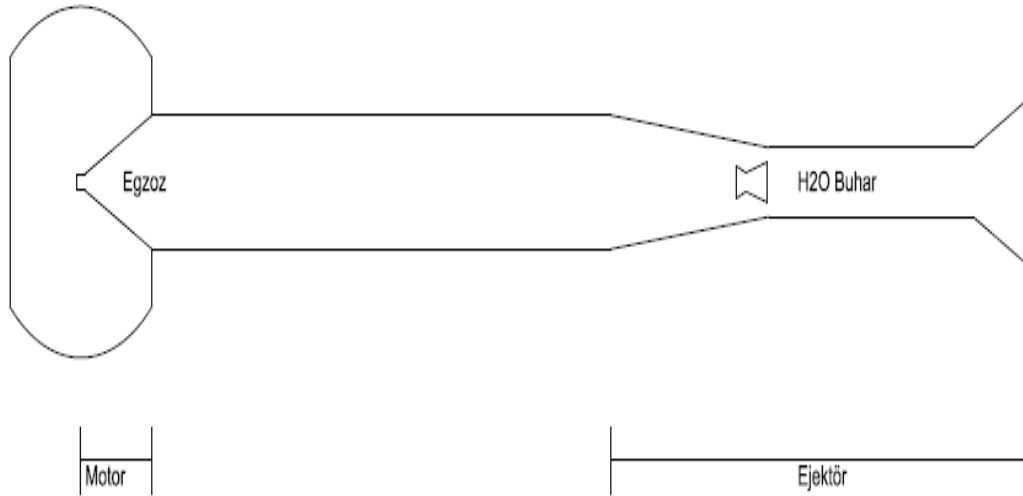


Şekil 3.4: Difüzör örneği [19].

4. TASARIM

4.1 Giriş

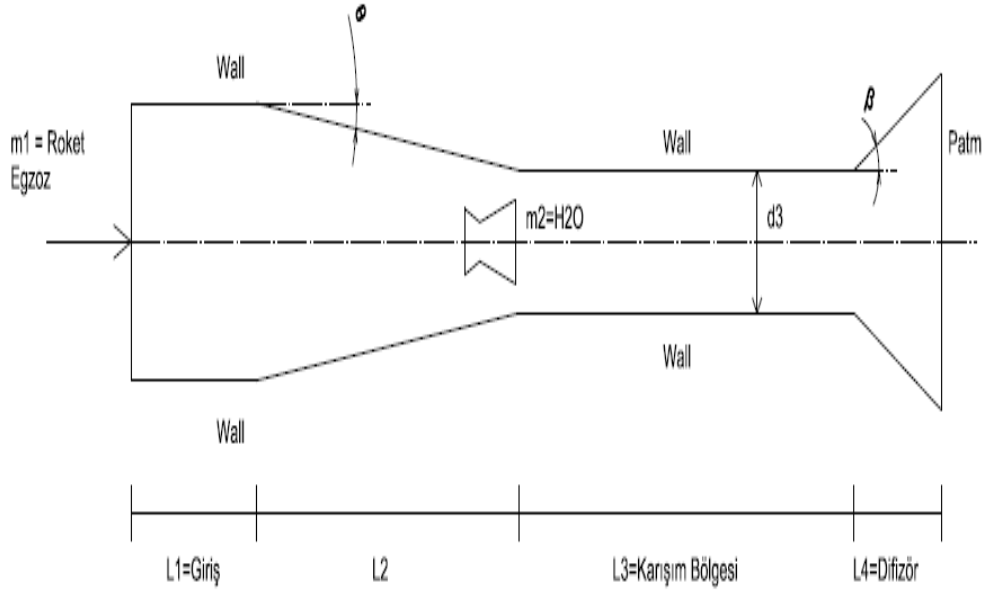
Deney düzeneği sayesinde, yüksek irtifa roketinin motor egzozundan çıkan hava, ejektör yardımıyla atmosferik koşullardaki havaya çıkarılmıştır. Tasarımı gerçekleştirirken, ilk olarak gerekli olan isterler incelenmiş, arkasından temel analitik ve aerodinamik denklemlerin yararlanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda literatürde yapılmış olan tasarımlarda ele alınarak tasarım çalışmalarına başlanmıştır. İki boyutlu tasarımın gerçekleştirilmesinin arkasından, sınır koşullarıyla analiz yapılarak, istenilen değerlere ulaşılması hedeflenmiştir. Şekil 4.1 de motorun ekzozundan çıkan hava ve ejektör kısmı görülmektedir.



Şekil 4.1: Test düzeneği.

m_2 Girişinden araştırmalarımız sonucunda bulmuş olduğumuz buhar kazanından 0,5 bar ile 20 bar arasında su buharı gönderilebileceği görülmüştür. Nozulun boğaz kısmında 1 Mach a ulaşan hava, ıraksak nozulda genişleyerek, ses üstü ulaşır, bu sayede nozul çıkış basıncını düşürür ve vakum etkisi yaratır.

Nozulun üretmiş olduğu vakum sayesinde, motorun çıkışındaki havanın çekilmesi sağlanır. Şekil 4.2 de birincil ve ikincil akışları yani m_1 ve m_2 girişleri; ayrıca, ejektörün detaylı kısımları görülebilmektedir. Bunların yanı sıra, ejektörün açıları ve boyutlandırması hakkında bilgi şekil 4.2 de görülebilir.



Şekil 4.2: Ejektör çizimi.

Ses üstü ejektör tasarımlarında analiz ve deneysel değerlendirmeler pompalayan ve pompalamayan diye iki bölüme ayrılmaktadır. Pompalamayan sistemlerde, roket egzoz gazının olduğu yeren hiçbir şey gönderilmez, m_1 girişinin olduğu yer duvarmış gibi düşünülerek m_2 girişinden akış gönderilir ve m_1 girişinde ne kadarlık bir vakum oluşturduğu incelenir. m_1 Girişinde vakum elde edildikten sonra ise, pompalayan sistem ile analiz veya test yapılır. Pompalayan sistemden kasıt ise, m_1 girişinde belirli bir basınçta gaz bulunur, yani roketin egzoz gazı çalışmaya başlar. Pompalamayan sistemde elde edilen vakumun, düşük basınçta da vakum elde etmesi planlanmaktadır. Test veya analiz sonuçları iki durum içinde incelenerek, vakum durumları karşılaştırılır ve tasarım hataları varsa düzeltilir.

4.2 Boyutlandırma

4.2.1 Nozul

Yukarıdaki bölümlerde yapmış olduğumuz hesaplamardan elde ettiğimiz sıkıştırılabilir akış formülünü kullanarak, yakınsak ıraksak nozulun boğazının boyutunu hesaplayabiliriz.

$$\dot{m} = A^* P_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4.1)$$

Yapılmış olan araştırmaya göre $\dot{m}_1$ den kütle çekebilmek için, $\dot{m}_2$ den 0.1 kg/s lik kütle gönderir ve hesaplarımızı yaparsak:

$$P_0 = 14 \text{ bar} \quad (4.2)$$

$$\gamma = 1.33 \text{ Su buharı için} \quad (4.3)$$

$$R = 8314/18 = 462 \text{ J/kgK su buharı için} \quad (4.4)$$

$$T_0 = 800 + 273 = 1073 \text{ K} \quad (4.5)$$

Bu denklemin hesaplanmasının sonucunda, A_* ın yarıçapı 4.88 mm çıkmaktadır. Yapılacak olan boyutlandırmada da 5 mm olarak alınmıştır.

$$d_t = 5 \text{ mm} \quad (4.6)$$

4.2.1.1 Nozulun alanları

Su buharı için $\gamma = 1.33$ 'dür. EKA da yer alan, $\gamma = 1.3$ için izentropik akış tablosunu göz önüne alırsak, $M = 1$ iken $P_t/P_0 = 0,545$, $T_t/T_0 = 0,869$ 'dır.

$$P_0 = 14 \text{ bar} \quad (4.6)$$

$$P_t = 1400000 \times 0,545 = 756000 \text{ pa'dır.} \quad (4.7)$$

$$T_0 = 1073 \text{ K} \quad (4.8)$$

$$T_t = 1073 \times 0,869 = 933 \text{ K'dir.} \quad (4.9)$$

Nozula giriş Mach hızı 0,15 olması durumunda izentropik akış taplosuna göre $A/A_* = 4$ 'dür. A_* ın yarıçapından alana geçerek oranlar yardımıyla,

$$A^* = 4.88^2 \times \pi = 74 \text{ m}^2 \quad (4.10)$$

$$A_i = 4 \times 74.7 = 299 \quad (4.11)$$

$$d_i = 9.8 \sim 10 \text{ mm} \quad (4.12)$$

A_i Giriş alanı bulunmuş ve bu alanın yarıçağı 9.8 mm olarak hesaplanmıştır. Boyutlandırmada ise 10 mm olarak alınmıştır.

İzentropik akış taplosuna geri dönüp, nozul çıkışında 6 kPa civarında bir basınç elde etmek için gerekli olan P_e/P_t değeri incelendiğinde, yaklaşık olarak 0,008 bulunmaktadır.

$$P_e = 756000 \times 0,008 = 6048 \text{ Pa'dır.} \quad (4.13)$$

Tabloyu P_e/P_t oranını 0,008 olacak şekilde incelersek, Mach sayısını 3,6 civarında elde ederiz. Bu bilgilerden yararlanarak, alanlar hesabına geçecek olursak. Su buharı için izentropik akış taplosunda $M=3,6$ yı ele alırsak, $A/A^* = 9$ olarak alınır. A^* ın yarıçapından alana geçerek oranlar yardımıyla,

$$A^* = 4.88^2 \times \pi = 74.7 \text{ m}^2 \quad (4.14)$$

$$A_e = 9 \times 74.7 = 672 \text{ m}^2 \quad (4.15)$$

$$d_e = 14.5 \sim 14 \text{ mm} \quad (4.16)$$

İraksak nozulun çıkışı bu hesaplama göre $d_e = 14$ mm olarak bulunmuştur. Nozulun x eksenindeki uzunluklarına gelecek olursak, yakınsak nozulun açısı 10 derece alınmıştır. İraksak nozul da ise, akım ayrılmalarını minimuma düşürebilmek için, 4 derecelik bir açı ile hesaplamalar yapılmıştır.

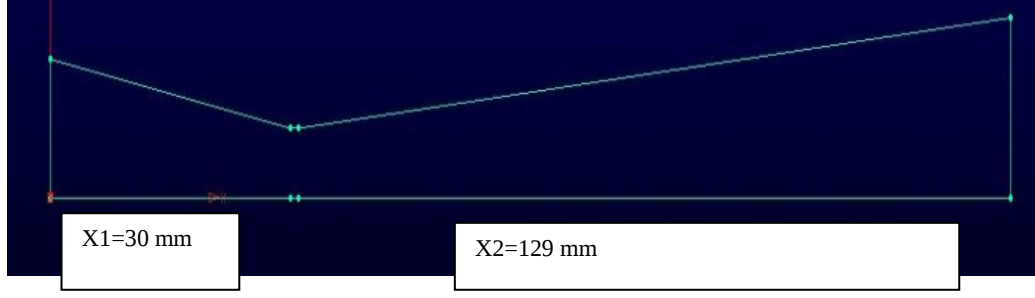
Bu hesaplamalara göre:

$$X1 = (d_i - d_t) / \tan 10 = 5 / \tan 10 = 28.3 \sim 30 \text{ mm} \quad (4.17)$$

Boğaz kısmının analiz esnasında daha iyi çözümlenebilmesi için, boğazı 1 mm olarak çizilmiştir.

$$X2 = (d_e - d_t) / \tan 4 = 9 / \tan 4 = 128.7 \sim 129 \text{ mm} \quad (4.18)$$

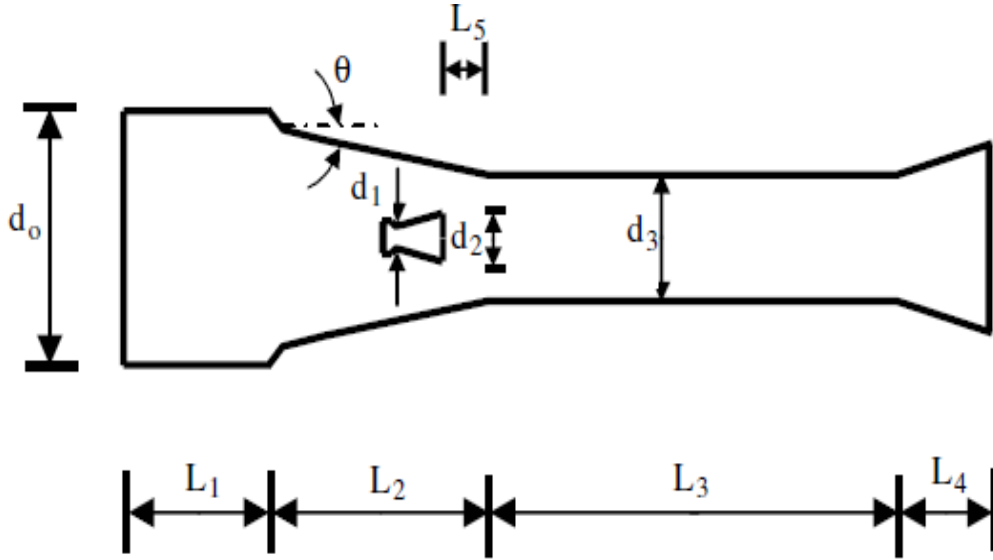
Denklem 4.17 ve 4.18'in sonuçlarına göre, ejektörün nozul kısmının aksenal uzunlukları hesaplanmış ve şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Nozul çizimi.

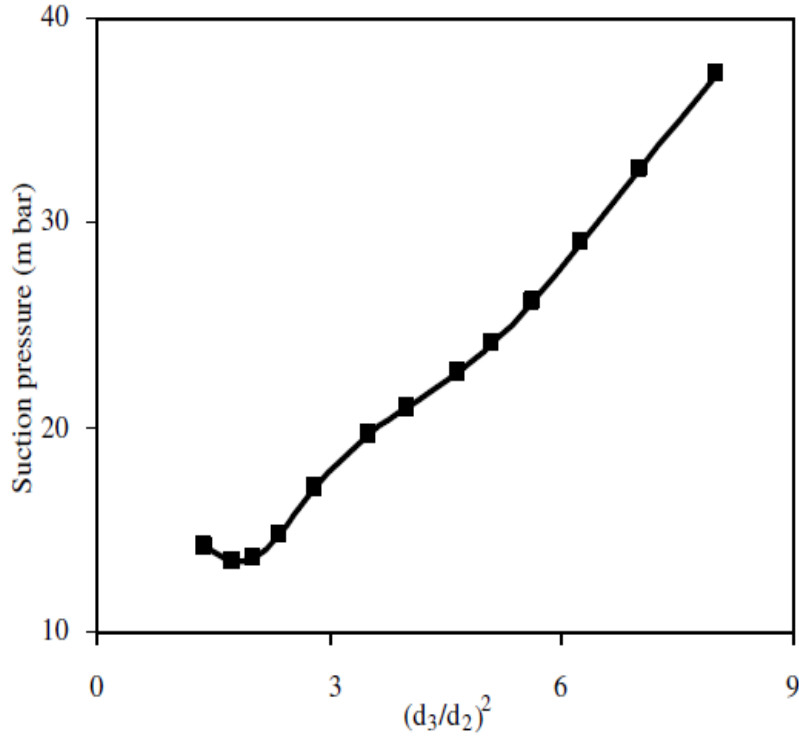
4.2.1.2 Karışım bölgesi ve daralma bölgesi

[17] nolu referansta geçen makaleyi incelediğimizde, yapmış oldukları optimizasyon sayesinde elimizdeki bilgilerle karışım bölgesinin boyutları hesaplanabilir. Karışım bölgesinde ki bulunması gereken daralma açıcı, belirli bir noktaya kadar düşük basınçtan gaz vakum yapmamızı sağlarken, bir noktadan sonra bu basınç çok hızlı bir şekilde artmakta ve vakum özelliğini kaybetmektedir. Makalede verilmiş olan boyutlandırma şu şekildedir:



Şekil 4.4: Makaledeki boyutlar [17].

Bu boyutlandırmalar bağlı olarak $(\frac{d_2}{d_3})^2$ ile vakum yapılan akışın basıncı arasındaki oran şu şekildedir.



