



T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN EJEKTÖR TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ

UĞUR ÇATIK

Ağustos 2016

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN EJEKTÖR TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ

UĞUR ÇATIK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Ağustos 2016

Uğur ÇATIK tarafından Prof. Dr. Yüksel KAPLAN danışmanlığında hazırlanan “KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN EJEKTÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN, Aksaray Üniversitesi,

Üye : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN , Niğde Üniversitesi,

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur ÇATIK

ÖZET

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN EJEKTÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

ÇATIK, Uğur

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Ağustos 2016, 70 sayfa

Katı oksit yakıt pilleri (KOYP), yüksek enerji dönüşüm verimleri ve birçok yakıtı başarı ile kullanabilmesi nedenleri ile son yıllarda en çok dikkat çeken enerji dönüşüm teknolojilerinden biridir. Bunun yanı sıra basit bir reformlama işlemi sonrasında sıvı (etanol, metanol, dizel, benzin vs.) veya gaz (doğal gaz, propan, butan vs.) hidrokarbonlar KOYP’de yakıt olarak kullanılabilir. Yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 900°C), ve buharca zengin (kütlesel olarak %40–45) anot egzoz gazı, hidrokarbonları parçalamak için bir ejektörle sisteme geri döndürülebilmektedir. Bu çalışmada, yakıt kullanım miktarının artırılması ve üretilen ısı enerjisi ve su buharının reformlama işleminde kullanılması için bir ejektör geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki yöntemler takip edilerek; 500W elektriksel güç kapasitesine sahip, metan ile çalışan bir KOYP anot egzoz gazlarının resirkülasyonunda kullanılmak üzere bir ejektör tasarlanmıştır. Tasarlanan ejektörün nozul kısmının çalışma koşullarındaki performansı COMSOL MULTIPHYSICS yazılımıyla sayısal olarak incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Katı oksit yakıt pili, anot gazı sirkülasyonu, ejektör geliştirilmesi

SUMMARY

EJECTOR DESIGN AND DEVELOPMENT FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS

ÇATIK, Uğur

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

August 2016, 70 pages

Solid oxide fuel cells (SOFCs) are one of the energy conversion technologies that have been recently taken much attention due to the high energy conversion efficiency and fuel flexibility. As well as after a simple reforming process liquid (ethanol, methanol, diesel, gasoline, etc.) or gas (natural gas, propane, butane, etc.) hydrocarbons can be used as fuel in sofc. Anode exhaust is rich in steam (about 40–45% in mass) and high in temperature (about 900°C), which can be recycled by an ejector to degrade hydrocarbons. In this study, an ejector is intended to be improved in order to increase the fuel utilization and use the heat energy and steam produced in the cell for the reforming reaction. Following methods available in the literature, an ejector with 500W electrical power capacity and operated with metan was designed for the recirculation of anode gas. Designed ejector nozzle performance at operating conditions has been investigated numerically using COMSOL Multiphysics software.

Keywords: Solid oxide fuel cell, anode gas recirculation, ejector development

ÖN SÖZ

Yakıt pili ile miliwatlardan megawatlara güç üretimi mümkün olduğundan cep telefonundan, bir fabrikanın veya büyük yerleşim alanlarına kadar çok geniş aralıktaki uygulamalar için enerji üretimi mümkün olmaktadır. Enerji üretim ve dağıtımını daha esnek ve merkezilikten uzak duruma getirmesi yakıt pillerinin gelişiminde en büyük itici gücü oluşturmuştur. Önümüzdeki yıllarda büyük güç santralleri yerlerini daha bağımsız ve daha küçüklerine terk edeceklerdir. Pek de uzak olmayan bir gelecekte yüksek gerilim taşıyan elektrik nakil hatları ortadan kalkacaktır.

Enerjinin kolay ve ucuza mal olması buna bağlı olarak ulaşımdan gıdaya ısınmadan elektroniğe hemen tüm ürünlerin maliyetlerini aşağılara çekecektir. Günümüz dünyasında bu konudaki en büyük umut hidrojen kaynaklı yakıtlar ve bunların elektrokimyasal olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yakıt pilleridir.

Tüm dünyada yakıt pilleri üzerinde çalışmalar çok yoğun bir şekilde sürerken ülkemizde konu ile ilgili çalışmalar son yıllarda hızla artmıştır. Son yıllarda dünyanın önde gelen pek çok ülkesi yakıt pillerinin araştırılmasını öncelikli konular arasına almış ve bu araştırmalar için çok büyük maddi kaynaklar ayırmıştır. Ülkemizde de TÜBİTAK destekleriyle gerek üniversitelerde gerekse firmalarda yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmalar ivme kazanmıştır. Katı oksit yakıt pilleri özellikle doğal gaz ve diğer hidrokarbon temelli yakıtları kullanabilmeleri ve yüksek verimleriyle ve modüler yapılarıyla küçük ve büyük ölçekli güç istasyonları için temiz bir alternatiftir. Basit bir reformlama işlemi sonrasında hidrokarbon temelli yakıtlar KOYP’de yakıt olarak kullanılabilir. Hidrokarbon yakıtların hidrojen zengin gaz karışımına dönüştürüldüğü reformlama işlemi için ise su buharına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu durumda sistem, dışarıdan bir su beslemesine ve bu suyun buharlaştırılması için gerekli olan bir buharlaştırma ünitesine ihtiyaç duymaktadır. Sistemde ek bir ünitenin varlığı hem sistem maliyetini arttırmakta hem de sistemi daha karmaşık bir hale getirmektedir. Bu durumun önüne anot egzoz gazının reformer girişine geri beslenmesi ile geçilebilmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında anot egzoz gazının geri beslemesinde kullanılmak amacıyla ejektör sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Danışman hocam Prof. Dr. Yüksel KAPLAN'a güler yüzünü, engin bilgilerini, hayat tecrübesini, hiçbir zaman esirgemediği ve çalışmalarım boyunca her türlü imkânı sağladığından dolayı sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca altyapı ve imkânlarından faydalandığım Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi yönetimine, 213M030 numaralı proje kapsamındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca değerli fikirleriyle yol gösteren Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS'a Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK' a, Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK'e ve Arş. Gör. Ömer GENÇ'e teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatımın her döneminde destekleriyle yanımda olan, beni sabırla yetiştiren, şefkatlerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	iv
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Katı Oksit Yakıt Pilleri	3
1.3 Ejektör.....	4
1.3.1 Sabit alan modeli.....	7
1.3.2 Sabit basınç modeli	8
1.3.3 Sabit oranda momentum değişim (somp) modeli	9
1.4 Ejektör Kullanım Alanları.....	11
1.4.1 Katı oksit yakıt pillerinde ejektör kullanımı	14
1.5 Motivasyon	16
1.6 Tez İçeriği	16
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	17
BÖLÜM III MATEMATİKSEL MODELLEME	22
3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	22
3.2 Matematiksel Model	23
3.2.1 Karışım bölgesi hesaplamaları.....	26
3.3 Ejektör Tasarımı	30
BÖLÜM IV NÜMERİK ANALİZ	32