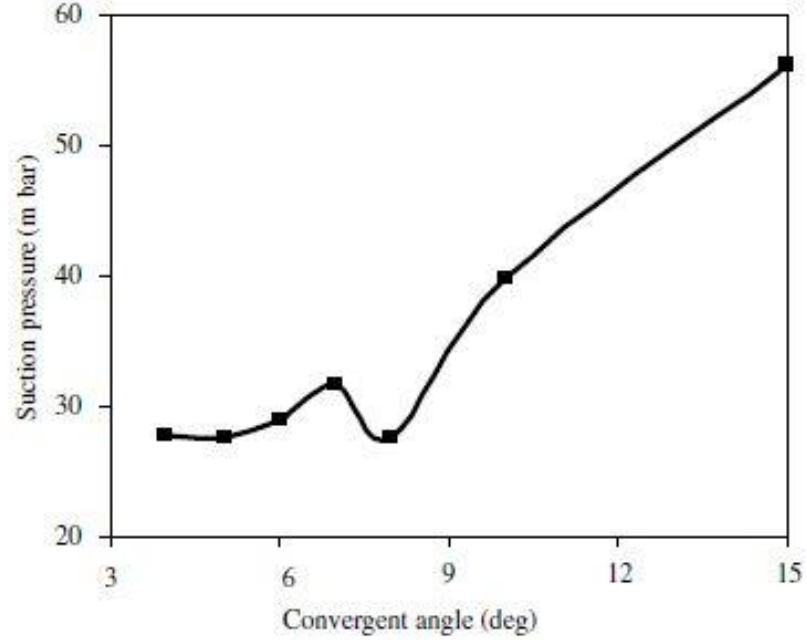
Şekil 4.5: Vakum yapılan basınç ile karışım bölge ve nozul çıkış alanlarının oranının karesi [17].

Daha düşük basınçlarda vakum yapabilmek için, tabloya göre $(\frac{d_2}{d_3})^2 = 2.5$ olarak alınmıştır.

$$d_2 = d_e = 14 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_m = \sqrt{14^2 \times 2.5} = 22 \text{ mm}$$

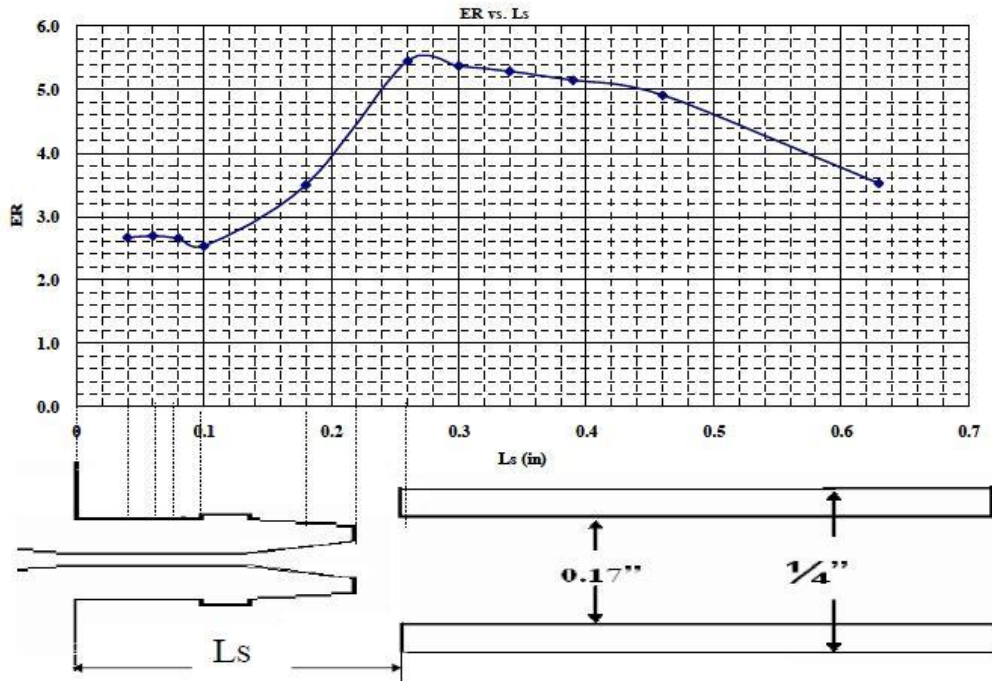
Birincil akışın geleceği bölümden karışım bölgesinin olduğu yere doğru devam eden daralma açısı incelendiğinde; [17] nolu referansda geçen makalenin deneysel sonuçlarını incelediğimizde, vakum yapılacak basınç ve daralma açısının değişimleri şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Daralma açısı ve vakum basıncı [17].

Düşük basınçta vakum yapabilmek için, daralma açısını $\theta=5$ derece alınmıştır.

[1] nolu makalenin araştırma verileri incelendiğinde Lgap olarak adlandırılan ve nozulun bitimi ve karışım bölgesinin başlangıcı arasındaki mesafe hakkında bize bilgi veren grafik Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Lgap ve vakum yapılan havanın grafiği [17].

Yukarıdaki grafikte ER olarak belirtilen bölüm birincil akışın debilerinin ikincil akışa oranlarını vermektedir. Diğer bir söylemle, ER ın artması daha fazla vakum yapmamızı sağlar, grafiği incelediğimizde, 0.17 bir karışım bölgesi yarıçapının en verimli olduğu aralık, Lgap ın 0.15 ile 0.3 arasında olduğu görülmektedir. Bu grafiğe dayanarak:

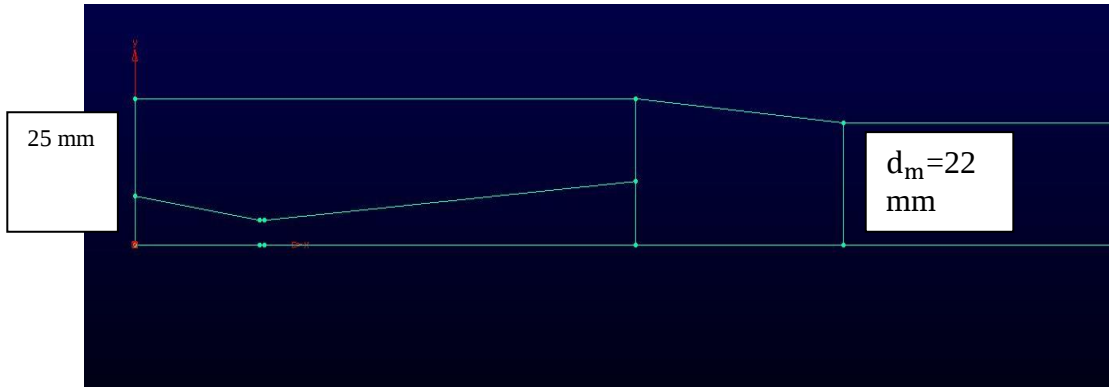
$$\frac{L_{gap}}{d_m} = 1.3 \text{ alınmıştır.}$$

$$L_{gap} = d_m \times 1.3 = 22 \times 1.3 = 28.6 \sim 30 \text{ mm alınmıştır.}$$

Yukarıda belirtmiş olduğumuz yakınsama açısını dikkate alarak tasarıma devam edecek olursak $\tan 5^\circ$ 'den yararlanarak ikincil akışın giriş yarıçapı bulunabilir.

$$Y = 30 \times \tan 5^\circ = 2.9 \sim 3 \text{ mm}$$

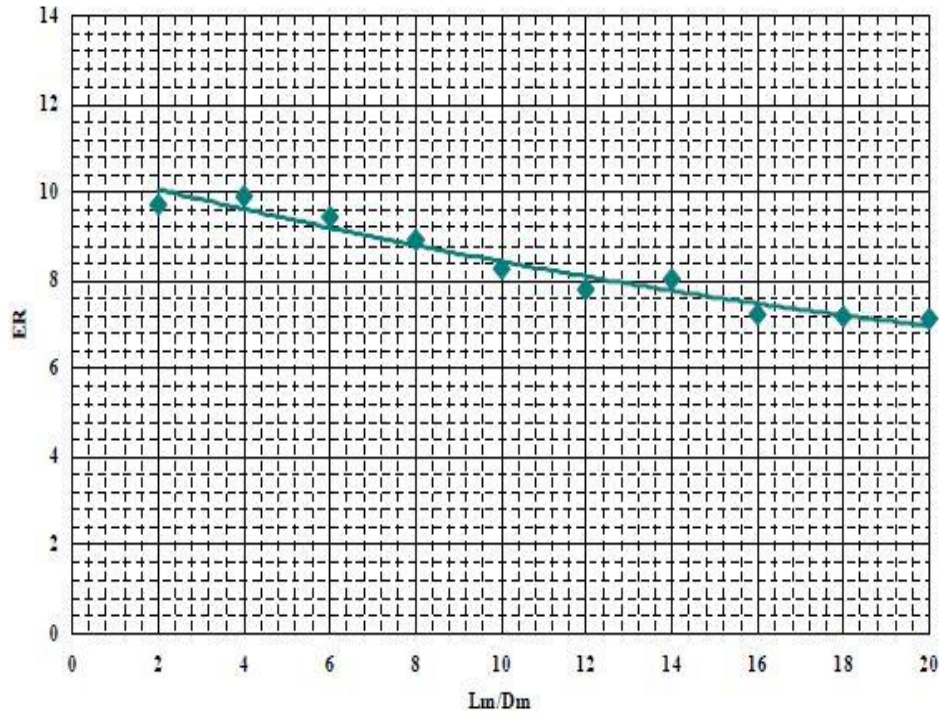
Karışım bölgesinin üzerine 3 mm ekleyerek ikincil akışın girdiği alanın yarıçapı elde edilir o da 25 mm olur. Sonuç olarak, giriş bölgesinin yarıçapı öncelikle 25 mm ve karışım bölgesinin yarıçapı 22 mm'dir.



Şekil 4.8: Yarıçaplar.

Karışım bölgesinin uzunluğuna geldiğimiz zaman ise, yeterli uzunluğa sahip olursa, içerisinde oluşan şokların arkasından ses altı bir hıza ulaşarak akışı difüzöre aktarır. Belirli bir uzunluğun üzerinde birincil akışta azalma gözlenirse bile çok düşük seviyelerdedir, bu sebeple akışın karakteristiğini daha iyi görebilmek için, karışım bölgesi normalin üzerinde tutulmuştur.

[1] nolu makalenin araştırma verileri incelendiğinde $\frac{L_m}{d_m}$ oranı ve ikincil akışın debisinde ki azalma ER cinsinden gözükmeştir. Grafiğe göre oranı 20 civarında alsak da, vakum yapılan debi miktarında çok ufak oynamalar gözükmeştir.

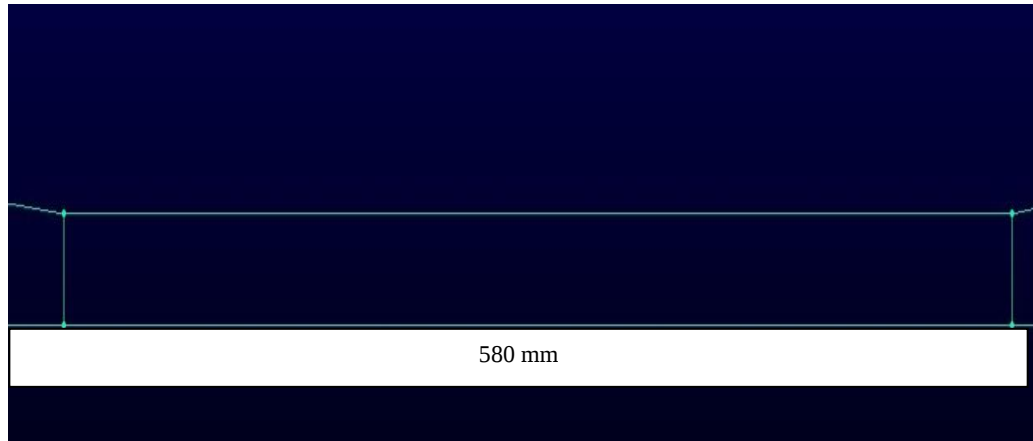


Şekil 4.9: Karışım bölgesi [1].

Tasarım sonuçlarının incelenmesi açısından daha uygun olacağı için;

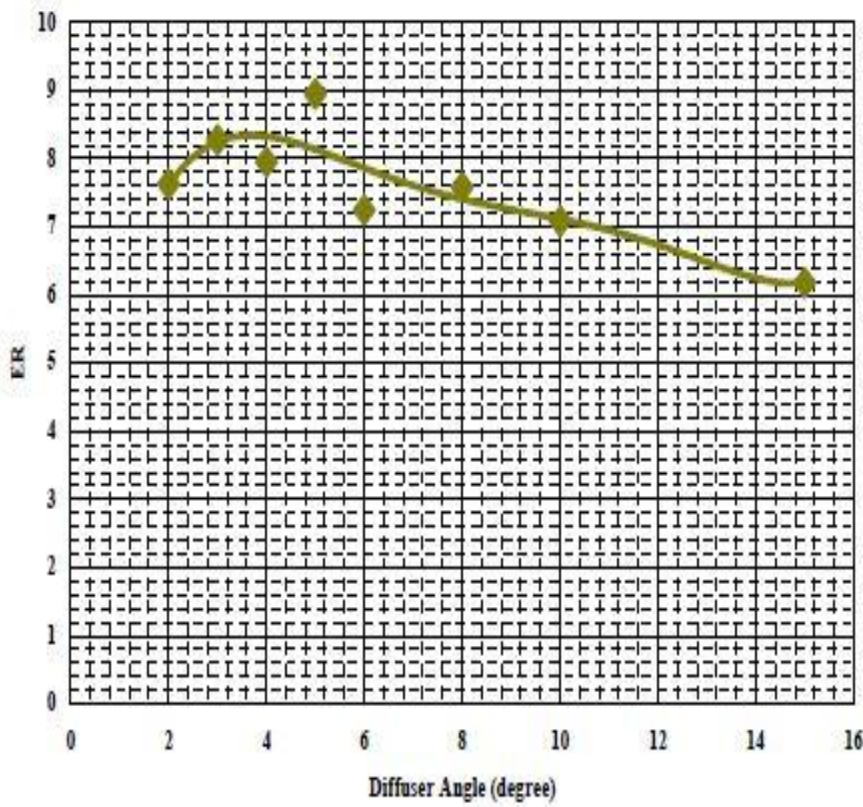
$$\frac{L_m}{d_m} = 26 \text{ alınmıştır,}$$

Bu sayede Karışım bölgesinin uzunluğu : $L_m = 580 \text{ mm}$ olmuştur.



Şekil 4.10: Karışım bölgesinin uzunluğu.

Ejektörün son kısmı olan difüzör bölümüne geldiğimiz zaman ise, [1] nolu makalenin çalışmalarına göre, daha fazla iki verimi sağlamak için 3 derecelik bir açıyla genişleyerek ilerlemesi gereklidir. Aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi, belirli bir açıya kadar ikincil akışdaki vakumun arttığını, fakat bir açıdan sonra azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, çok dik olabilecek difüzör açılarında oluşan akım ayrılmalarıdır. Çok düşük açılarda ise, difüzör kısmı uzayacağı için maliyeti arttıracaktır. Daha fazla ikincil akış çekebilmek için difüzör açısı, aşağıdaki grafikten yararlanarak, 3 derece olarak alınmıştır.

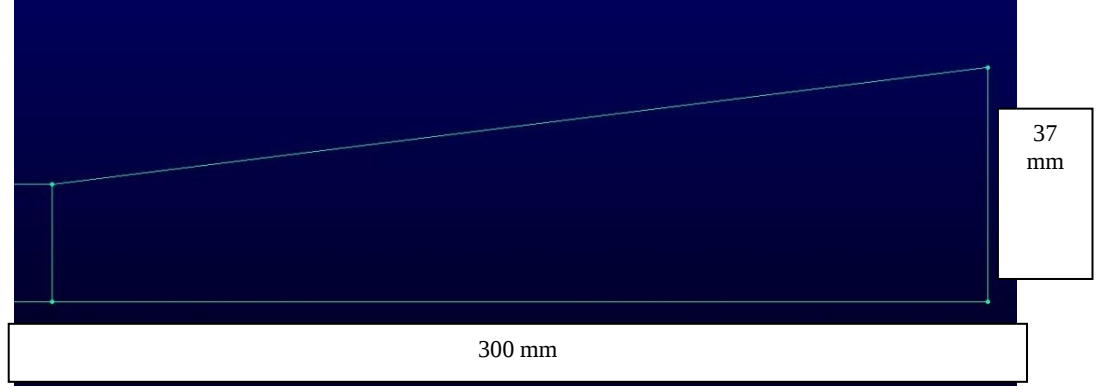


Şekil 4.11: Difüzör açısı [1].

B=3° için,

Difüzörün çıkış çapı: $300 \times \tan 3 = 15.5 \sim 15 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

Karışım bölgesinin yarıçapı 22 mm olarak hesaplanmıştır. Difüzör çıkışının yarıçapı da bunun 15 mm üzerindedir, yani difüzör çıkış yarıçapı 37 mm dir. Şekil 4.12’de difüzörün çizimi ve boyutları görülmektedir.



Şekil 4.12: Difüzörün boyutları.

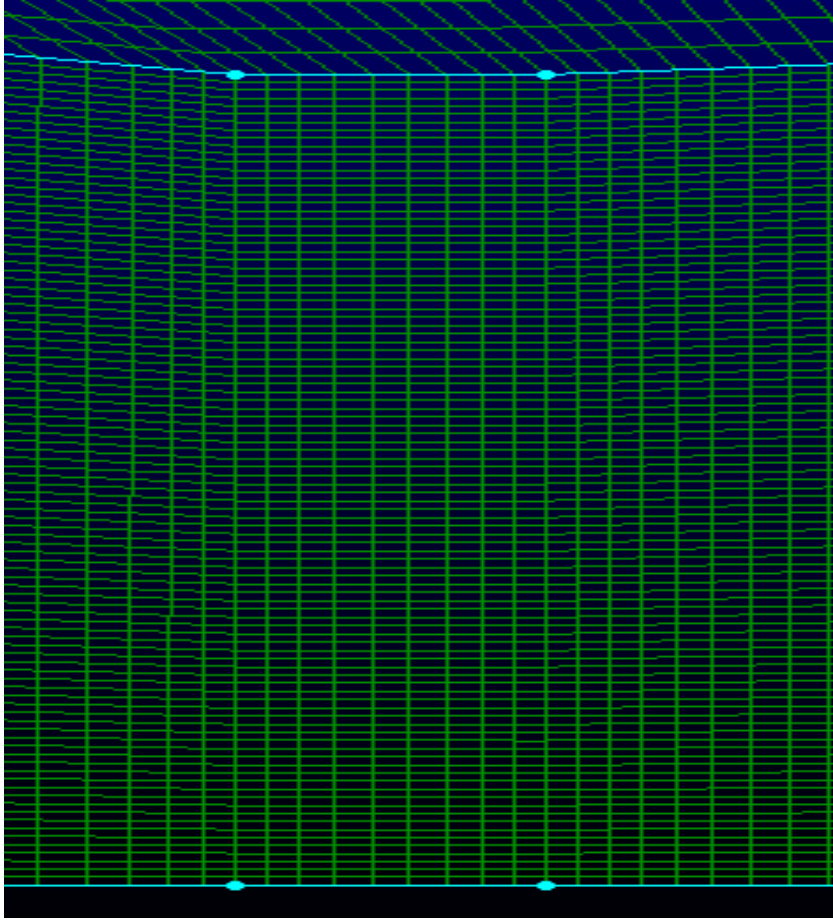
4.2.2 Hesaplama ağının oluşturulması

Akışkanlar mekaniğiyle ilgili denklemleri kullanarak doğru sonuçlara ulaşılması planlanmaktadır. Akışkan hareketinin özellikleri hesaplamak amacıyla, hesaplama ağları oluşturulmuştur.

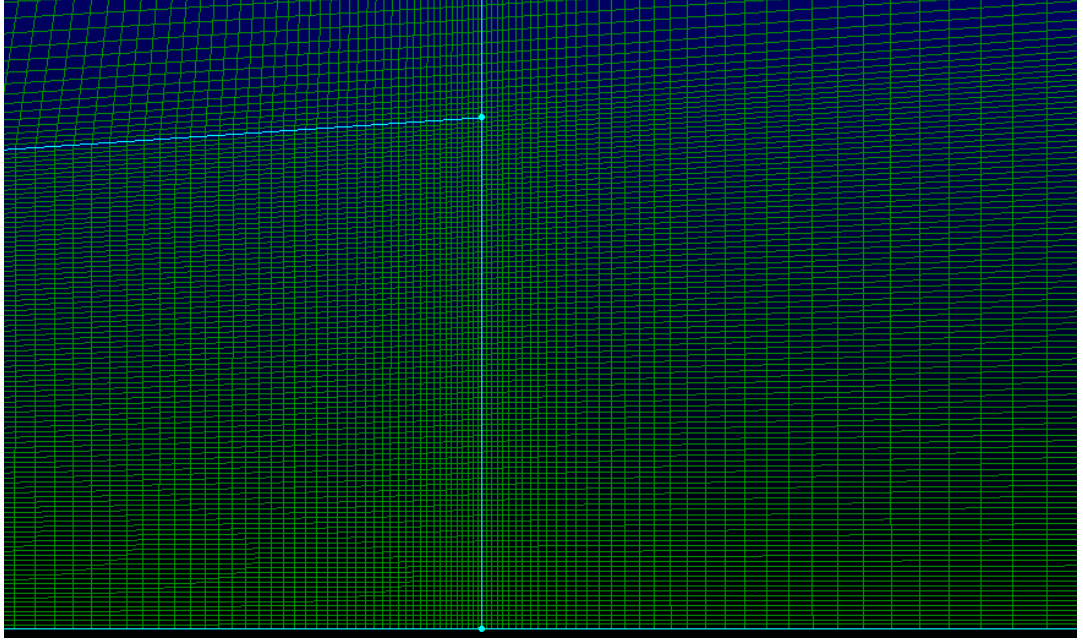
Tasarımımı tamamlanmış geometrinin analizinden önce yapılacak olan hesaplama ağı, doğru çözüme ulaşma konusunda çok önemlidir. Literatürdeki benzer örneklerde incelenerek hangi hesaplama ağının nasıl yapılacağına karar verilir. Akışkanlar dinamiği analizlerinde yapısal veya yapısal olmayan hesaplama ağları kullanılmaktadır. 2 boyutlu aksisimetrik analizlerde daha doğru ve hızlı çözümlere ulaşıldığı ve aynı zamanda literatürde yapısal hesaplama ağı kullanıldığı için, analizde yapısal hesaplama ağları tercih edilecektir. Yapacağımız analizi, yapısal hesaplama ağlarının sayısı doğru orantılı olarak etkilemektedir. Ancak, yapısal hesaplama ağlarının sayısının artması, çözüm süresini çok fazla uzatmaktadır. Bu sebeple, ilk oluşturulacak hesaplama ağları kaba olarak oluşturulur ve çözülür. Arkasından, daha detaylı hesaplama ağları oluşturulur ve çözüme devam edilir.

Akışkanlar dinamiği analizlerinin çözüme ulaşması, süre olarak uzun zamanlar alabilmektedir. Bu sebeple, Analizin hızlı çözülmesi için öncelikle çok detaylı olmayacak şekilde hesaplama ağları oluşturulmuştur. Ancak, nozulun boğaz kısmı, nozulun çıkış kısmı ve difüzör'ün giriş kısmı gibi, akışkanın karakteristik özelliklerinin hızlı şekilde değişeceği bölümlerdeki hesaplama ağları iyi bir sonuç elde etmek amacıyla, daha fazla sıklaştırılmıştır. Analizler, gerekli sınır şartları ve başlangıç koşulları programa girilerek gerçekleştirilmiştir.

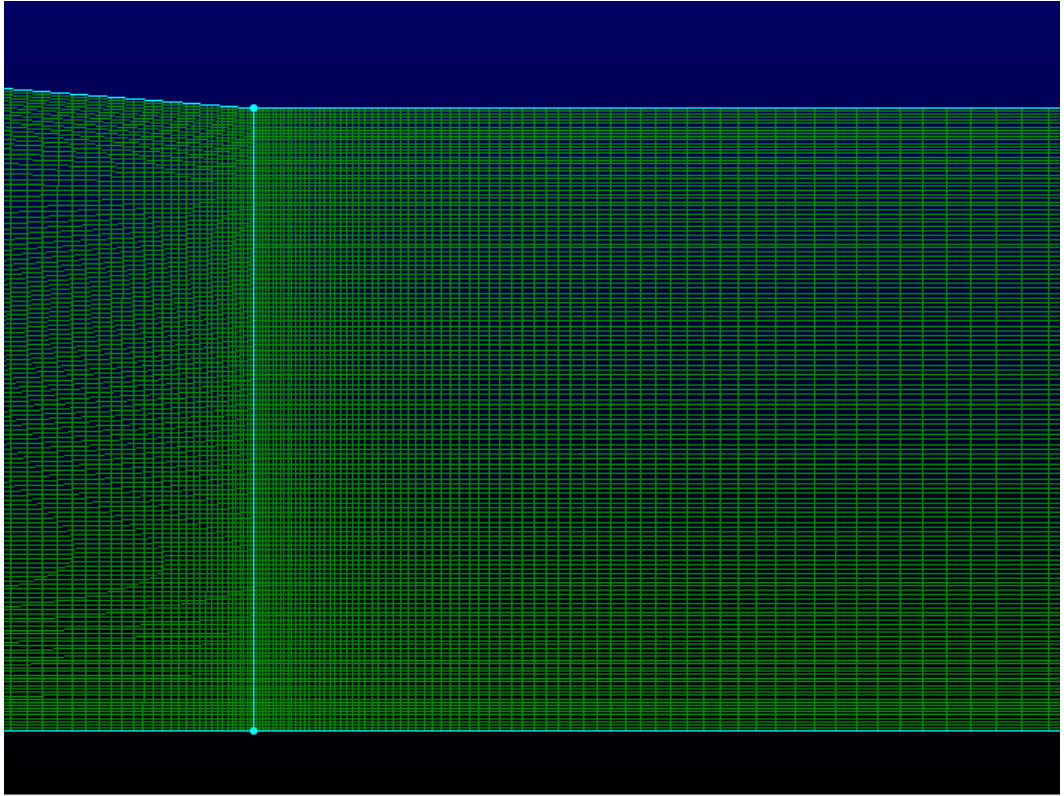
Analizi aksisimetrik olarak Fluent’de yapacağımız için, iki boyutlu bir çizim yapılarak, bu çizim üzerinde hesaplama ağı oluşturulmuştur. İlk hedeflenen durum, analizin sonuçunda tasarım hakkında bilgi sahibi olabilmek ve iyileştirmek için yapılacak olan yeni tasarım üzerine çalışmaktır. Analiz sonuçları hakkında bilgiler bir sonraki bölümde verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.17 arasındaki şekillerde de görüldüğü gibi yakınsak ıraksak nozulun boğazında, nozul çıkışında karışım bölgelerinde ve difüzör geçiş bölgelerinde hesaplama ağı sıklaştırılarak daha kesin sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.



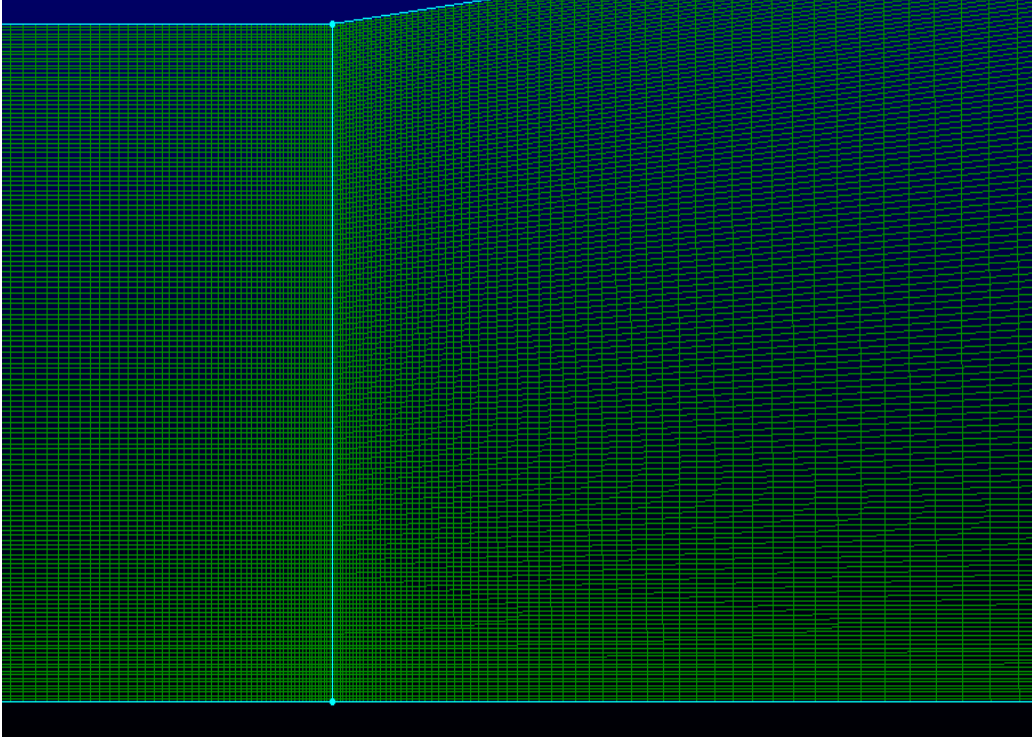
Şekil 4.13: Nozulun boğaz kısmı.



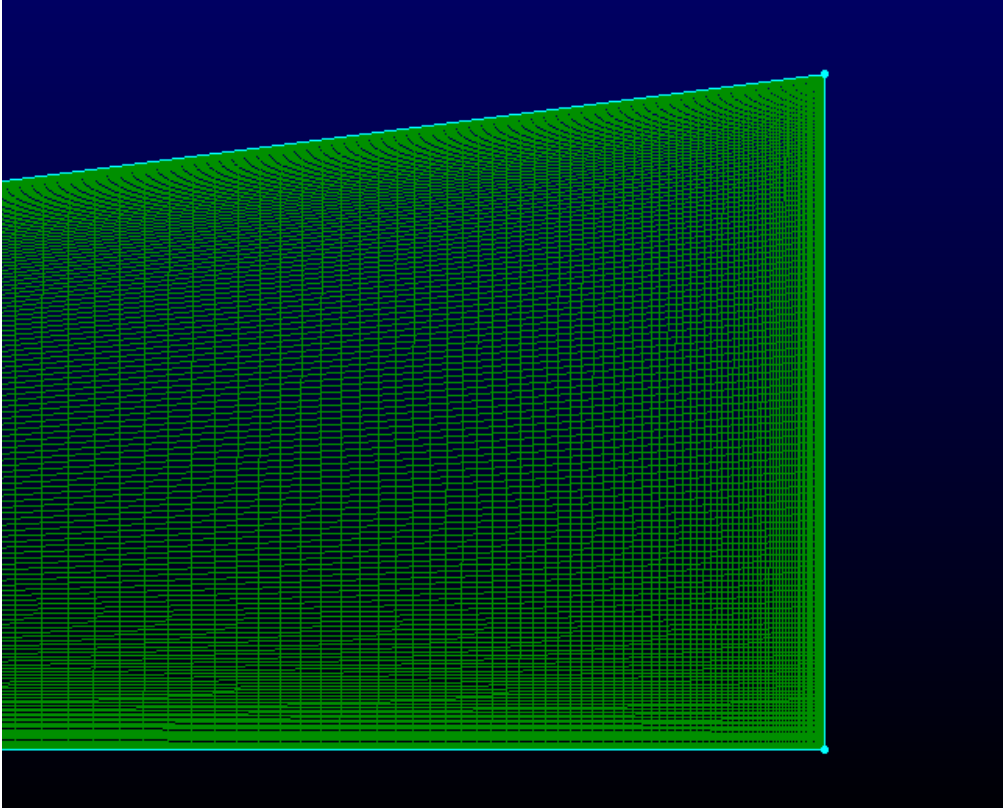
Şekil 4.14: Nozulun çıkış kısmı.



Şekil 4.15: Karışım bölgesine giriş.



Şekil 4.16: Karışım bölgesinin çıkış kısmı.



Şekil 4.17: Difüzör bölgesinin çıkış kısmı.

Hesaplama ağırları çoğaltılmış olan karışım bölgesi girişi, çıkışı ve difüzörün giriş bölgesinden geçen akışın daha iyi incelenmesi sağlanmıştır. Ayrıca karışım bölgesinde de difüzörde de, orta kısımlarında daha laminar ve değişimin (ani basınç, hız, yoğunluk değişimi) az olacağı akışlar mevcut olacağı için, hesaplama ağırları seyrekleştirilmiştir. Ejektörün yukarıda ki görülen kısımlarının hesaplama ağırları, daha doğru sonuçlar elde etmek için akışın ani değişiklik gösterebileceği muhtemel yerlerde arttırılmıştır.

4.3 Analiz

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akış alanın, akış alanından geçen debinin, matematiksel denklemlerin sayısal olarak çözümünü yapan sistemlerdir. Momentum ve enerji denklemlerinin korunumu metodlarını kullanarak, akış alanı ile ilgili fikirler verir. Yapılan analiz sonuçlarına göre ise, tasarımın doğruluğu, tasarım üzerinde yapılacak düzeltmeler ve detaylı değişiklikler hakkında fikir sahibi olunabilir, ayrıca yeni tasarımlar yapılabilir. Aynı zamanda, bu yöntemle yapılan analizler, test maliyetlerinin azaltılmasını sağlar.

İlk olarak problemin belirlenmesi; tasarımın gerçekleştirilmesi ve analizin amacının belirlenmesiyle başlanmıştır. Bu amaçla birlikte, tasarım esnasında düşünülmüş olan ani basınç değişimler, hız değişimleri ve debi geçiş miktarlarının daha çok olacak yerler ve akış esnasında nerelerin önemli olduğu üzerinde durulmuştur. Önemli görülen bu bölgelerde hesaplama ağırlarının sayısı arttırılmıştır. Uygun sınır şartlarına karar verilmesi ve sorunu çözmeye yetecek niteliğe sahip olup olmadığının kararı verilir. Uygun hesaplama ağırlarının oluşturulmasının arkasından, uygun türbülans modelinin seçilmesi gerekir. Çözülecek olan analiz modeli, hazır hale getirildikten sonra korunumlu denklemlerin çözümü iteratif yollarla sağlanır. Belirlenmiş olan hata oranlarıyla, yakınsamış analiz sonuçlarını, beklenen ve literatürdeki benzer problem çözümleriyle karşılaştırma yapılarak sonuçların kontrolü sağlanır. Bütün geometri, sınır şartları, türbülans modeli ve hesaplama ağırları oluşturulurken, hatalar görülür veya ortaya çıkarsa, model tekrar gözden geçirilerek tasarım hataları düzeltilir.