BÖLÜM V SONUÇLAR.....	34
BÖLÜM VI SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	49
KAYNAKLAR	50
ÖZ GEÇMİŞ	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Lüle ve yayıcılardaki izentropik akışa ait özelliklerin oranları	28
Çizelge 3.2. Metanın giriş basıncına göre kritik alan ve çap hesabı.....	29
Çizelge 4.1. Modelleme parametreleri için varsayılan değerler	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sabit momentum karışımli ejektör dizaynı.....	5
Şekil 1.2. Ejektörün çalışma durumları	5
Şekil 1.3. Sabit alan modeli (sumeru vd., 2012).....	7
Şekil 1.4. Ejektör içerisindeki hız ve basınç profili (sumeru vd., 2012)	8
Şekil 1.5. Sabit basınç modeli (sumeru vd., 2012)	9
Şekil 1.6. Sabit oranda momentum değişim modeli (kumar vd., 2013)	9
Şekil 1.7. Geleneksel ve somd modellenli ejektörlerde eksen boyunca mach sayısı değişimi	10
Şekil 1.8. Geleneksel ejektör geometrisi ve ejektör boyunca toplam ve statik basınç değişimi.....	11
Şekil 1.9. Jet-pompa (ejektörlü) soğutma sisteminin şematik görünümü.....	12
Şekil 1.10. Ejektörün güneş enerjisi sistemlerinde kullanımı.....	13
Şekil 1.11. Pem hücresinde ejektör kullanımı	13
Şekil 1.12. Katı oksit yakıt pilinde ejektör kullanımı	15
Şekil 1.13. Katı oksit yakıt pili sistem elemanları	15
Şekil 3.1. Cfd modellemenin özeti.....	23
Şekil 3.2. Somd difüzör geometrisi	24
Şekil 3.3. Nozul kritik alan ve çap	29
Şekil 3.4. Ejektör üzerindeki geometrik tanımlamalar	30
Şekil 3.5. Tasarımı yapılan ejektör geometrisi	31
Şekil 5.1. Sesüstü lülede mach sayısı, sıcaklık ve basıncın lüle boyunca değişimi.....	34
Şekil 5.2. Sesüstü lüle tasarımı	35
Şekil 5.3. Giriş basıncı bir bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi..	36
Şekil 5.4. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi ..	36
Şekil 5.5. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi	37
Şekil 5.6. Giriş basıncı beş bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi .	37
Şekil 5.7. Farklı giriş basınçlarında sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi.....	38
Şekil 5.8. Giriş basıncı iki bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi.....	38
Şekil 5.9. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi	39
Şekil 5.10. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi	39

Şekil 5.11. Giriş basıncı beş bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi	40
Şekil 5.12. Farklı giriş basınçlarında sesüstü lüle boyunca basınç değişimi	40
Şekil 5.13. Giriş basıncı bir bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	41
Şekil 5.14. Giriş basıncı iki bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	41
Şekil 5.15. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	42
Şekil 5.16. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	42
Şekil 5.17. Giriş basıncı beş bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	43
Şekil 5.18. Farklı giriş basınçlarında sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi	43
Şekil 5.19. Farklı giriş sıcaklıklarının sesüstü lüle boyunca değişimi	44
Şekil 5.20. Sesüstü lüle uzunluğunun (45.37 mm) mach sayısı değişimine etkisi	44
Şekil 5.21. Sesüstü lüle uzunluğunun(47 mm) mach sayısı değişimine etkisi	45
Şekil 5.22. Sesüstü lüle uzunluğunun(49 mm) mach sayısı değişimine etkisi	45
Şekil 5.23. Sesüstü lüle uzunluğunun(51 mm) mach sayısı değişimine etkisi	46
Şekil 5.24. Sesüstü lüle uzunluğunun(53 mm) mach sayısı değişimine etkisi	46
Şekil 5.25. Sesüstü lüle uzunluğunun(55 mm) mach sayısı değişimine etkisi	47
Şekil 5.26. Sesüstü lüle uzunluğunun mach sayısı değişimine etkisi	47
Şekil 5.27. Sesüstü lüle uzunluğunun basınç değişimine etkisi	48
Şekil 5.28. Sesüstü lüle uzunluğunun sıcaklık değişimine etkisi	48

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
λ	Momentum değişim oranı
R_m	Sürüklenme oranı
m_g	Birincil akış debisi
$^{\circ}C$	Santigrat derece
cm	Santimetre
C_p	Özgül ısı
D	Hidrolik çap
f	Darcy friction factör
K	Duvar pürüzlülüğü
L_d	Difüzör uzunluğu
L_m	Karışım bölgesi uzunluğu
L_s	Nozul çıkışı ile karışım bölgesi arasındaki mesafe
m_p	Birincil akış kütleli debisi
m_s	İkincil akış kütleli debisi
P	Basınç
P_c^*	Kritik basınç
T	Sıcaklık
T_0	Giriş sıcaklığı
V	Hız
V_m	Karışım hızı
$V_{n,e}$	Nozul çıkış hızı
V_s	İkincil akış hızı
w	Sürüklenme oranı
α_1	İraksak nozul açısı
α_2	Emme bölgesi açısı
γ	Özgül ısılar oranı
ρ	Yoğunluk
β	Sabit

Kısaltmalar	Açıklama
A	Alan
AC	Alternative Current
AYP	Alkalin Yakıt Pili
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
DC	Direct Current
EKYP	Eriyik karbonat yakıt pili
FAYP	Fosforik asit yakıt pili
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
kW	Kilovat
M	Mach Sayısı
mW	Miliwatts
PEM	Proton Exchange Membrane
SO ₂	Kükürtdioksit
SOMD	Sabit Oranda Momentum Değişim
YSZ	Yitriya Stabilize Zirkonya

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Giriş

Hızla artan nüfus ve gelişen sanayi ile birlikte enerji gereksinimi kısıtlı kaynaklarla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark giderek artmaktadır. Öte yandan petrol, doğalgaz, kömür ve nükleer enerji gibi “yenilenemeyen”, geleneksel enerji kaynakları çevre ve insan sağlığını tehdit eder hale gelmiştir. Günümüzde dünya enerji üretiminde petrol, doğal gaz ve kömür gibi yenilenemeyen enerji kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji gereksiniminin %80’ i petrol, kömür, doğalgaz vb. fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO_2) miktarı ormanların azalmasıyla giderek artmakta, bu sebeple atmosferdeki diğer gazlarla birlikte güneş ışınlarının yansımını engel olmaktadır. Bu durum, “sera etkisi” oluşturmakta ve iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan gazlardan biri olan karbonmonoksit (CO) vücuttaki oksijen oranını azaltarak ölümlere yol açarken, kükürtdioksit (SO_2) kansere neden olmaktadır.

Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması, sürekli artan enerji talebini karşılamakta yetersiz kalacağı öngörüsü ve yarattığı çevresel problemler nedeniyle klasik yöntemlerle enerji üretimine alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı tüm dünyada alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar hızla artmakta, bu noktada karşımıza yakıt pilleri ve hidrojen teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar yoğunlukla çıkmaktadır.

Bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen, sadece bir proton ve elektrondan oluşan en basit konfigürasyona sahip olması ve evrende bol miktarda bulunmasından dolayı gelecek yıllarda fosil yakıt kaynaklarının yerini alacak alternatif bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Yakıt olarak kullanıldığında atık ürün olarak sadece su veya su buharı oluşturmaktadır. Bilinen tüm yakıtlar arasında birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğuna da sahiptir.

Tüm bu özellikleri hidrojeni diğer yakıtla kıyaslandığında daha avantajlı hale getirmiş ve elektrik enerjisi üretmek için yakıt pilleriyle kullanılan uygulamalara olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmıştır.

Yakıt pilleri, yakıt olarak hidrojen ve oksitleyici olarak oksijen ya da hava kullanarak elektrokimyasal reaksiyonlarla kimyasal enerjiyi herhangi bir ara basamağa ihtiyaç olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı yakıt pili sistemlerinde atık olarak sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Bu yönüyle yakıt pilleri elektrik enerjisi üretirken çevreye de zarar vermemektedir.

Günümüzde yakıt pilleri;

1. Sabit güç uygulamaları

- Güç üretim istasyonları
- Yedek üniteler
- Kombine ısı ve güç üretim sistemi olarak konutsal uygulamalarda kullanım

2. Ulaşım uygulamaları

- Otobüsler, kamyon ve arabalar
- Havaalanı içindeki terminal araçları

3. Taşınabilir uygulamalar

- Diz üstü bilgisayarlar

vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Hooger, 2003).

Yakıt pillerinin sınıflandırması genel olarak elektrolit yapısına göre yapılmaktadır. Elektrolit yapılarıyla sınıflandırılmış 5 farklı yakıt pili türü vardır. Bunlar, katı oksit yakıt pili (KOYP), polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMYP), alkalın yakıt pili (AYP), fosforik asit yakıt pili (FAYP), eriyik karbonat yakıt pili (EKYP) olarak sıralanabilir. Yakıt pilleri geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde gün geçtikçe KOYP'ler üzerine yoğun çalışmalar ilgi çekmektedir. Ülkemizde de VESTEL, NİĞDE Üniversitesi ile birlikte KOYP üzerine yoğun çalışmalar yapmaktadır.

1.2 Katı Oksit Yakıt Pilleri

Katı oksit yakıt pilleri, çalışma sıcaklığı yaklaşık 600-1000°C olan, yüksek verimle kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren elektrokimyasal aygıtlardır. Yakıt pilleri arasında yüksek çalışma sıcaklığına sahip olan katı oksit yakıt pili (KOYP), yüksek enerji dönüşüm verimi ile ön plana çıkmaktadır. Bunun yanı sıra basit bir reformlama işlemi sonrasında sıvı (etanol, metanol, dizel, benzin vs.) veya gaz (doğal gaz, propan, butan vs.) hidrokarbonlar KOYP’de yakıt olarak kullanılabilir (Stambouli ve Traversa, 2002; Singhal, 2007). Hidrokarbon yakıtların hidrojen zengin gaz karışımına dönüştürüldüğü reformlama işlemi için ise su buharı gerekmektedir. Fakat bu durumda sistem, dışarıdan bir su beslemesine ve bu suyun buharlaştırılması için gerekli olan bir buharlaştırma ünitesine ihtiyaç duymaktadır. Sisteme ek bir ünitenin montajı sistem maliyetini arttıracak gibi sistemi de daha karmaşık bir hale getirmektedir (E. Riensche vd., 1998). Bu durumun önüne anot egzoz gazının reformer girişine geri beslenmesi ile geçilebilmektedir.

Bu sayede anot elektrokimyasal reaksiyonu sonrasında ortaya çıkan su buharı ile reformlama için gerekli olan su buharı ihtiyacı karşılanacak gibi sisteme beslenen yakıttaki azalma ve yakıt tüketim katsayısındaki artış sayesinde sistem elektrik verimi de yükselecektir (U. Dietrich, 2011; M. Noponen vd., 2007). Öte yandan elektrik verimindeki artışa rağmen stak yakıt tüketimi düşük/sabit olarak kalacağı bu durumun, uzun bir stak ömrü için gerekli ve faydalı olduğu rapor edilmiştir (Jenn-Jiang, 2015; D. Larrain vd., 2006). Fakat bu noktaki en ciddi problem, anot egzoz gazının reformer giriş hattına nasıl besleneceği olarak görülmektedir. Anot egzoz gazının yüksek sıcaklığının yanı sıra reformer hattına göre daha düşük olan basıncı aşılması gereken iki engel olarak ön plana çıkmaktadır. Bu iş için gerekli ve uygun olan geri dönüşüm üfleyici veya ejektörleri ise doğrudan raflarda yerini almış bir ürün olmaktan çok henüz geliştirme aşamasındadırlar (U. Dietrich vd., 2011).

Gerek reformer için gerekse de diğer sistem elemanları için dikkat edilmesi gereken en kritik konu ise hidrokarbon yakıt içerisindeki karbonun katı halde çökmesi olup bu durum anot egzoz gazının ne kadarının geri beslemesi gerektiği ile kontrol edilebilmektedir. Sistem için yapılacak olan basit mühendislik termodinamik hesapları ile gaz içerikleri, sıcaklıklar veya karbon birikimi gibi konular tahmin edilebilir olmasına karşın, reformer katalizörünün aktivitesi, karbon çökmesinin boyutu ve genel sistem performansının bundan nasıl etkileneceği gibi konuların anlaşılması ve

sistemin karbon birikimi olmadan güvenli çalışma aralığının belirlenmesi için ciddi deneysel çalışmalar gerekmektedir.

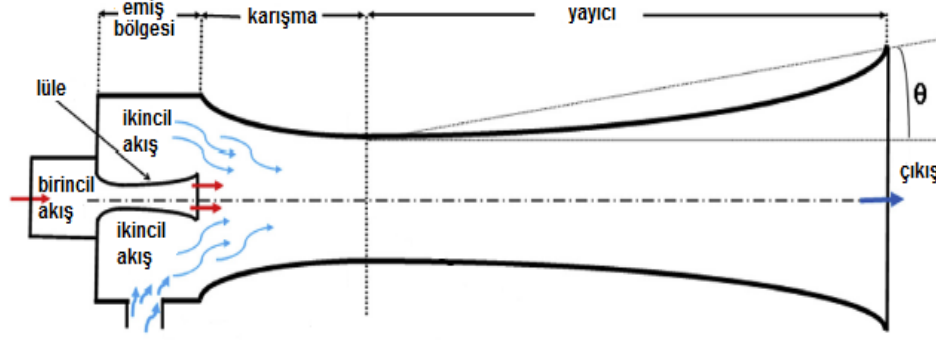
Bu kapsamda bu yüksek lisans bitirme tezinde anot egzoz gazının reformer giriş hattına beslenmesinde kullanılacak bir ejektörün yakınsak ıraksak lülelerin bulunduğu nozul kısmı tasarlanmış, modellemesi yapılmıştır.

1.3 Ejektör

Ejektörler, düşük basınçlı akışkanı akışa katmak için yüksek basınçlı akışkan jetinden faydalanan, bu iki akışkanı karıştıran ve düşük basınçlı akışkandan daha yüksek basınçta püskürten cihazlardır. Söz konusu akışkanlar su buharı, hava, gaz gibi çok çeşitli türlerde olabilir.

Ejektörler 3 basit bölümden oluşurlar; nozul (lüle), emiş bölgesi ve difüzör (yayıcı). Nozul, yüksek basınç ve düşük hızda giren akışkan basıncının düşürülmesini ve yüksek hız değerlerine çıkmasını sağlar, böylece akışkanın kinetik enerjisi artırılır. Emiş bölgesinde, düşük basınçlı akışkan alınarak yüksek basınçlı akışkan ile nozul çıkışında karıştırılması sağlanır. Difüzör ise kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüştürüldüğü bölümdür. Ejektörler basit yapılı, işletme maliyetleri düşük, hareketli parçası bulunmayan uzun ömürlü sistemlerdir.