Şekil 4.18: Kaba hesaplama ağı.

İlk olarak hızlı sonuçlar elde etmek için yukarıdaki kaba hesaplama alanı oluşturularak analizi incelenir. Tasarım hataların düzeltilmesinin arkasından, akışkanlar dinamiği ile hesaplama ağının üzerindeki akışın çözülebilmesi için belirli sınır şartlarının tanımlanması gereklidir. Akışkanın giriş basınç, sıcaklık, hızları ve çıkışdaki basınç, sıcaklık ve hızları tanımlanmıştır.

Bunun yanı sıra, analizin 2 boyutlu, 3 boyutlu veya aksisimetrik şartları tanımlanmalıdır. Çizelge 4.1’de kullanılabilecek sınır şartları ve kullanım yerleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Çizelge 4.1: Sınır şartları [20].

Velocity Inlet	Sıkıştırılamaz rejime sahip akışkanlar için önerilmektedir. Sıkıştırılabilir akışkanlar için önerilmiyor. Negatif değerlerin girdisine izin vermektedir.
Pressure Inlet	Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz rejim için uygundur. Sık kullanılan sınır şartlarından biridir.
Pressure Outlet	Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz sıkıştırılamaz rejim için uygundur. Sık kullanılan sınır şartlarından biridir.
Mass Flow Inlet	Sıkıştırılabilir rejimde daha çok tercih edilmektedir. Sıkıştırılamaz rejimde de kullanılabilir ancak giriş basıncına göre yakınsatması daha zor olmaktadır.
Axis Boundary	Aksisimetrik problemlerde merkez çizgisi üzerinde kullanılır. Bu merkez çizginin pozitif x yönünde çakışması gereklidir.

Çizelge 4.1 (devam): Sınır şartları [20].

Periodic Boundary	Akışkana dönme eksenini mutlaka tanımlamak gereklidir. Periyodik bir hareket gerçekleşiyorsa tercih edilmektedir.
Symmetry Boundary	Bütün değişkenlerin normal gradyenleri simetrik düzleminde sıfır olmaktadır ve simetrik problemlerde uygulanmaktadır.
Outflow	Sıkıştırılamaz akışkanlar için kullanılır ama önerilmemektedir. Basınç girişi ile kullanılmamaktadır. Hız girişi ile kullanılabilir. Daimi olmayan değişken yoğunluklu akışlarda kullanılmaz. Yakınsaması iyi değildir. Hız ve basınç değerlerinin bilinmediği zaman tercih edilmektedir ya da çıkış koşulları tam gelişmiş bölgeye yakınsa kullanılmaktadır.
Pressure Far Field	Sıkıştırılabilir akışkanlar için uzakta bir noktayı tanımlamak adına kullanılır.
Inlet Vent	Basınç artışlarını, kayıp katsayılarını akış yönünü tanımlamak için kullanılabilir. Ortam giriş sıcaklık ve basıncını tanımlamak gereklidir.
Intake Fan	Basınç artışlarını, kayıp katsayılarını akış yönünü tanımlamak için kullanılabilir. Ortam giriş sıcaklık ve basıncını tanımlamak gereklidir.
Outlet Vent	Basınç artışlarını, kayıp katsayılarını tanımlamak için kullanılabilir. Ortam çıkış sıcaklık ve basıncını tanımlamak gereklidir.
Exhaust Fan	Basınç artışlarını, kayıp katsayılarını tanımlamak için kullanılabilir. Ortam çıkış sıcaklık ve basıncını tanımlamak gereklidir.
Fans	Farklı fiziksel modellemeler için kullanılır.
Radiators	Farklı fiziksel modellemeler için kullanılır.
Porous-jump models	Gözenekli yapılarda daha iyi yakınsama sağlar.

Türbülans modellenmesi zor olmasına rağmen, türbülans modelleri akışı daha iyi çözebilmek için gereklidir. Fakat türbülanslı akışlarda, doğru metoda karar vermek ve çözümü elde etmek, zordur ve zaman alır. Literatürde yapılan benzer analizler ele alındığında, SST K-W methodunu kullanarak ejektör analiz gerçekleştirilmiştir.

Yapılacak olan ejektör analizi, 3 boyutlu olursa çok fazla zaman alacağı ve tasarım sürecini uzatacağı için, 2 boyutlu olarak aksisimetrik yapılmıştır. Literatürdeki örneklerine bakıldığında da aksisimetrik analiz kullanıldığı görülmüştür. Çizim ve hesaplama ağları oluşturulduktan sonra, şekil Fluent programına aktarılır. Hesaplama ağlarının kontrol edilmesinin arkasından boyut oranlaması yapılır.

İlk olarak iki boyutlu aksisimetrik şekil üzerinde kaba bir hesaplama ağı oluşturulur. Analizin sınır koşulları verilerek, analiz çalıştırılır. Elde edilen sonuçların incelenmesinin arkasından, iyileştirilmiş bir hesaplama ağı oluşturulur ve analiz çalıştırılır. İki analiz arasında ki sonuçlar karşılaştırılır ve hesaplama alanları bir kez daha iyileştirilerek analiz çalıştırılır. Bu üç analizin sonuçları karşılaştırılır. Son iki analiz ve analitik çözümler birbiriyle uygunsa, hesaplamalı akışkanlar mekaniği methodu ile doğru çözümleri elde ettiğimiz anlamına gelir. Çözümler ve analitik çözüm birbirinden farklıysa, hesaplama ağları tekrar iyileştirilerek analiz çalıştırılır. Tekrar analiz sonuçları ve analitik denklemler karşılaştırılır ve sonuçlar birbiriyle tutarlı değil ise sınır koşullarında incelenerek hata varsa düzeltilir.

4.3.1 Kullanılacak malzemeler ve sınır koşulları

Nozul giriş kısmı olan m_2 'den içeriye, 14 bar lık bir basınç ile su buharı verilmiştir. Piyasa araştırması yapıldığında 0.5 bar ile 20 bar aralığında basınç sağlayabilen buhar kazanları bulunmaktadır [18]. Egzoz gazı olarak da su buharı çekmemiz gerektiği için pompalayan analizi yaparken m_1 akışıda su buharı olarak alınır.

Test etmeyi planladığımız motorun egzoz çıkış koşulları ise şu şekildedir:

m_1 : 0.1 kg/s

Basınç : 8 kPa

Sıcaklık : 800 C'dir.

M1 girişinin olduğu bölümden vakum etkisi oluşturarak 0,1 kg/s debili ve 7000Pa'lık bir akış çekmemiz gerekiyor.

Analiz programını girecek olduğumuz sınır koşullarına göre, pompalayan ejektör veya pompalamayan ejektör için analizler yapılacaktır. Amacımız, pompalayan ejektörden, egzoz gazı girişindeki düşük basınçlı alandan vakum yapabilmektir. Fakat pompalayan ejektörden vakum yapacağımız akışı incelemeden, pompalamayan ejektördeki akışı ve bu ejektörün vakum üzerine etkilerini incelersek, bir sonraki aşamaya, yani pompalayan ejektöre daha iyi sınır koşulları verebiliriz.

Sınır koşulları şu şekilde verilmiştir.

Pompalamayan ejektör için;

Şekil 4.19 da belirtilmiş olan

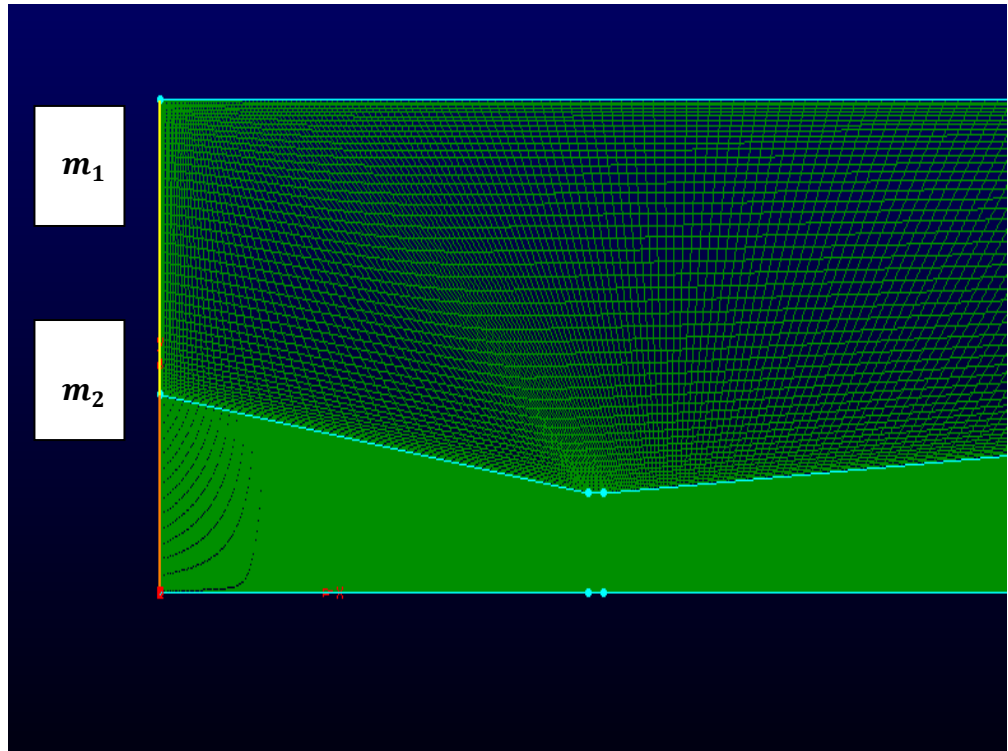
m_1 : Duvar

m_2 : Basınç girişi (Pressure inlet) olarak verilmiştir.

Pompalayan ejektör için;

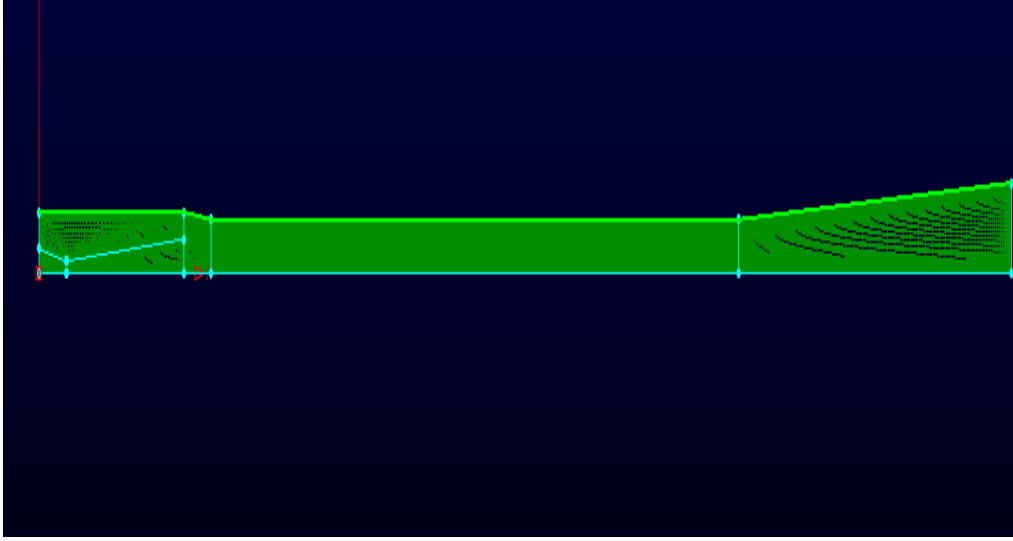
m_1 : Basınç girişi (Pressure inlet)

m_2 : Basınç girişi (Pressure inlet) olarak verilmiştir.



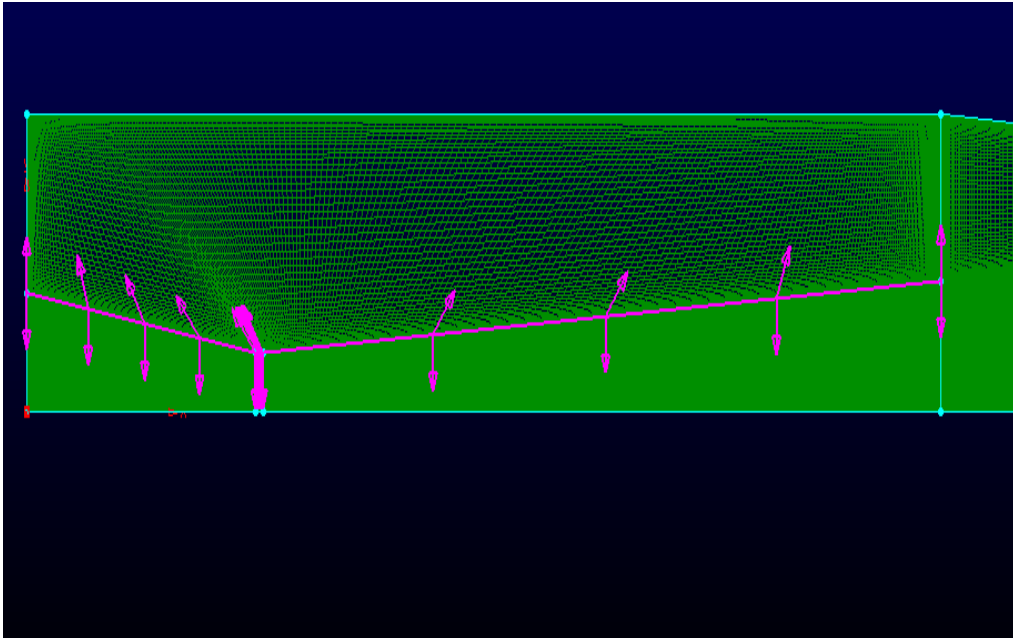
Şekil 4.19: m_1 ve m_2 basınç girişleri.

Şekil 4.19’da m_1 ve m_2 kütle debilerinin giriş bölümleri görülmektedir. Pompalayan veya pompalamayan ejektör analizlerine göre, m_1 sınır koşulları oluşturulmuştur. Ejektörün üst kısımları duvar olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.20’de duvar olarak tanımlanan kısım yeşil renkle gösterilmiştir.



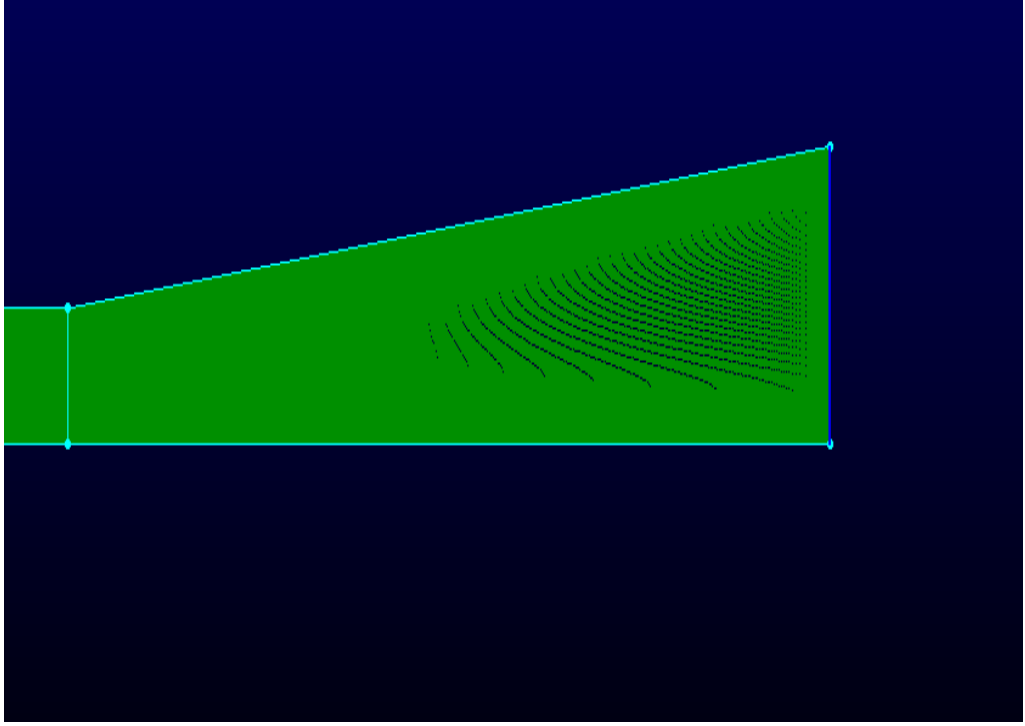
Şekil 4.20: Ejektörün kenar kısımları.

Nozul un kenarları duvar olarak tanımlanmış olup, şekil 4.21’de pembe renk ile gösterilmiştir.