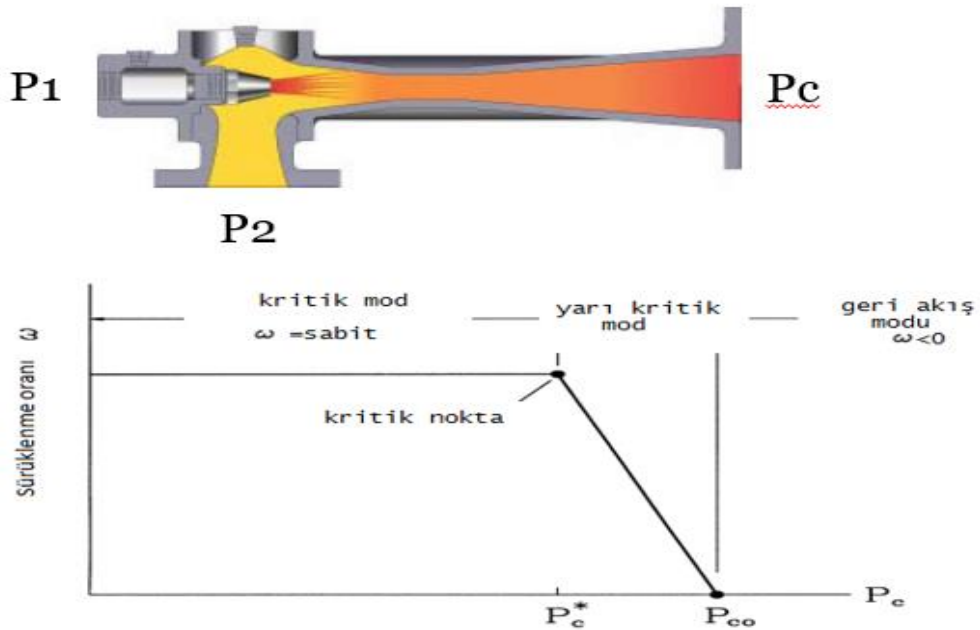
Ejektör çalışma prensibi Şekil 1.1’de verilmiştir. Yüksek basınç ve düşük hızda nozula giren birincil akışta nozul boyunca hız artar. Bu bölümde basınç azalır ve basınç enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Nozul çıkışında birincil akışın hızı ses üstü hızlara ulaşır. Birincil ve ikincil akış arasındaki basınç farkı bu bölümde vakum etkisi yaratır ve ikincil akışın emilimini sağlar. KOYP sistemi göz önüne alındığında ise birincil akış ana yakıt besleme hattı iken ikincil akış anot egzoz çıkışını ifade eder.



Şekil 1.1. Sabit momentum karışımli ejektör dizaynı

Ejektör performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri sürüklenme oranıdır. Sürüklenme oranı ejektör geometrisine, birincil akış basıncına, ikincil akış basıncına ve reformer basıncına bağlıdır. Sürüklenme oranını etkileyen bir çok faktör olmasına rağmen en çok reformer basıncından etkilenir. Verimli bir ejektör için sürüklenme oranının artması, ikincil akışkan debisi için gerekli birincil akışkanın miktarını minimize edilmesi gerekmektedir.

Birincil akışkanın basıncı, ikincil akışkanın basıncı ve reformer basıncı etkilerine göre ejektörlerin çalışmasında kritik mod, yarı kritik mod ve geri akış modu olmak üzere 3 farklı çalışma durumu vardır.(Şekil 1.2)



Şekil 1.2. Ejektörün çalışma durumları

Kritik mod: Maksimum sürüklenme oranına kritik modda ulaşılır ve reformer basıncına doğrudan bağlıdır. Kritik modda birincil akışkanın basıncı arttıkça ikincil akışkanın emilimi azalmakta belli bir noktadan sonra sabit hale gelmektedir. Reformer basıncı kritik değerden yüksek olduğu zaman sürüklenme oranı şiddetle düşer ve sıfır olur ya da sıfırın altına düşmeye devam eder ki bu durumda ejektör geri akış modunda bulunur.

Geri akış modu: Birincil akışkanın basıncının kritik değerden daha küçük olmasından dolayı ikincil akışkan emiliminin sağlanamaması durumudur. Ejektörün karışım odasındaki basınç ikincil akışkanın basıncının üzerinde ise ikincil akışkan karışım odasına girememekte ve ejektörün hiçbir yerinde şok meydana gelmemektedir. Geri akış modunda ikincil akışkan emilememekte ve ejektörün hiçbir yerinde şok oluşmamaktadır.

Yarı kritik mod: Birincil akışkanın basıncı belli bir kritik değerden yüksek olduğu durumda karışım bölgesinde birincil akışkanın basıncı, ikincil akışkanın basıncının altına düşebilmektedir. Bu basınç düşüşü sebebiyle ikincil akışkan emilmeye başlamaktadır. Eğer birincil akışkanın giriş basıncı düşükse yayıcı kısmında sadece tek bir şok meydana gelmektedir.

Katı oksit yakıt pillerinde anot egzoz gazındaki su buharının reformlama işleminde kullanılabilmesi ancak ejektörde ikincil akışkanın birincil akışkana oranının geleneksel ejektörlerle kıyaslandığında çok yüksek olması şartıyla sağlanabilir. Sistem geri beslemesi için gerekli hidrojen ve karbon monoksit anot egzoz gazında %40-45 oranında bulunan su buharının reformla işlemi sonrası elde edilir. Anot egzoz çıkışında sıcaklık genel olarak 850-900°C civarında olmakta bu sıcaklıkta reformlama reaksiyonları kendiliğinden gerçekleştiğinden dolayı sisteme dışarıdan bir enerji verilmesine gerek yoktur.

Ejektörler prensip olarak benzer çalışma şekline sahip olmasına rağmen geleneksel ejektörler ile yakıt ejektörleri karşılaştırıldığında bazı farklılıklar görülür. Bunlardan bazıları şunlardır:

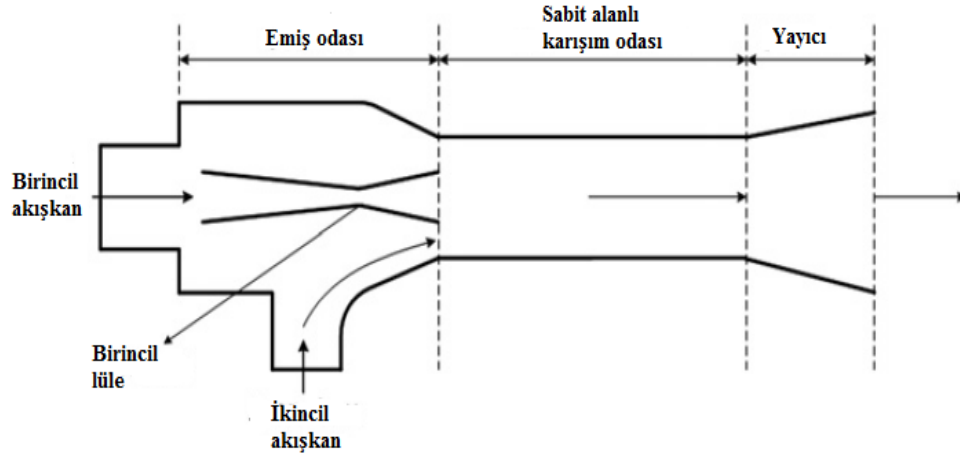
- Karışım odası ve nozul çapları oranları; akışkan türleri, sıcaklıkları ve kullanım amaçları dikkate alındığında farklılık gösterir.

- Soğutma çevriminde ikincil akışkanların buharlaştırılması genellikle vakumla oluşturulurken, KOYP’de tüm akışkan sıcaklıkları yüksek derecelerdedir.
- KOYP’de birincil akışkan sıcaklığı yaklaşık 400-500°C’ye kadar ısıtılan metan gazı (veya diğer hidrokarbonlar) iken ikincil akışkan 850-900°C civarındaki anot egzoz gazı olarak ejektörlere girmektedir. KOYP’de ayrıca geri dönüş egzoz gazı, reformlama reaksiyonu için gerekli enerjiyi de sağlamaktadır.

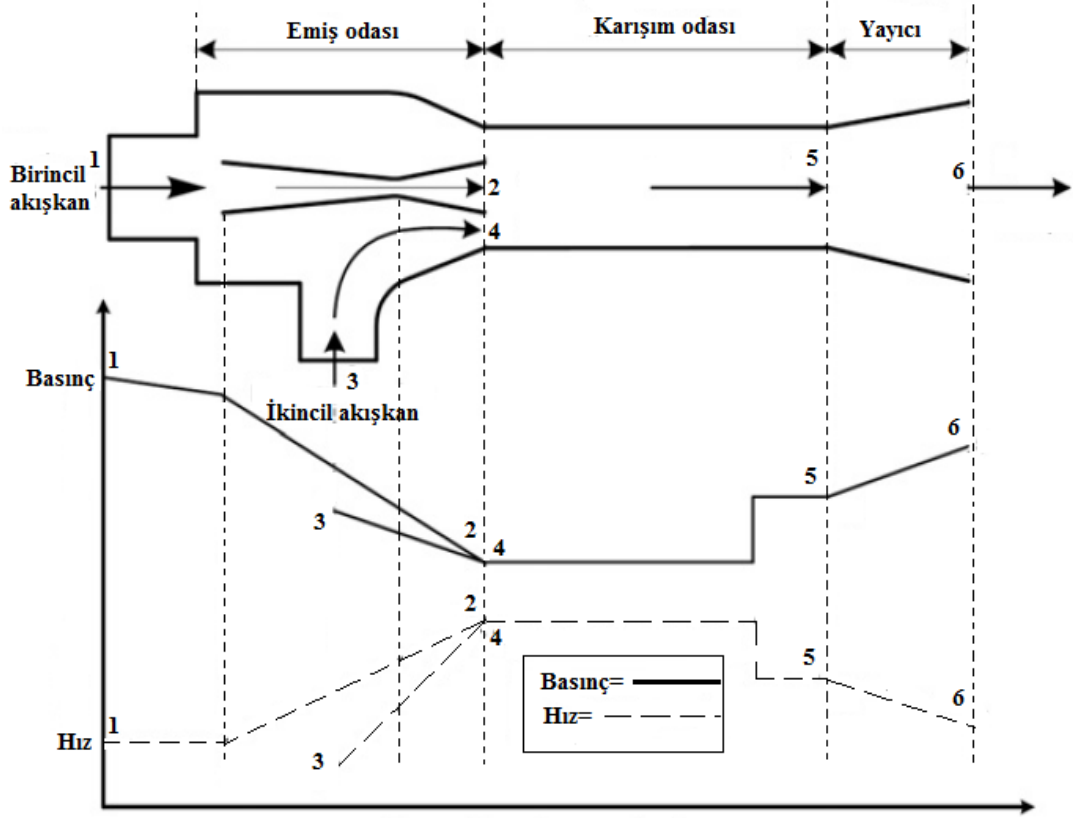
Ejektörler geometrilerine göre “Sabit Alan Modeli” ve “Sabit Basınç Modeli” ve yeni bir yaklaşım olan “Sabit Oranda Momentum Değişimi Modeli” olarak adlandırılan üç farklı modele göre tasarlanmaktadır.

1.3.1 Sabit alan modeli

Sabit alan modelinde ejektör, birincil lüle, emiş odası, sabit alanlı karışım odası ve yayıcı olmak üzere dört kısımdan oluşur ve karışım olayı sabit alanlı karışım odasında gerçekleşir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Sabit alan modeli (Sumeru vd., 2012)

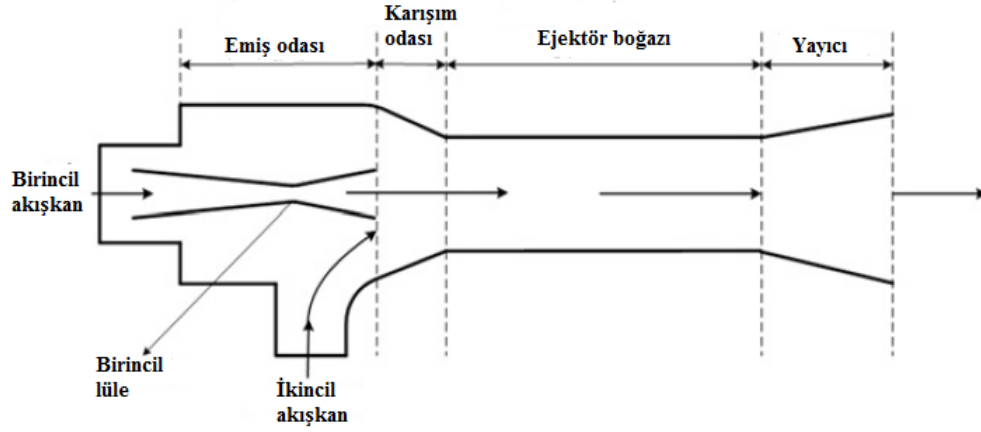


Şekil 1.4. Ejektör içerisindeki hız ve basınç profili (Sumeru vd., 2012)

Şekil 1.4 sabit alan modelli ejektör içerisindeki basınç ve hız profilini göstermektedir. Yüksek basınca sahip birincil akışkan lüle boyunca hızlandıktan sonra genişleyerek düşük basınçta lüleyi terk eder (1-2). Birincil lüle çıkışında yüksek hıza ve düşük basınca sahip birincil akışkan, ikincil akışkanın vakumlanarak (3) durumundan (4) durumuna geçmesine sebep olur. Karışım odasındaki birincil ve ikincil akışkan (5) durumunda karışım odasını terk eder. Karışım odasından sonra yayıcıya giren karışmış haldeki akışkanın hızı düşerek basıncı artar. Böylelikle karışım düşük hız ve yüksek basınçta ejektörü terk eder.

1.3.2 Sabit basınç modeli

Sabit basınç modelinde ise ejektör, birincil lüle, emiş odası, karışım odası, ejektör boğazı ve yayıcıdan oluşur. Sabit basınç modelinde karışım olayı sabit basınçta emiş bölgesinde ya da karışım odasında gerçekleşir (Şekil 1.5).