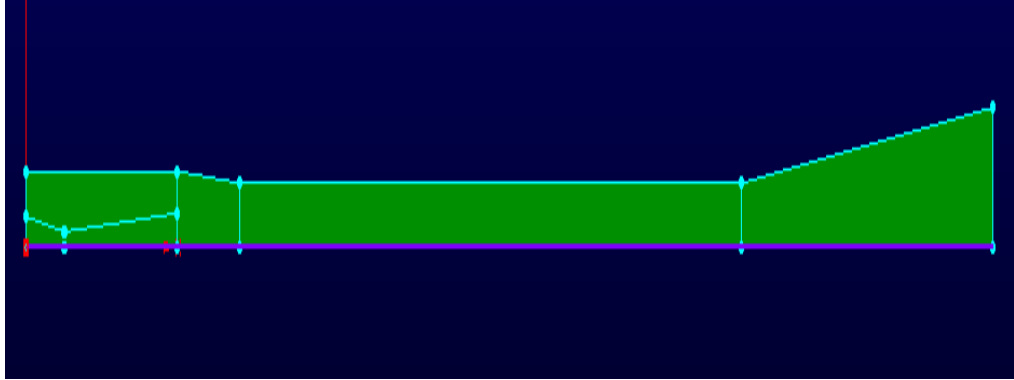
Şekil 4.21: Nozulun kenar kısımları.

Ejektörün çıkış kısmı basınç çıkışı (Pressure outlet) olarak tanımlanmış olup, Şekil 4.22’de mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Ejektörün çıkış kısmı.

Aksisimetrik analizlerde kullanılması gereken eksen şekil 4.23’de mor renk olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.23: Aksisimetrik kısım.

Fluent analizlerini, kaba hesaplama ağları ile çözdükten sonra, daha detaylı çözüm için; ani hız, basınç değişimleri veya şok oluşumlarını incelemek için kaba hesaplama ağları detaylı hale getirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

5. ANALİZ VE SONUÇLARI

5.1 Fluent Analizi

Fluent programında sınır koşulları verilmiştir:

Şekil 4.11 de gösterilmiş olan:

m_1 :
Basınç : 8000 Pa,
Sıcaklık : 573 K,

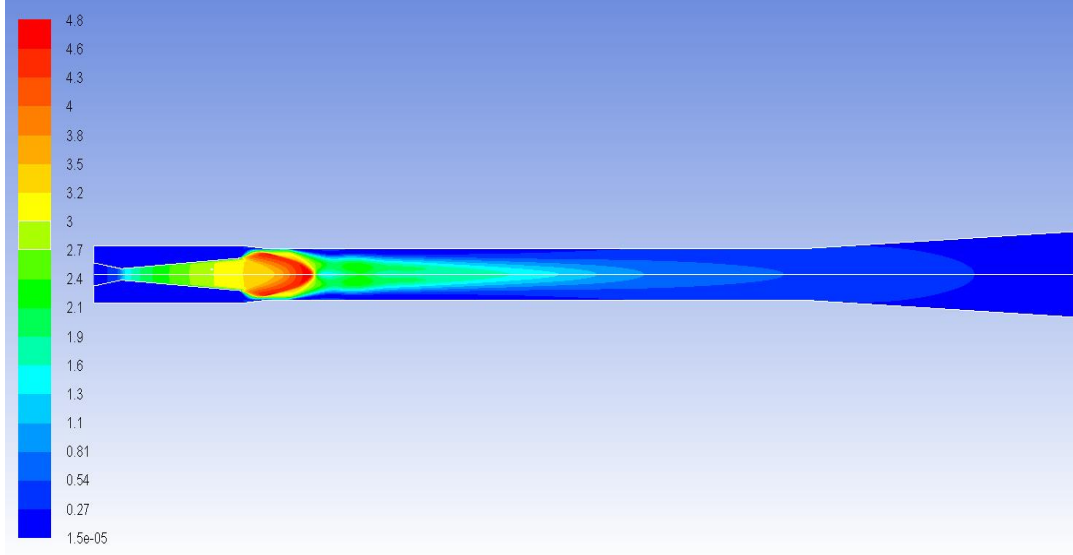
Ancak ilk analiz pompalamayan şekilde yapılacağı için yukarıda da bahsettiğimiz üzere, M1 girişinin sınır koşulunu “duvar” olarak atarız.

m_2 :
Basınç : 1400000 Pa
Sıcaklık : 1073 K
Ejektör çıkışı :
Basınç : 101321 Pa (ortam basıncı)

Bu sınır koşullarını temel alarak k-w sst yöntemini kullanarak analiz çalıştırılmıştır. 20000 adım iterasyonun arkasından analiz yakınsamıştır.

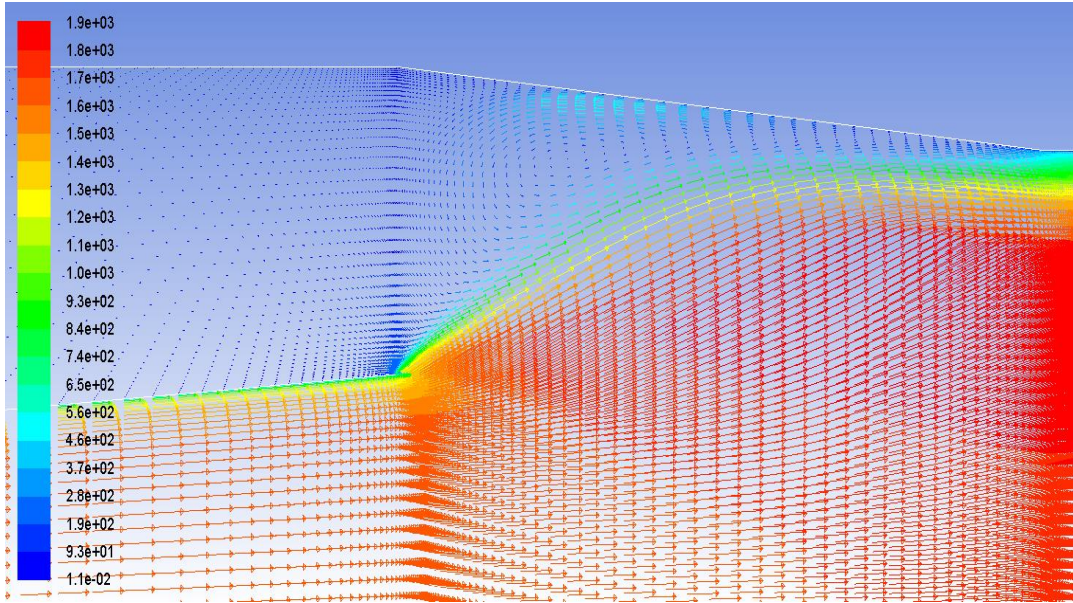
5.1.2 Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları

İteratif yöntemler ile elde edilmiş çözümlere göre, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, nozulun çıkışında Mach sayısı en yüksek değerlere ulaşmış ve devamında yavaşlayarak ilerlemiştir. Mach sayısının yüksek olduğu yerlerde basınç düşük olacağı için pompalamayan sistemin m_1 bölgesinde vakum oluşturulmuştur.



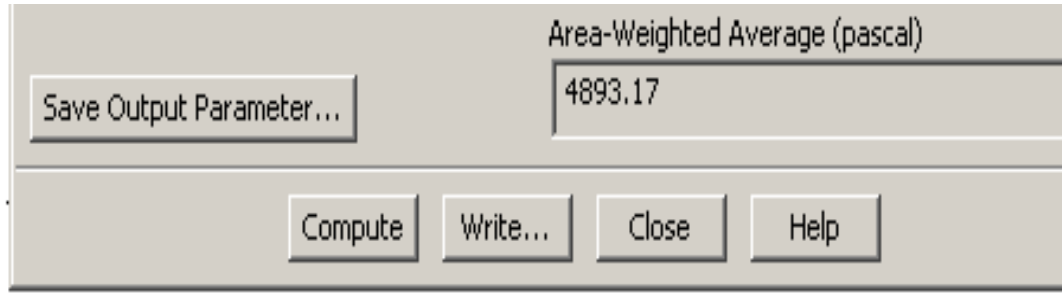
Şekil 5.1: Mach sayısı.

Nozulun hemen çıkışındaki hız vektörlerini incelediğimizde, beklediğimiz gibi; nozul çıkışına hızlı gelen akış açılma dalgası oluşturarak, ikincil akışın olduğu bölgedeki hava üzerinde vakum etkisi oluşturmuştur.



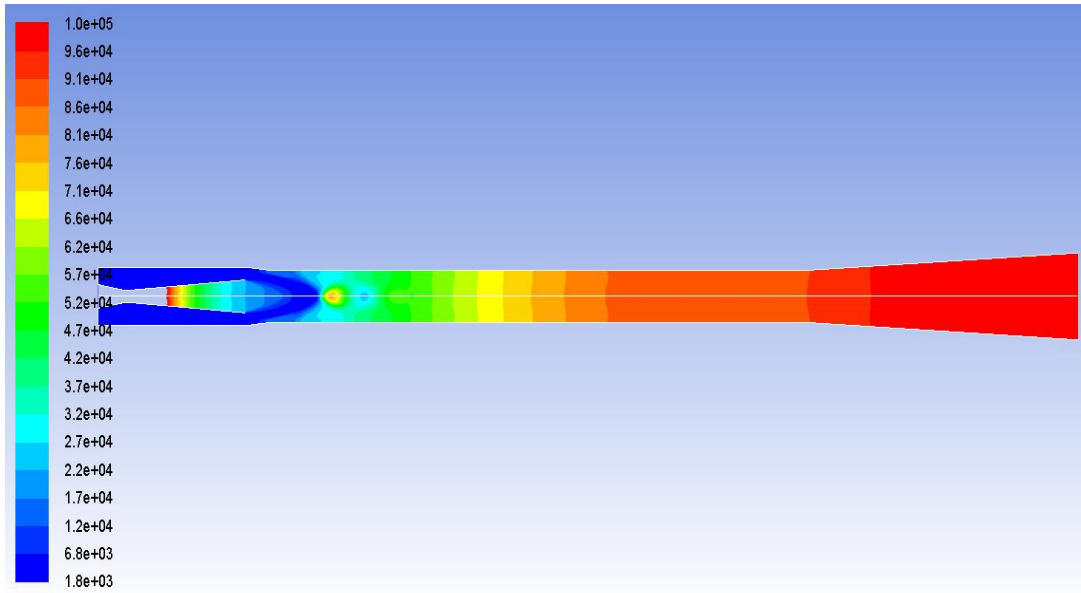
Şekil 5.2: Hız vektörleri (m/s).

Şekil 5.3 deki basınç dağılımları maksimum 101325 Pa, yani dış ortam basıncı olacak şekilde incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, m_1 bölgesinde ki basınç 4 kPa'a kadar düşmüştür. Nozulun çıkışında minimum basınç değerlerine ulaşılmış ve bu sayede vakum oluşturulmuştur. Ayrıca, karışım bölgesinde akış yavaşlayarak difüzöre ses altında girmiş ve basıncı ortam basıncına kadar yükselerek çıkmıştır. Basınç dağılımı tam olarak istediğimiz şekilde gözükmektedir.



Area-Weighted Average Static Pressure		(pascal)
-----		-----
m1_inlet-5		4893.1699

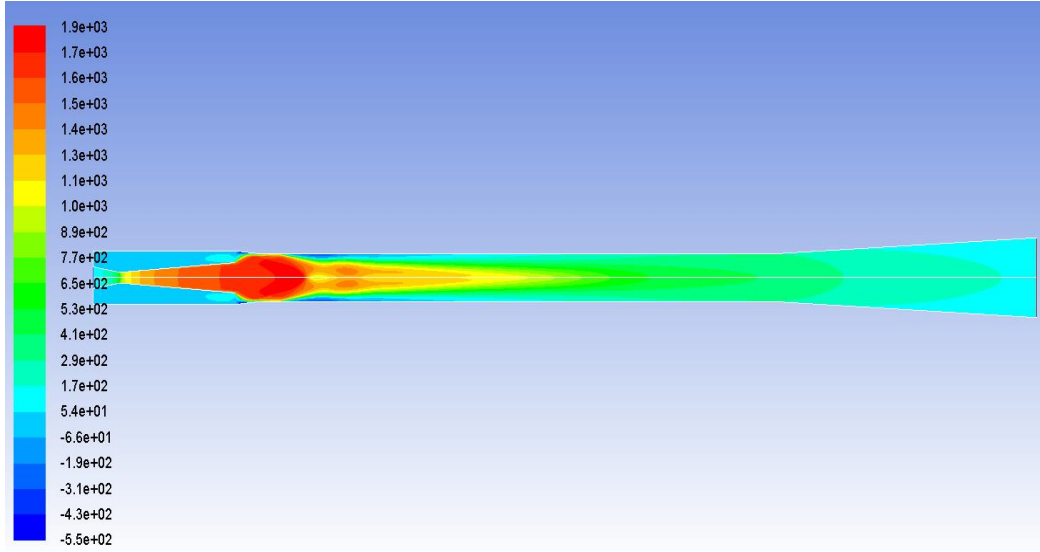
Şekil 5.3: m_1 girişindeki basınç değeri (Pa).



Şekil 5.4: Basınç dağılımı (Pa).

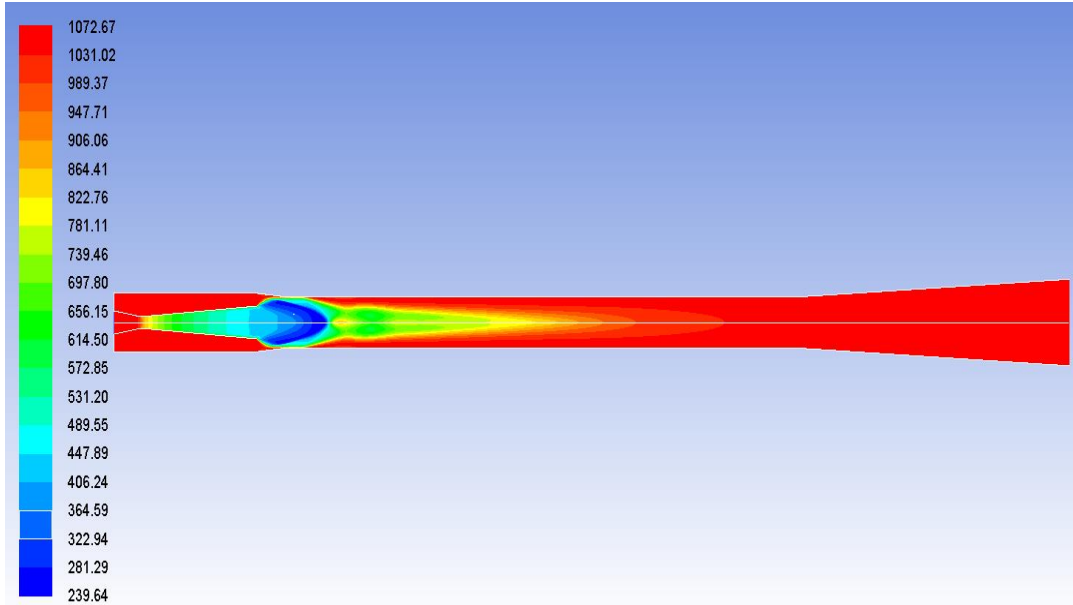
Şekil 5.4'deki basınç dağılım grafiğini inceleyecek olursak, bütün sistemdeki en düşük basıncın nozulun çıkışında olduğu görülmektedir. Negatif basınç sayesinde m_1 bölgesinde vakum oluşturulur. İki akışın karışım bölgesinde karışması ile yukarıdaki şekildedeki görüleceği gibi basınç giderek yükselir. Yükselen basınçla beraber, hız düşer. Düşük hız ile ejektörün difüzör bölgesine giren akış, difüzörün çıkışına kadar yavaşlayarak atmosfer basıncına ulaşır.

Şekil 5.5'deki aksenal hız dağılımlarında nozulun hemen çıkışındaki hız değişimleri net bir şekilde gözükmemektedir. Ayrıca karışım bölgesindeki yavaşlama ve difüzör bölgesindeki hız değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.5: Aksenal hız dağılımı (m/s).

Sıcaklık değerlerini incelersek, 4. Bölümde yapmış olduğumuz hesaplamalardaki gibi, nozulun boğasında düşmüş, çıkışında çok daha fazla azalmıştır. İkincil akışın bulunduğu bölgedeki 1073 K'lık hava ile karışım bölgesinde karışmış ve difüzörden dışarıya çıkmıştır.



Şekil 5.6: Sıcaklık dağılımı (K).