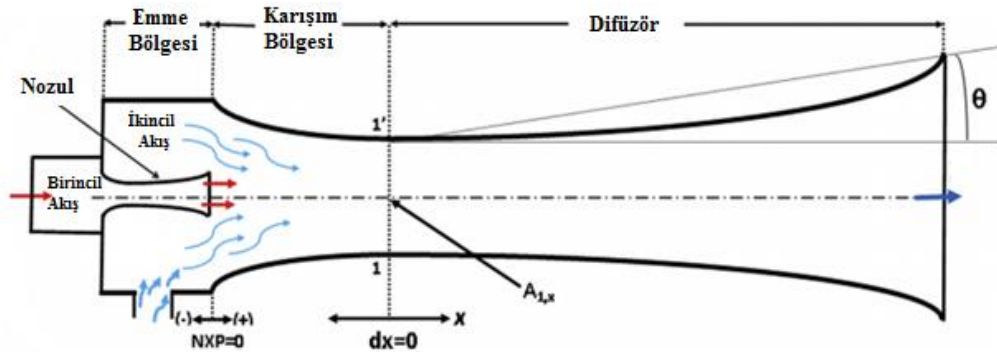


Şekil 1.5. Sabit basınç modeli (Sumeru vd., 2012)

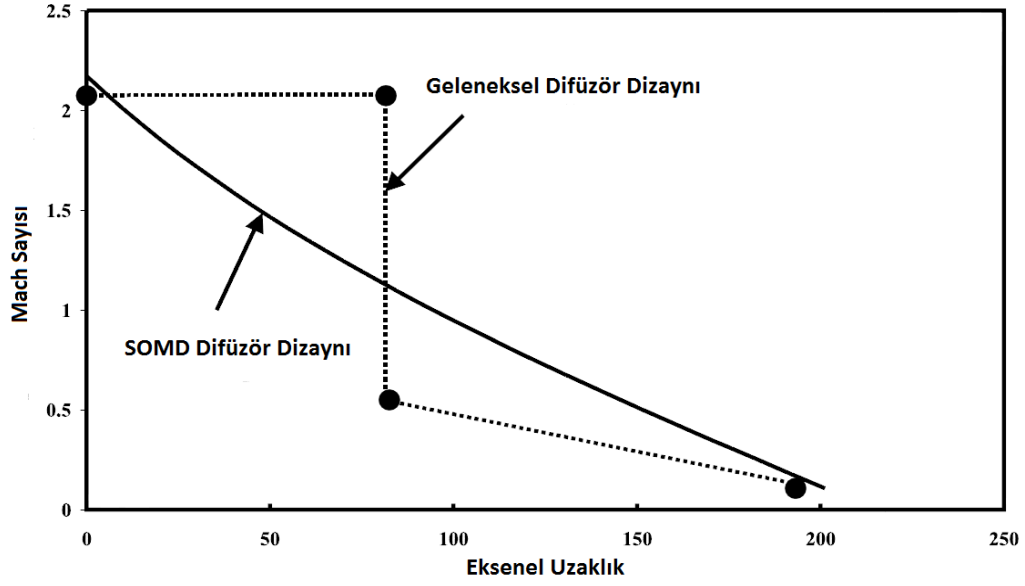
1.3.3 Sabit oranda momentum değişim (somb) modeli

Sabit Oranda Momentum Değişimi modeli süpersonik ejektörler için Eames tarafından ortaya konulan yeni bir ejektör tasarım yaklaşımıdır. Bu yaklaşım süpersonik ejektörlerin difüzör bölgesindeki akışı izantropik kabul eder. Diğer ejektör tasarım modelleriyle kıyaslandığında çalışır durumdaki ejektörde termodinamik şok dalgalarının oluşmasıyla bağlantılı olan tersinmezlikleri minimuma indirebilmesidir (Eames, 2002).

Şekil 1.6, Sabit oranda momentum değişim ilkesine göre tasarlanan bir ejektör geometrisini göstermektedir. Bu ejektörlerde hem sabit alanda karışım hem de sabit basınçta karışım ilkesine göre tasarlanan ejektörlerde olduğu gibi sabit kesitli bir alan bulunmamaktadır. Bu yaklaşımda değişken kesitli yayıcı bölümünde karışan iki gazın momentumu sabit oranda değişmekte ve bir şok meydana gelmemektedir (Şekil 1.7). Böylece diğer ejektörlerin sabit kesitinde meydana gelen şok nedeniyle ortaya çıkan basınç düşüşü elimine edilmektedir (Eames vd., 2013).



Şekil 1.6. Sabit oranda momentum değişim modeli (Kumar vd., 2013)



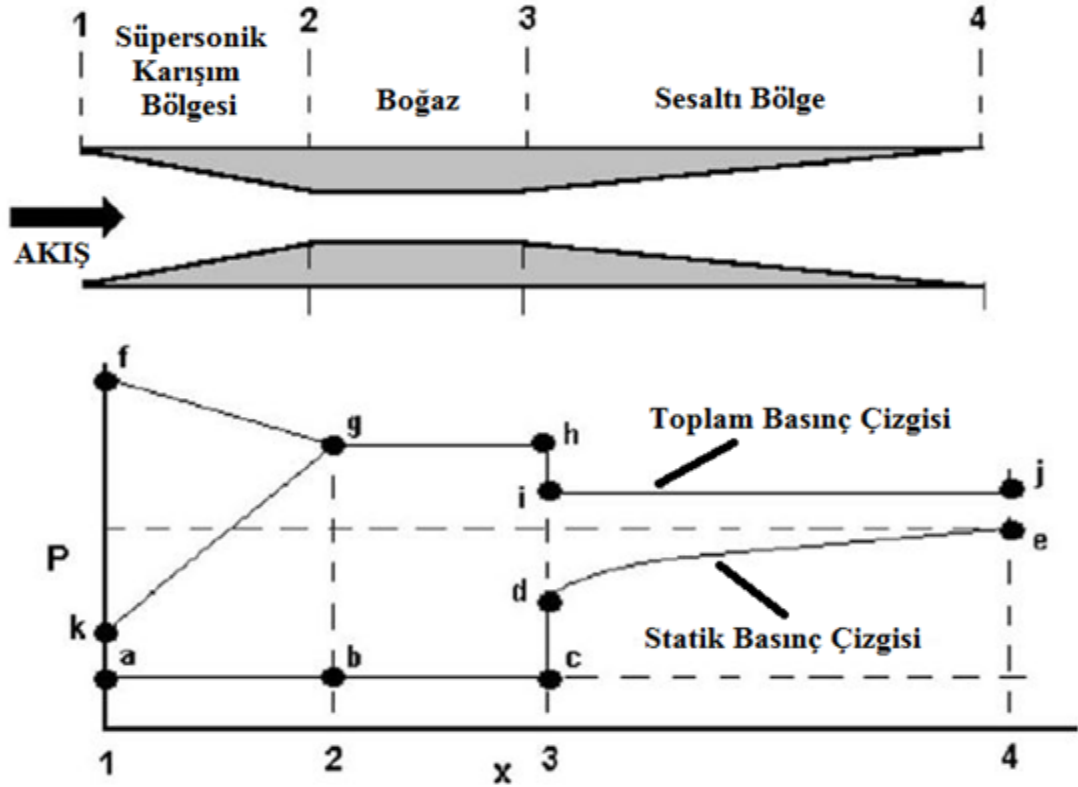
Şekil 1.7. Geleneksel ve SOMD modellenli ejektörlerde eksen boyunca mach sayısı değişimi

Şekil 1.6'deki grafik sabit basınç (Constant Pressure) metoduna göre tasarlanan geleneksel süpersonik ejektörlerde difüzör boyunca meydana gelen toplam ve statik basınç dağılımını göstermektedir. Birincil akışkan durma noktası f' den toplam basınçla ve durma noktası a' dan statik basınçla sürüklenme bölgesine hareket ederken, ikincil akışkan durma noktası k' dan toplam basınç ve durma noktası a' dan statik basınçla sürüklenme bölgesine girmektedir. Sürüklenme sırasında paralel boğazların çıkış noktası c' ye kadar statik basıncın sabit kaldığı kabul edilir. Fakat I. W. Eames ve ark. (Eames vd., 1999) tarafından yapılan deneysel çalışmalar bunun doğru olamayacağını, karışma ve sürüklenme prosesi esnasında ikincil akışkanla olan momentum değişimi sebebiyle birincil akışkanın toplam basıncı düşerken, ikincil akışkanın toplam basıncının artacağını ortaya koymuştur. Karışımın statik basıncı durma noktası h' ye kadar sabit kalırsa, akış termodinamik şok' a maruz kalmaktadır.

Akış termodinamik şoka maruz kalmasıyla süpersonikten sonikaltına dönüşürken mach sayısında ani düşüş gözlenmektedir. Bunun sonucunda toplam basınç ve basınç artış oranında azalma meydana gelmektedir. Sabit oranda momentum değişimi kabulü yapmanın amacı da bu eksikliklerin giderilmesidir.

SOMD (Constant Rate of Momentum Change) metodu ile tasarlanan difüzör geometrisi difüzör bölgesinde oluşan termodinamik şokları engeller. Difüzör bölgesinden geçişte

momentumun sabit oranda değişiminin sağlanması statik basıncın girişten çıkışa doğru kademeli olarak azalmasını sağlarken, toplam basınç düşüşünün önüne geçerek şok oluşumunu engeller (Eames, 2002).



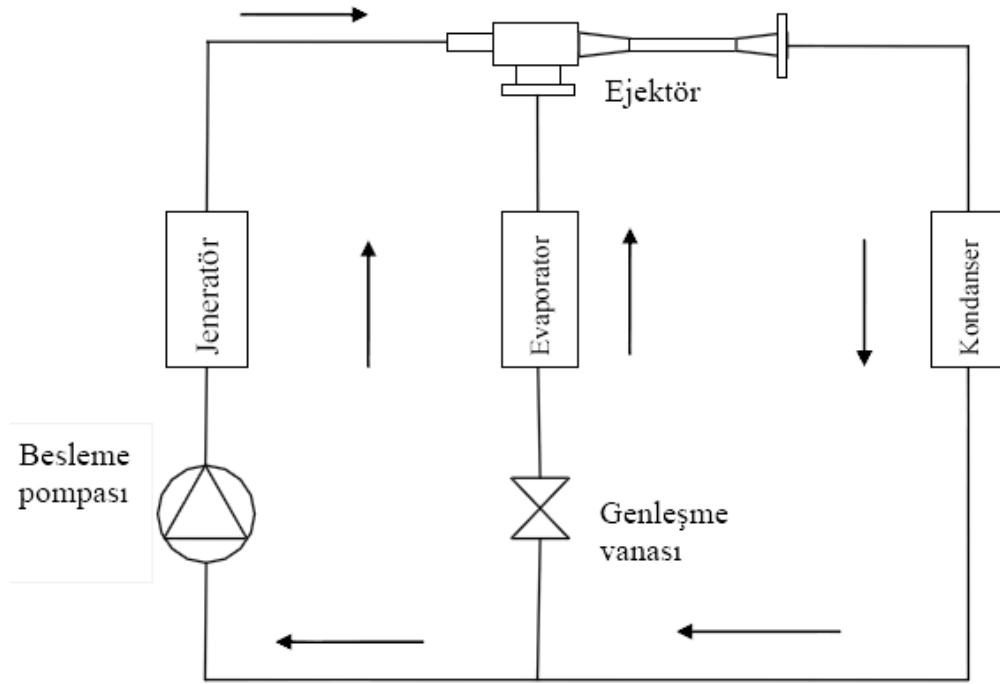
Şekil 1.8. Geleneksel ejektör geometrisi ve ejektör boyunca toplam ve statik basınç değişimi

1.4 Ejektör Kullanım Alanları

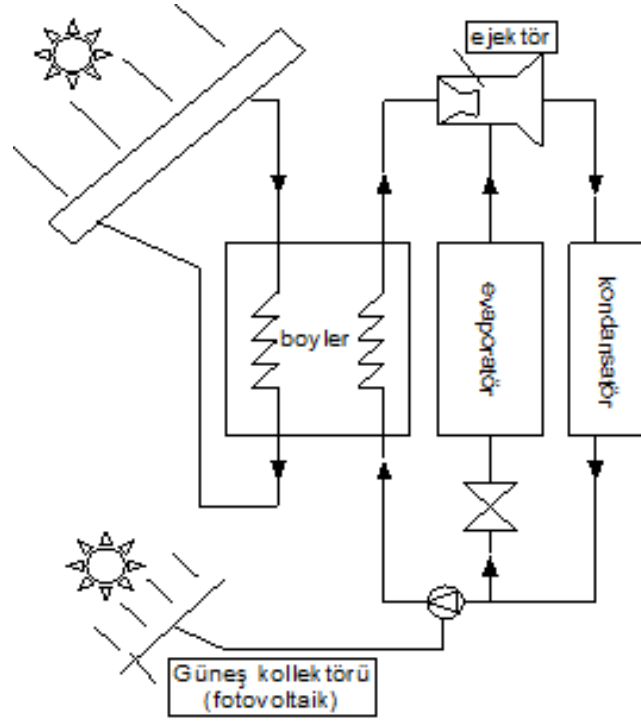
Ejektörlerin kullanım alanları şu şekildedir (Dere, 2013);

- Buhar tahrikli lokomotiflerde kazan besleme suyunu kazana ve kazandan dışarı pompalamak ve enjekte etmek için,
- Geniş anlamda yüksek basınçlı modern kazanlarda; kimyasalları küçük, sabit düşük basınçlı kazanlarda, kazana enjekte etmek için,
- Termik santrallerde, kazan zemin külünün (bottom ash) uzaklaştırılmasında,
- Buharlı jet soğutma sistemlerinde vakum oluşturmakta (Şekil 1.9),
- Tohumların veya diğer küçük malzemelerin işlenmesinde,

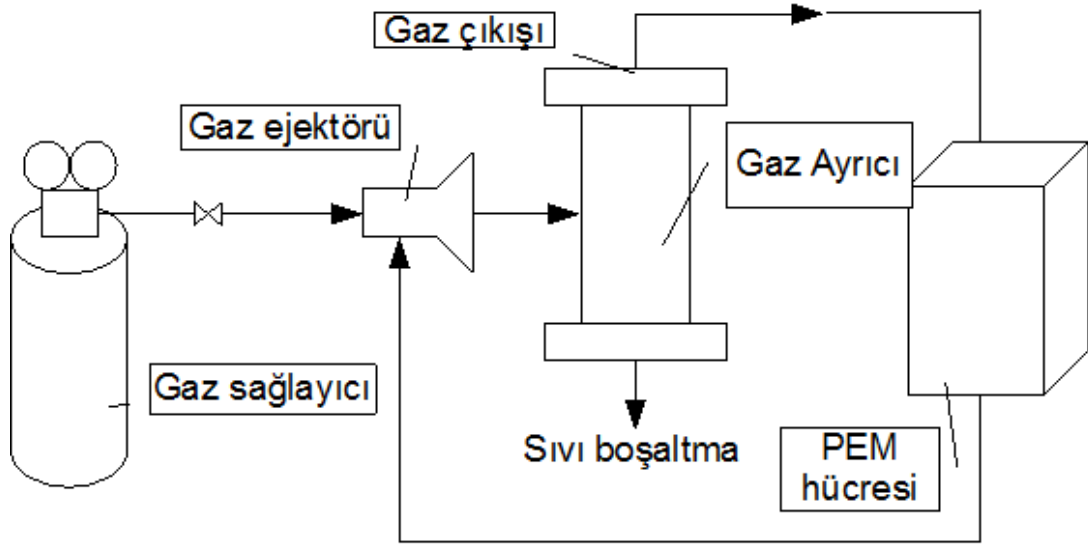
- İnşaat endüstrisinde, suyu ve su bentonit karışımını pompalama işleminde,
- Endüstriyel ateşleme lüleleri ve kaynak lülelerinde,
- Güneş enerjisi sistemlerinde (Şekil 1.10),
- Uzay araçları itici güç sistemlerinde,
- Yakıt pillerinde (Şekil 1.11),