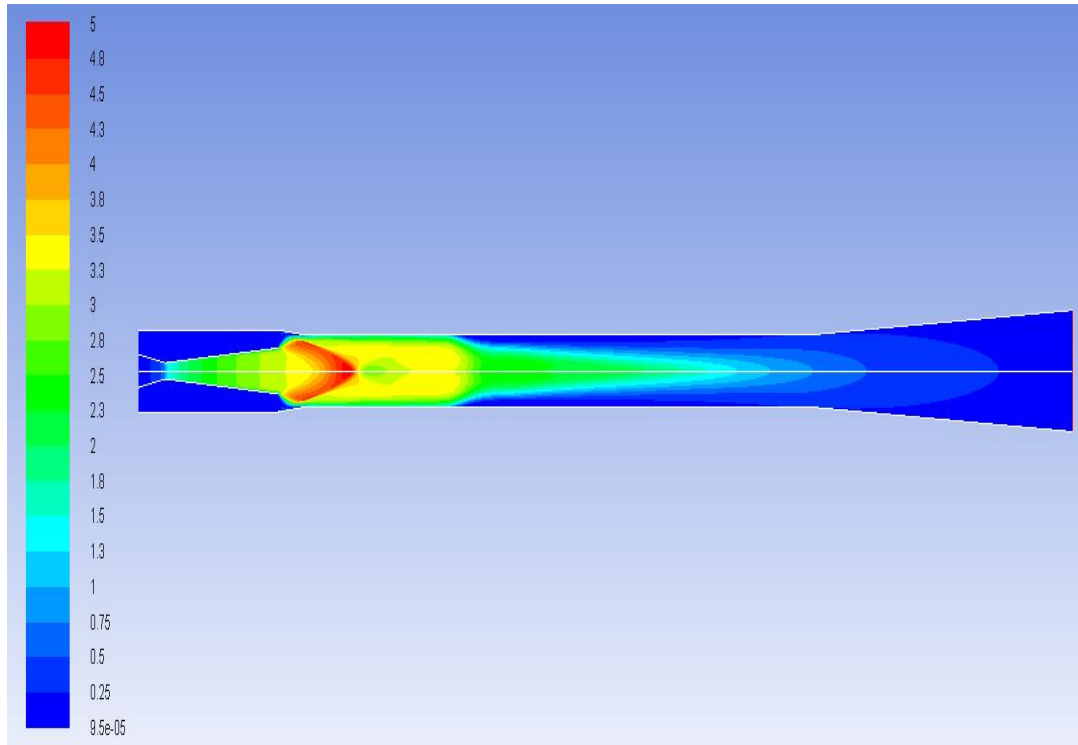
Pompalamayan bir ejektör analiz sonuçlarında ikincil akış bölgesinde 4 kPa'a kadar basıncın düştüğü ve vakumun oluştuğu görülmüştür. Pompalayan bir ejektör sistemini analizini yaparken ilk olarak ikincil akışı 5 kPa alınmış ve ne kadarlık bir vakum yapılabildiği incelenmiştir.

5.1.3 Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları

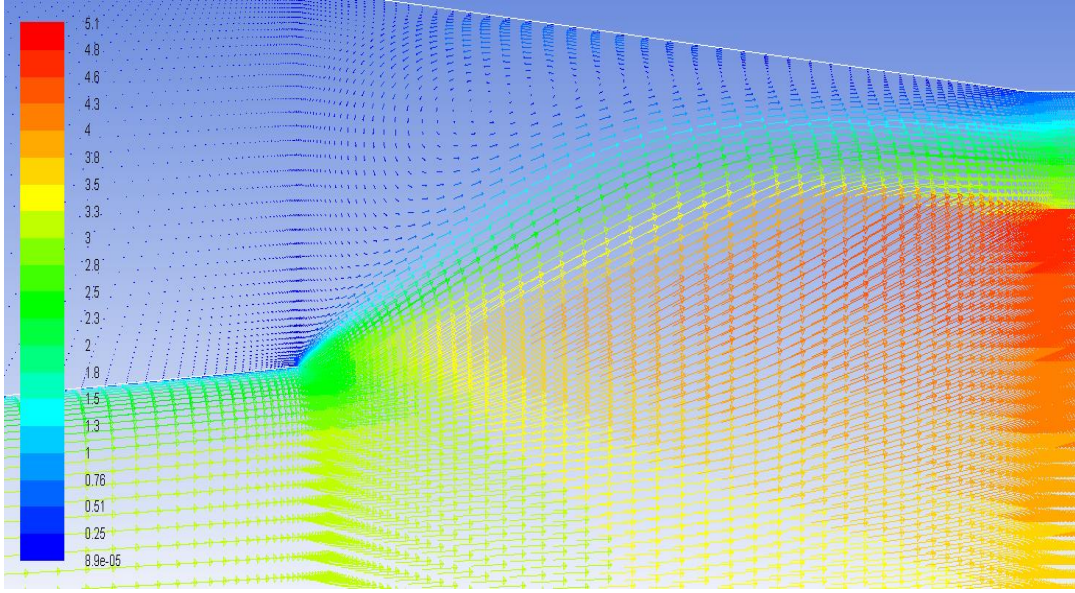
Sınır koşulları şu şekilde alınmıştır:

m_1	:	Basınç: 5000 Pa,	Sıcaklık: 573 K,
m_2	:	Basınç: 1400000 Pa	Sıcaklık: 1073K
Ejektör çıkışı	:	Basınç: 101321 Pa (ortam basıncı)	

20000 adım iterasyonun arkasından analiz yakınsamış olan analizin şekil 5.7'deki Mach sayılarını incelersek; daha önceki analizimiz de olduğu gibi maksimum Mach sayısı nozulun hemen dışında oluşmuştur. Basıncın küçük olduğu bir alan olduğu için vakum oluşması sağlanmıştır. Mach sayısının maksimuma ulaştığı noktanın hemen arkasındaki karışım bölgesinde şok oluşmuş ve Mach sayısı düşerek difüzöre ses altındaki ulaşmıştır. Ses altındaki hız difüzörün içerisinde dahada yavaşlayarak ortama açılmıştır.

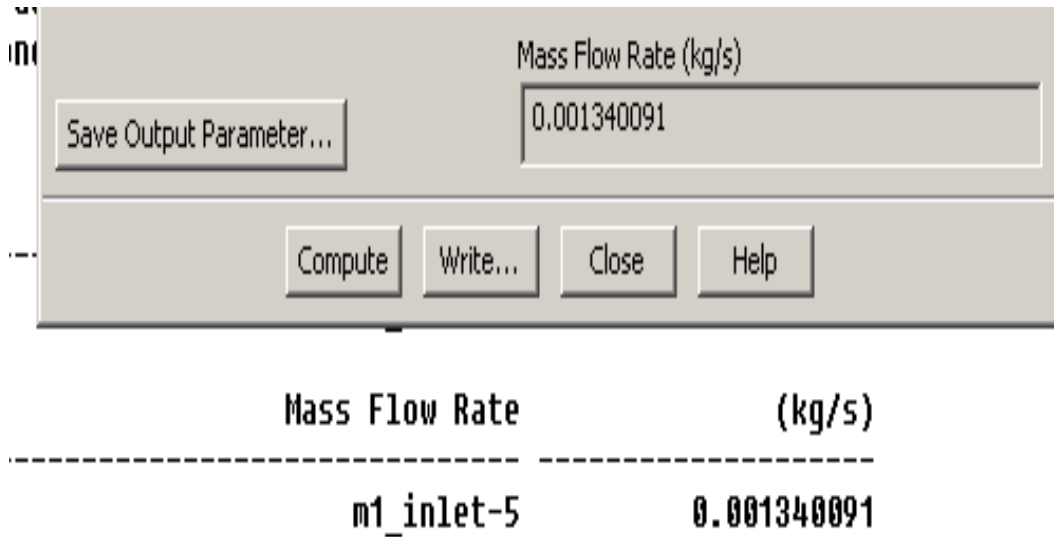


Şekil 5.7: Mach sayıları.

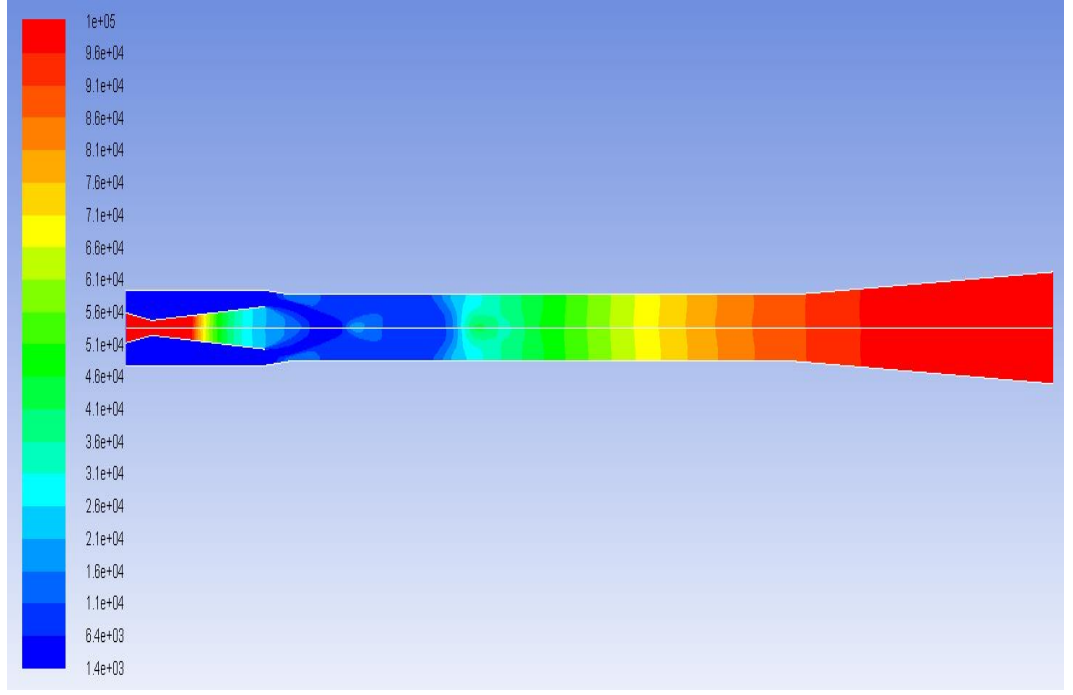


Şekil 5.8: Hız vektörleri (m/s).

Daha önceki analizde m_1 bölgesinde ki basınç 4 kPa'a kadar düşmüştü, bu analizde birincil akış bölgesine 5 kPa'lık bir gaz verilerek ne kadar vakum yapılacağı incelenmiştir. Sonuç olarak birinci analizde değer 4893 Pa, 5000 Pa'a çok yakın olduğu için saniyede 1 gr'lık bir debiyle vakum oluşmuştur.

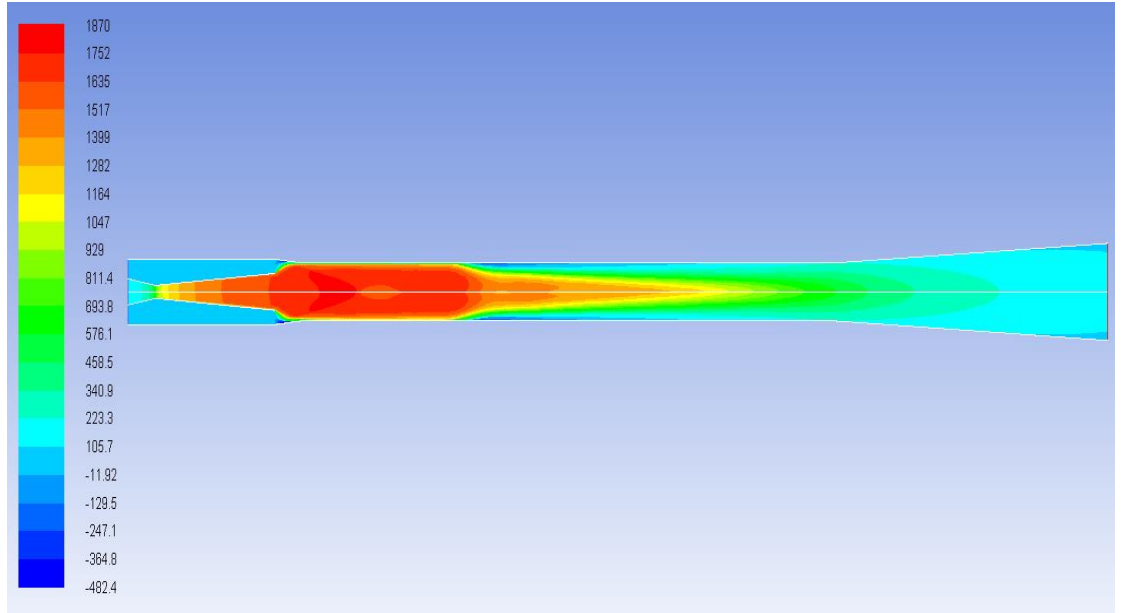


Şekil 5.9: m_1 inletteki vakum değeri (Pa).

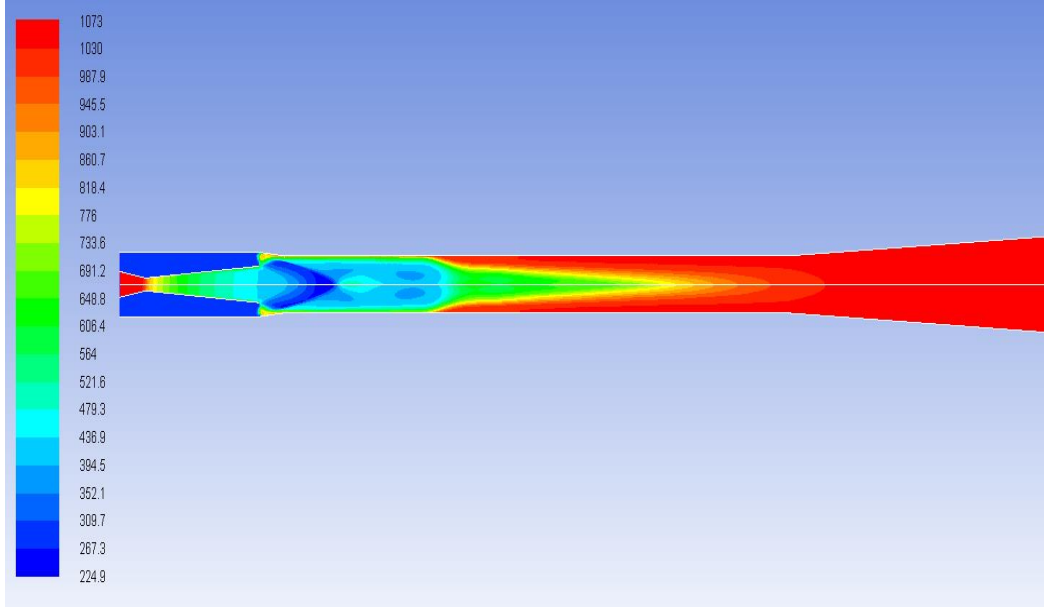


Şekil 5.10: Basınç dağılımı (Pa).

Şekil 5.10'da ki basınç dağılımları en yüksek basınç 101325 Pa, yani ortam basıncı olacak şekilde ayarlanmıştır. Ejektörün içerisindeki basınç değişimi istediğimiz gibi, nozulun çıkışında düşmüş, karışım bölgesinde yükselmiş ve difüzör sayesinde de atmosferik basınca ulaşmıştır.



Şekil 5.11: Eksenel hız dağılımı (m/s).



Şekil 5.12: Sıcaklık dağılımı (K).

5.1.4 II. Pompalamayan ejektörün analiz sonuçları

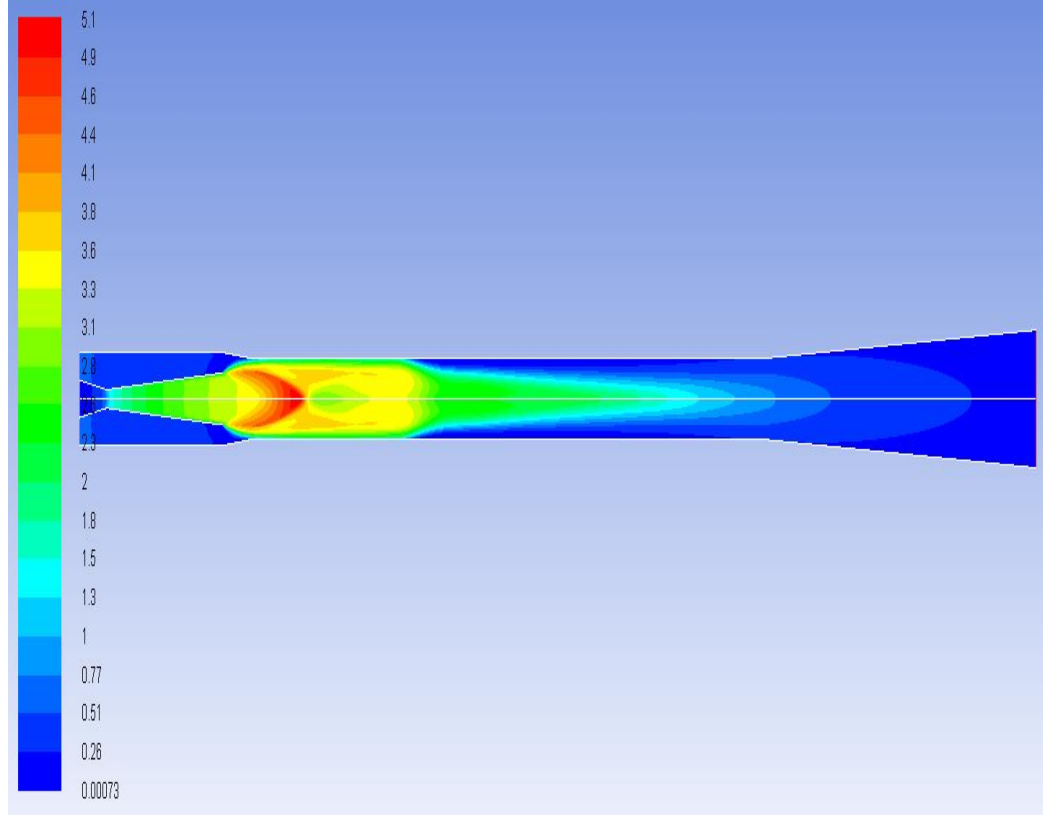
Sınır koşulları şu şekilde alınmıştır:

m_1 : Basınç: 7000 Pa, Sıcaklık: 573 K,

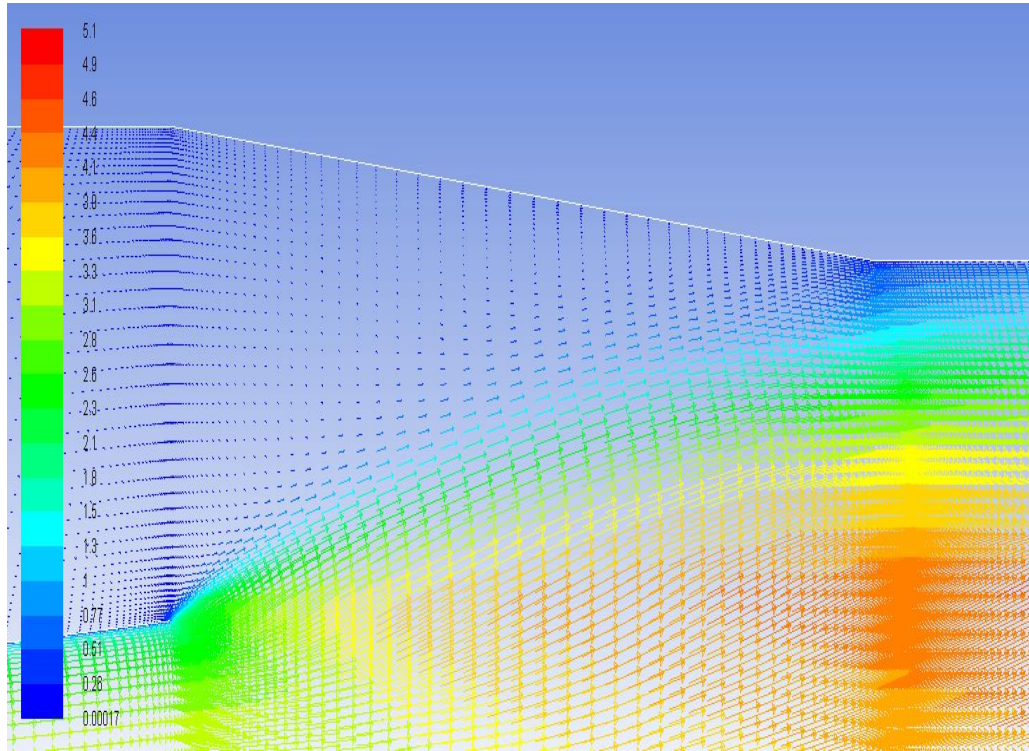
m_2 : Basınç: 1400000 Pa Sıcaklık: 1073K

Ejektör çıkışı : Basınç: 101321 Pa (ortam basıncı)

50000 adım iterasyonun arkasından analiz yakınsamış olan analizin şekil 5.13'deki Mach sayılarını incelersek; daha önceki analizlerimizde olduğu gibi maksimum Mach sayısı nozulun hemen dışında oluşmuştur. Maksimum Mach sayısının olduğu yerde, minimum basınç elde edildiği için vakum oluşmuştur. Mach sayısının maksimuma ulaştığı noktanın hemen arkasındaki karışım bölgesinde şok oluşmuş ve Mach sayısı düşerek düfüzöre ses altında ulaşmıştır. Ses altındaki hız difüzörün içerisinde daha da yavaşlayarak ortama açılmıştır.

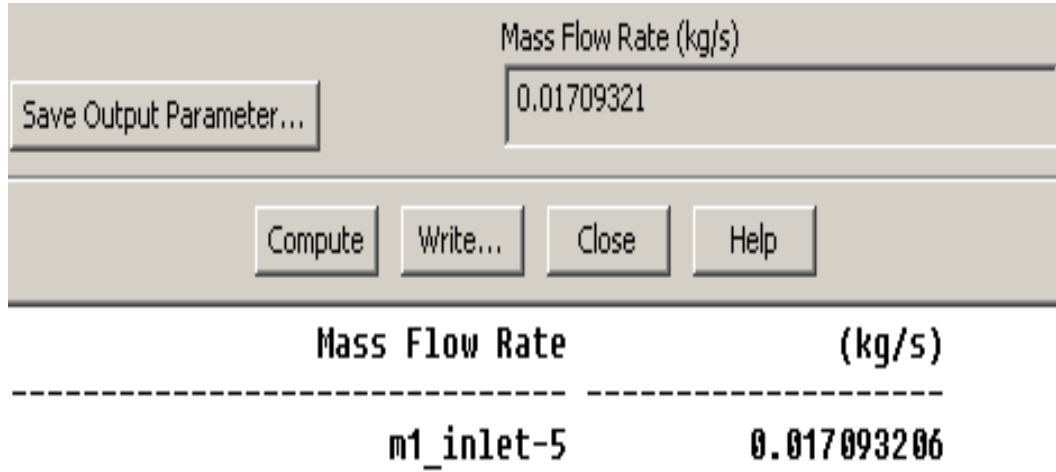


Şekil 5.13: Mach sayıları.



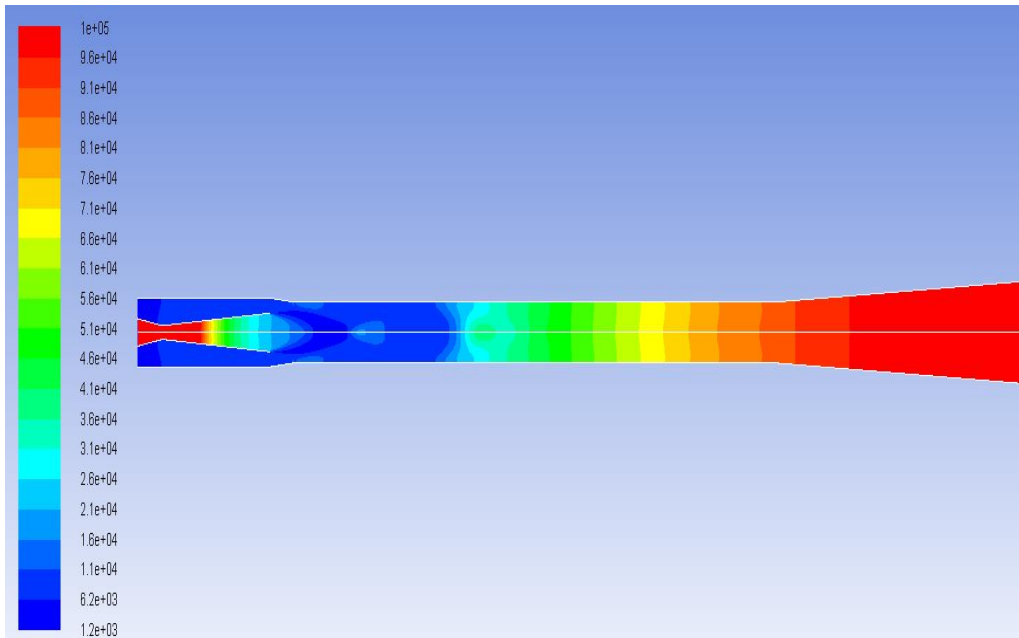
Şekil 5.14: Hız vektörleri (m/s).

Daha önceki analizde m_1 bölgesinde ki basınç 4 kPa'a kadar düşmüştü, bu analizde birincil akış bölgesine 7 kPa'lık bir gaz verilerek ne kadar vakum yapılacağı incelenmiştir. Sonuç olarak birinci analizde değer 4893 Pa, 7000 Pa' a üzerinde vakum oluşturmuş ve saniyede 17 gr'lık bir debiyle vakum oluşmuştur.

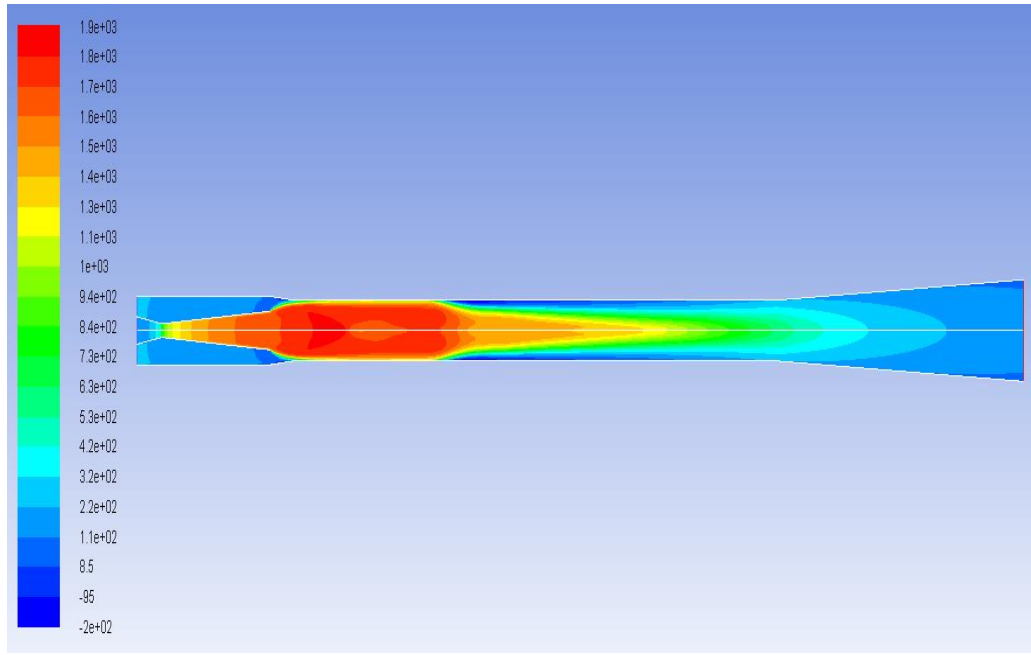


Şekil 5.15: m_1 inletteki vakum değeri (Pa).

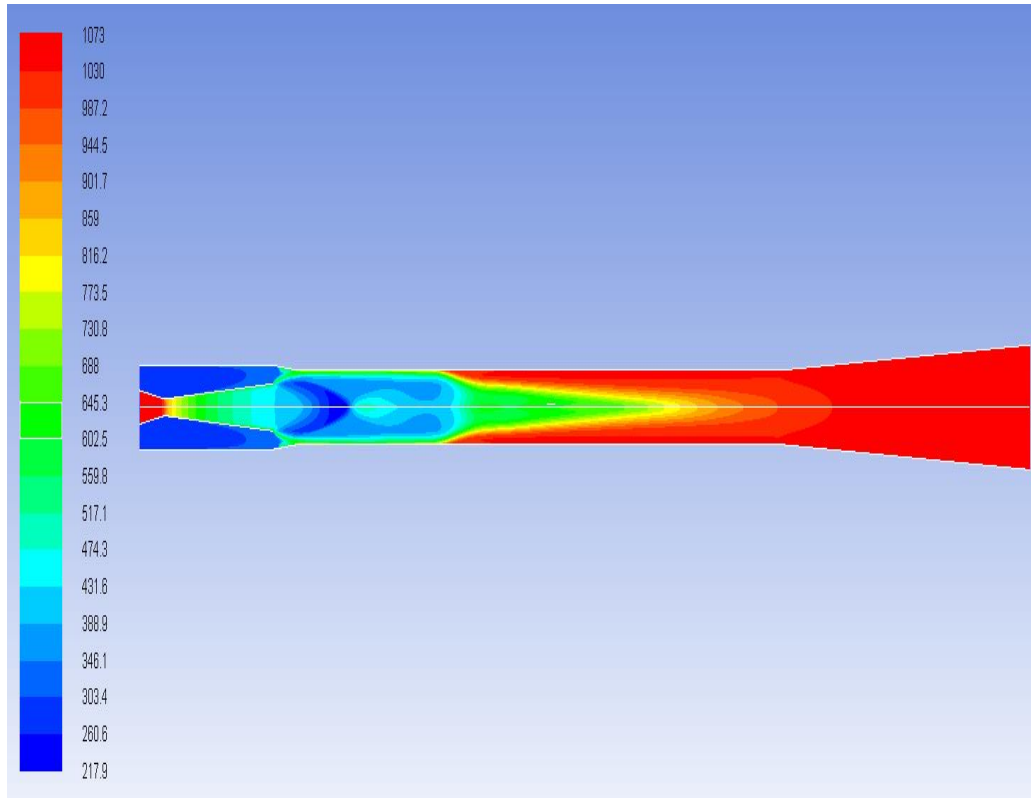
Şekil 5.16'da ki basınç dağılımları en yüksek basınç 101325 Pa, yani ortam basıncı olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5.16: Basınç dağılımı (Pa).



Şekil 5.17: Eksenel hız dağılımı (m/s).



Şekil 5.18: Sıcaklık dağılımı (K).

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Ejektör tasarımı için, gerekli literatür araştırmasının yapılmasının arkasından, ilk olarak ejektörün en önemli kısmı olan yakınsak- ıraksak nozulun tasarlanmıştır. Bu tasarımın arkasından literatürdeki, ses üstü akışlarda kullanılan ejektör tasarımları ve optimizasyonları göz önünde bulundurularak, ihtiyacımız olan ejektörün tasarım parametreleri gösterilmiş ve tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen ejektörün, deneysel yöntemlerle veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile incelemesi ve istenilen sonuçların ne kadar elde edilebildiğinin görülmesi gereklidir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin kullanımı, son yıllarda bilgisayar teknolojisinin artmasıyla da, akademik ve endüstriyel çalışmalarda akışkanın hareketinin incelenmesine kullanılan önemli bir araç haline gelmiştir. HAD deneysel yöntemlere kıyasla maliyet ve süre açısından avantajlı bir yöntemdir. Ses üstü hızlarda ki bir akışın deneysel düzeneğinin kurulması ve incelenmesinin yapılması ses altı akışa göre çok fazla zaman alan zor bir uygulama olmasına rağmen; HAD yönteminde sadece çözün zamanı çok az farkmaktadır. Yapılmış olan tasarımın akışı 2D aksisimetrik akış çözümlemesi, HAD yöntemi ile incelenmiştir.

Yukarıda bahsettiğimiz gibi, HAD yöntemiyle ejektör akışları incelenirken, öncelikle pompalamayan ejektör sistemi incelenmiştir. Bu çalışmada, nozul girişinden 14 bar'lık bir basınç verilmiş ve ikincil akış bölümü duvar olarak kabul edilmiştir. Analitik denklemler ile yaptığım hesaplamalarda birincil akış var iken, düşebildiğimiz minimum basınç değeri 5000 Pa civarındadır. Yaptığımız çalışmalardanda beklediğimiz gibi, duvar olarak bırakılan bölümün çevresinde vakum oluşmuş ve basınç 4893 Pa'a kadar düşmüştür. Pompalamayan ejektör sistemi ile vakum oluşturulduktan sonra, pompalayan ejektör sistemi incelenmiştir. Aynı tasarım ve sınır şartlarına farklı olarak, birincil akış bölümüne 5000 Pa'lık bir basınç verilmiş ve kaç kg'lık bir akış olacağı incelenmiştir. Bu analizin sonucunda 0.001 kg/s'lik bir debisi elde edilmiştir. Üçüncü olarak, daha fazla debi çekebilmek için,

birincil akışın olduğu bölgeye 7000 Pa lık bir basınç verilmiştir. Üçüncü analizin sonucunda ise 0.017 kg/s'lik bir debisi oluşmuştur.

Sonuç olarak, yüksek irtifa roket test sistemlerinde kullanılmak için tasarlanmış olan ejektör, roket çalışmadan önce, pompalamayan bir şekilde ve roket çalışırken pompalayan bir şekilde incelenmiştir. Daha yüksek irtifalardaki roketlerin testlerini yapabilmek için, daha düşük basınçlarda, daha fazla debilerin vakum yapılabilmesi gereklidir. Yukarıda yapılmış olan tasarım en düşük 5000 Pa lık bir basınçtan 0.001 kg/s'lik bir vakum debisi oluşturmaktadır. Ancak, yaptığımız bir sonraki analize göre, daha yüksek basınçlarda çok daha iyi vakumlar oluşturabilmektedir. Kısacası, yüksek irtifa roket testleri için uygun bir ejektör tasarlanmıştır. Ancak daha yüksek irtifa roket testleri ve yüksek vakum debileri için, yukarıdaki tasarım parametreleri iyileştirilerek yeni ejektörler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Chaqing Liao.** (2008). Gas Ejector Modeling for Design and Analysis. Texas A&M University.
- [2] **Stefan Elbel, Predrag Hrnjak.** (2008). Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditionin Applications.
- [3] (t.y.). Eişim:15 Mayıs 2015
http://www.artisanind.com/vs/docs/vacuum_systems.pdf
- [4] **Manikanda Kumaran R, Sundararajan T, Raja Manohar D.** (2009). Pressure Variation in Thrust Chamber during High Altitude Simulation
- [5] **Hany A. M. Al-Ansary.** (2004). Invertigation and Improvement of Ejector-Driven Heating and Refrigerating System. Georgia Institute of Technology.
- [6] **Yveline Marnier Antonio, Christelle Périlhon, Georges Descombes, Claude Chacoux.** (2012). Thermodynamic Modelling of an Ejector with Compressible Flow by a One-Dimensional Approach
- [7] **Hisham El-Dessouky, Hisham Ettouney, Imad Alatiqi, Ghada Al-Nuwaibit.** (2011). Evaluation of steam jet ejectors.
- [8] **Navid Sharifi, Masoud Boroomand, Majid Sharifi.** (2012) Numerical Investigation of the Effects of Steam Nucleation on the Steam Ejectors Performance.
- [9] **Derick Thomas Daniel.** (2010). A General Simulation of an Air Ejector Diffuser System.
- [10] **Byung Hoon Park, Ji Hwan Lim, Woongsup Yoon.** (2008). Fluid dynamics in starting and terminating transients of zero-secondary flow ejector.
- [11] **Srisha M.V. Rao, G. Jagadeesh.** (2014). Studies on the effects of varying secondary gas properties in a low entrainment ratio supersonic ejector.
- [12] **Kranakis E. F. (1982).** The French connection: Giffard's injector and the nature of heat. Technol Cult, Vol-23, pp. 3-38
- [13] (t.y.). Eişim: 28 Mayıs 2015 <http://www.nimr.org/systems/rockets/72-001.htm>
- [14] (t.y.). Eişim: 08 Haziran 2015 http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IITKANPUR/Machine/ui/Course_home-1ec19.htm.
- [15] (t.y.). Eişim: 10 Haziran 2015 http://www.fea-optimization.com/ETBX/cdnozzle_help.htm

- [16] **Pavani Sreekireddy, Dr. T. Kishen Kumar Reddy, Venugopal Dadi, Dr. P. Bhramara.** (2012). CFD Simulation of Steam Ejector System in High Altitude Test (HAT) Facility.
- [17] **R. Manikanda Kumaran, P. K. Vivekanand, T. Sundararajan, K. Kumaresan, D. Raja Manohar.** (2009). Optimization of Second Throat Ejectors for High-Altitude Test Facility.
- [18] (t.y.). Eişim:05 Haziran 2015 <http://www.erogluisi.com.tr/buhar-kazani.asp>
- [19] (t.y.). Eişim: 15 Haziran 2015 <http://thermodynamics-engineer.com/nozzle-and-diffuser/>
- [20] **Mesut ÇALIŞKAN.** (2014). Eksenel akışlı fan tasarımı.
- [21] **Bruce Ralphin Rose J, Jinu GR, Brindha CJ.** (2015). A numrical optimization of high altitude testing facility for wind tunnel experiments.
- [22] **Sohrabali Ghorbanian, Shahryar Jafari Nejad.** (2011). Ejector Modeling and Examining of Posibility of Replacing Liquid Vacuum Pump in Vacuum Production Systems

EKLER

EK-A: İzentropik akış taplosu $k=1.3/ k=1.4$

EK A

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
0.00	1.00000	1.00000	$5.9E+5$	1.00000	$5.9E+5$	$2.5E+5$
0.05	0.99963	0.99875	11.72	0.99838	11.70	5.104
0.10	0.99850	0.99502	5.886	0.99353	5.848	2.576
0.20	0.99404	0.98026	2.994	0.97441	2.917	1.334
0.25	0.99071	0.96937	2.426	0.96037	2.330	1.095
0.30	0.98668	0.95629	2.054	0.94355	1.938	0.94106
0.35	0.98196	0.94111	1.793	0.92413	1.657	0.83513
0.40	0.97656	0.92399	1.602	0.90233	1.446	0.75937
0.45	0.97052	0.90507	1.459	0.87839	1.281	0.70368
0.50	0.96386	0.88452	1.348	0.85255	1.149	0.66199
0.55	0.95659	0.86250	1.261	0.82506	1.041	0.63042
0.60	0.94877	0.83920	1.193	0.79620	0.95007	0.60639
0.65	0.94040	0.81479	1.139	0.76623	0.87311	0.58811
0.70	0.93153	0.78945	1.097	0.73540	0.80691	0.57431
0.75	0.92219	0.76337	1.064	0.70397	0.74933	0.56403
0.80	0.91241	0.73671	1.040	0.67218	0.69876	0.55658
0.85	0.90222	0.70965	1.021	0.64026	0.65398	0.55140
0.90	0.89166	0.68234	1.009	0.60842	0.61402	0.54808
0.95	0.88077	0.65494	1.002	0.57685	0.57814	0.54628
1.0	0.86957	0.62759	1.000	0.54573	0.54573	0.54573
1.05	0.85809	0.60041	1.002	0.51521	0.51630	0.54621
1.10	0.84638	0.57353	1.008	0.48542	0.48946	0.54755
1.15	0.83446	0.54705	1.018	0.45649	0.46487	0.54961
1.20	0.82237	0.52106	1.032	0.42850	0.44226	0.55225
1.25	0.81013	0.49565	1.049	0.40154	0.42140	0.55537
1.30	0.79777	0.47089	1.070	0.37566	0.40209	0.55890
1.35	0.78531	0.44683	1.095	0.35090	0.38416	0.56275
1.40	0.77280	0.42353	1.123	0.32730	0.36748	0.56687
1.45	0.76024	0.40102	1.154	0.30487	0.35191	0.57120
1.50	0.74766	0.37933	1.189	0.28361	0.33735	0.57570
1.55	0.73509	0.35849	1.228	0.26352	0.32372	0.58033
1.60	0.72254	0.33849	1.271	0.24457	0.31091	0.58505
1.65	0.71004	0.31935	1.318	0.22675	0.29887	0.58985

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
1.70	0.69759	0.30107	1.369	0.21003	0.28753	0.59468
1.75	0.68522	0.28365	1.424	0.19436	0.27682	0.59953
1.80	0.67295	0.26706	1.484	0.17972	0.26671	0.60439
1.85	0.66077	0.25129	1.549	0.16605	0.25715	0.60924
1.90	0.64872	0.23633	1.618	0.15331	0.24808	0.61406
1.95	0.63679	0.22215	1.693	0.14147	0.23949	0.61885
2.00	0.62500	0.20874	1.773	0.13046	0.23133	0.62359
2.25	0.56838	0.15210	2.268	0.086453	0.19609	0.64636
2.50	0.51613	0.11029	2.954	0.056923	0.16818	0.66722
2.75	0.46852	0.079879	3.892	0.037425	0.14567	0.68597
3.00	0.42553	0.057957	5.160	0.024663	0.12725	0.70266
3.25	0.38694	0.042216	6.857	0.016335	0.11201	0.71742
3.50	0.35242	0.030918	9.110	0.010896	0.099263	0.73045
3.75	0.32161	0.022791	12.07	0.00733	0.088503	0.74193
4.00	0.29412	0.016920	15.94	0.00498	0.079346	0.75206
4.25	0.26959	0.012657	20.95	0.00341	0.071497	0.76101
4.50	0.24768	0.00954	27.39	0.00236	0.064723	0.76893
4.75	0.22808	0.00725	35.59	0.00165	0.058841	0.77596
5.00	0.21053	0.00555	45.96	0.00117	0.053704	0.78221
5.25	0.19477	0.00428	58.98	0.000834	0.049195	0.78779
5.50	0.18059	0.00333	75.22	0.000601	0.045217	0.79278
5.75	0.16780	0.00261	95.34	0.000437	0.041692	0.79725
6.00	0.15625	0.00205	$1.2E+2$	0.000321	0.038555	0.80128
6.25	0.14579	0.00163	$1.5E+2$	0.000238	0.035752	0.80491
6.50	0.13629	0.00130	$1.9E+2$	0.000178	0.033238	0.80819
6.75	0.12764	0.00105	$2.3E+2$	0.000134	0.030976	0.81117
7.00	0.11976	0.000847	$2.9E+2$	0.000101	0.028932	0.81388
7.25	0.11256	0.000689	$3.5E+2$	$7.75E-5$	0.027082	0.81635
7.50	0.10596	0.000563	$4.3E+2$	$5.97E-5$	0.025400	0.81860
7.75	0.099906	0.000463	$5.2E+2$	$4.62E-5$	0.023868	0.82066
8.00	0.094340	0.000382	$6.2E+2$	$3.61E-5$	0.022469	0.82256
8.25	0.089211	0.000317	$7.5E+2$	$2.83E-5$	0.021188	0.82430
8.50	0.084477	0.000265	$9.0E+2$	$2.23E-5$	0.020011	0.82590

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
8.75	0.080100	0.000222	$1.1E+3$	$1.77E-5$	0.018929	0.82738
9.00	0.076046	0.000186	$1.3E+3$	$1.42E-5$	0.017932	0.82875
9.25	0.072284	0.000157	$1.5E+3$	$1.14E-5$	0.017010	0.83002
9.50	0.068788	0.000133	$1.8E+3$	$9.17E-6$	0.016157	0.83120
9.75	0.065533	0.000113	$2.1E+3$	$7.44E-6$	0.015366	0.83229
10.0	0.062500	$9.69E-5$	$2.4E+3$	$6.06E-6$	0.014631	0.83331
20.0	0.016393	0.0	$2.0E+5$	0.0	0.00375	0.84867
30.0	0.00735	0.0	$2.9E+6$	0.0	0.00167	0.85165
40.0	0.00415	0.0	$2.0E+7$	0.0	0.000942	0.85271
50.0	0.00266	0.0	$8.7E+7$	0.0	0.000604	0.85320

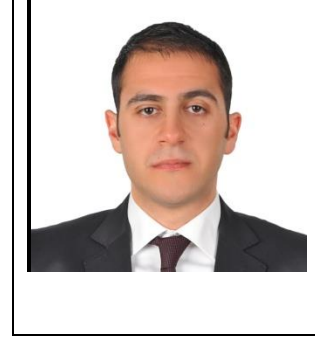
İzentropik akış taplosu k=1.4

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
0.0	1.00000	1.00000	$5.8E+5$	1.00000	$5.8E+5$	$2.4E+5$
0.05	0.99950	0.99875	11.59	0.99825	11.57	4.838
0.1	0.99800	0.99502	5.822	0.99303	5.781	2.443
0.20	0.99206	0.98028	2.964	0.97250	2.882	1.268
0.25	0.98765	0.96942	2.403	0.95745	2.300	1.042
0.30	0.98232	0.95638	2.035	0.93947	1.912	0.89699
0.35	0.97609	0.94128	1.778	0.91877	1.634	0.79738
0.40	0.96899	0.92427	1.590	0.89561	1.424	0.72632
0.45	0.96108	0.90551	1.449	0.87027	1.261	0.67423
0.50	0.95238	0.88517	1.340	0.84302	1.130	0.63535
0.55	0.94295	0.86342	1.255	0.81417	1.022	0.60602
0.60	0.93284	0.84045	1.188	0.78400	0.93155	0.58377
0.65	0.92208	0.81644	1.136	0.75283	0.85493	0.56692
0.70	0.91075	0.79158	1.094	0.72093	0.78896	0.55425
0.75	0.89888	0.76604	1.062	0.68857	0.73155	0.54485
0.80	0.88652	0.73999	1.038	0.65602	0.68110	0.53807
0.85	0.87374	0.71361	1.021	0.62351	0.63640	0.53338

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
0.90	0.86059	0.68704	1.009	0.59126	0.59650	0.53039
0.95	0.84710	0.66044	1.002	0.55946	0.56066	0.52877
1.0	0.83333	0.63394	1.000	0.52828	0.52828	0.52828
1.05	0.81934	0.60765	1.002	0.49787	0.49888	0.52871
1.10	0.80515	0.58170	1.008	0.46835	0.47207	0.52989
1.15	0.79083	0.55616	1.017	0.43983	0.44751	0.53169
1.20	0.77640	0.53114	1.030	0.41238	0.42493	0.53399
1.25	0.76190	0.50670	1.047	0.38606	0.40411	0.53670
1.30	0.74738	0.48290	1.066	0.36091	0.38484	0.53974
1.35	0.73287	0.45980	1.089	0.33697	0.36697	0.54305
1.40	0.71839	0.43742	1.115	0.31424	0.35036	0.54655
1.45	0.70398	0.41581	1.144	0.29272	0.33486	0.55022
1.50	0.68966	0.39498	1.176	0.27240	0.32039	0.55401
1.55	0.67545	0.37495	1.212	0.25326	0.30685	0.55788
1.60	0.66138	0.35573	1.250	0.23527	0.29414	0.56182
1.65	0.64746	0.33731	1.292	0.21839	0.28221	0.56578
1.70	0.63371	0.31969	1.338	0.20259	0.27099	0.56976
1.75	0.62016	0.30287	1.386	0.18782	0.26042	0.57373
1.80	0.60680	0.28682	1.439	0.17404	0.25044	0.57768
1.85	0.59365	0.27153	1.495	0.16119	0.24102	0.58161
1.90	0.58072	0.25699	1.555	0.14924	0.23211	0.58549
1.95	0.56802	0.24317	1.619	0.13813	0.22367	0.58932
2.00	0.55556	0.23005	1.688	0.12780	0.21567	0.59309
2.25	0.49689	0.17404	2.096	0.086482	0.18130	0.61095
2.50	0.44444	0.13169	2.637	0.058528	0.15432	0.62693
2.75	0.39801	0.099939	3.338	0.039777	0.13276	0.64099
3.00	0.35714	0.076226	4.235	0.027224	0.11528	0.65326
3.25	0.32129	0.058510	5.369	0.018798	0.10093	0.66393
3.50	0.28986	0.045233	6.790	0.013111	0.089018	0.67320
3.75	0.26230	0.035235	8.552	0.00924	0.079035	0.68127
4.00	0.23810	0.027662	10.72	0.00659	0.070595	0.68830
4.25	0.21680	0.021886	13.36	0.00474	0.063401	0.69444
4.50	0.19802	0.017449	16.56	0.00346	0.057227	0.69983

M	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{A \times P}{A^* \times P_0}$	$\frac{F}{F^*}$
4.75	0.18141	0.014016	20.41	0.00254	0.051891	0.70458
5.00	0.16667	0.011340	25.00	0.00189	0.047251	0.70876
5.25	0.15355	0.00924	30.45	0.00142	0.043194	0.71248
5.50	0.14184	0.00758	36.87	0.00107	0.039628	0.71578
5.75	0.13136	0.00625	44.40	0.000822	0.036477	0.71872
6.00	0.12195	0.00519	53.18	0.000633	0.033682	0.72136
6.25	0.11348	0.00434	63.37	0.000492	0.031191	0.72372
6.50	0.10582	0.00364	75.13	0.000385	0.028962	0.72586
6.75	0.098888	0.00308	88.66	0.000304	0.026960	0.72779
7.00	0.092593	0.00261	$1.0E+2$	0.000242	0.025156	0.72953
7.25	0.086862	0.00222	$1.2E+2$	0.000193	0.023525	0.73112
7.50	0.081633	0.00190	$1.4E+2$	0.000155	0.022046	0.73257
7.75	0.076849	0.00164	$1.6E+2$	0.000126	0.020700	0.73389
8.00	0.072464	0.00141	$1.9E+2$	0.000102	0.019473	0.73510
8.25	0.068435	0.00123	$2.2E+2$	$8.38E-5$	0.018350	0.73620
8.50	0.064725	0.00107	$2.5E+2$	$6.90E-5$	0.017321	0.73723
8.75	0.061303	0.000930	$2.9E+2$	$5.70E-5$	0.016375	0.73817
9.00	0.058140	0.000815	$3.3E+2$	$4.74E-5$	0.015504	0.73903
9.25	0.055210	0.000716	$3.7E+2$	$3.95E-5$	0.014700	0.73984
9.50	0.052493	0.000631	$4.2E+2$	$3.31E-5$	0.013957	0.74058
9.75	0.049969	0.000558	$4.8E+2$	$2.79E-5$	0.013268	0.74127
10.0	0.047619	0.000495	$5.4E+2$	$2.36E-5$	0.012628	0.74192
20.0	0.012346	$1.69E-5$	$1.5E+4$	0.0	0.00322	0.75151
30.0	0.00552	$2.27E-6$	$1.1E+5$	0.0	0.00143	0.75335
40.0	0.00312	0.0	$4.8E+5$	0.0	0.000808	0.75401
50.0	0.00200	0.0	$1.5E+6$	0.0	0.000517	0.75431

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Berkan ERKAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa 21.08.1987

Adres: İstanbul

E-Posta: berkanerkan87@gmail.com

Lisans: İTÜ-Uzay Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Tarkim Havacılık –Mühendis (2011-2012),

THY A.O – II. Pilot (2013-...),

Uçak ve Uzay Mühendisliği kulübü başkan yardımcılığı,

CanSat Uydu Yarışması 11.'liği (2011).