Şekil 1.9. Jet-pompa (ejektörlü) soğutma sisteminin şematik görünümü



Şekil 1.10. Ejektörün güneş enerjisi sistemlerinde kullanımı



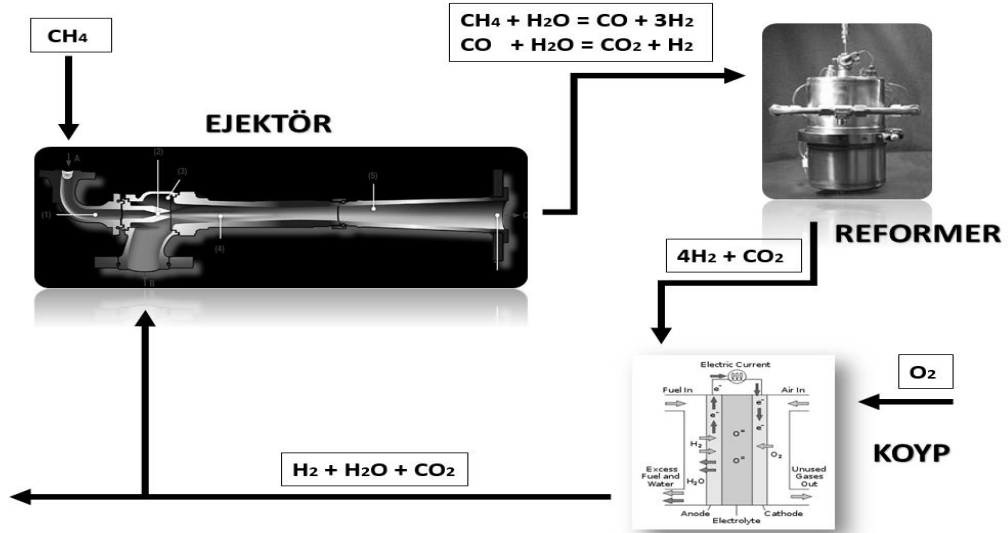
Şekil 1.11. PEM hücresinde ejektör kullanımı

1.4.1 Katı oksit yakıt pillerinde ejektör kullanımı

Katı oksit yakıt pilinde kullanılamayan yakıtın bir kısmı egzozdan dışarı atılmaktadır. Katı oksit yakıt pilinde anot egzozundan dışarı atık yakıtın su buharından ve ısı enerjisinden faydalanmak için bu karışımın bir kısmının reformlama öncesinde yakıt giriş hattına geri beslenmesi gerekmektedir. Bu nedenle anot egzoz gazı resirkülasyonu için en avantajlı yöntemlerden biri ejektör kullanılmasıdır (Şekil 1.12).

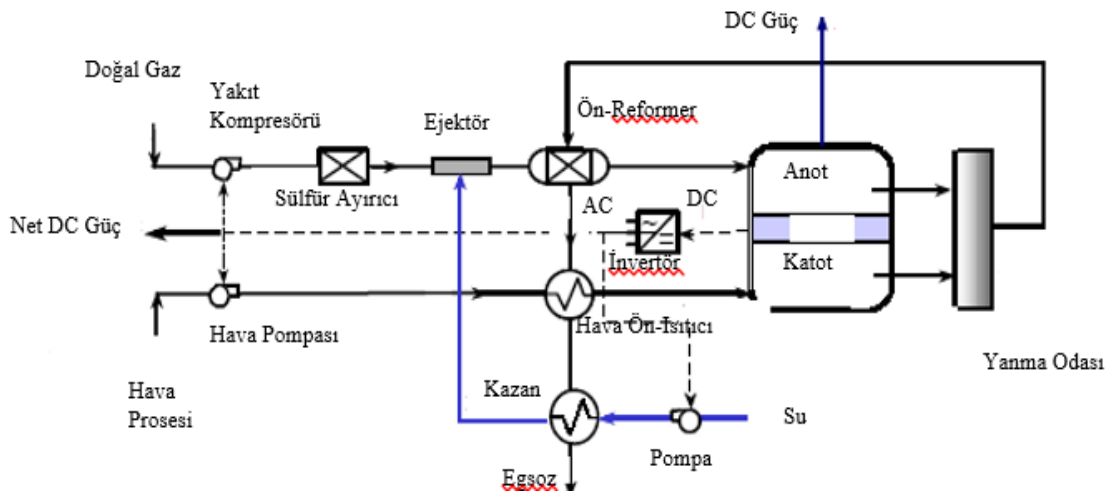
Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili teknolojileri %60'lara varan yüksek elektriksel verime (Föger vd., 2010) ve %90' nın üzerinde toplam verime (Mai vd., 2007) sahiptir. Katı oksit yakıt pilleri 1 KW' a varan evsel uygulamalardan birkaç MW'lara varan yüksek enerji gerektiren uygulamalara, farklı yakıt kullanımına olanak sağlayan bir esneklikle cevap verebilmektedir. Katı oksit yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar yoğun olarak hücre ve stak performansını artırmaya yönelik yapılmakta iken, sistem elemanları ve alt sistemler için yapılan çalışmalar gerekli ilgiyi görmemektedir. Yüksek elektriksel verim sağlamak ve harici bir kaynaktan su beslemesini önlemek için yakıt yönetimi ve özellikle egzoz gazı resirkülasyonu, üzerinde çalışılmaları gereken önemli konulardır. Çünkü katı oksit yakıt pilinde ejektör kullanarak (Şekil 1.12) egzoz gazının tekrar yakıt pili giriş hattına gönderilmesi yakıt kullanım verimini artıracak gibi yakıt reformlama işlemi için gerekli olan suyu da sağlamış olacaktır.

Katı oksit yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar yoğun olarak hücre ve stak performansını artırmaya yönelik yapılmakta iken, sistem elemanları ve alt sistemler için yapılan çalışmalar gerekli ilgiyi görmemektedir. Yüksek elektriksel verim sağlamak ve harici bir kaynaktan su beslemesini önlemek için yakıt yönetimi ve özellikle egzoz gazı resirkülasyonu, üzerinde çalışılmaları gereken önemli konulardır. Çünkü katı oksit yakıt pilinde ejektör kullanarak (Şekil 1.12) egzoz gazının tekrar yakıt pili giriş hattına gönderilmesi yakıt kullanım verimini artıracak gibi yakıt reformlama işlemi için gerekli olan suyu da sağlamış olacaktır.



Şekil 1.12. Katı Oksit Yakıt Piliinde Ejektör kullanımı

KOYP sistem elemanları Şekil 1.13'te gösterilmektedir. Doğal gaz; yakıt kompresörüyle sülfür ayırıcı üniteden geçtikten sonra yakıt ejektörüne birincil akışkan olarak girip, ön reformer bölümünden yakıt pilinin anot kısmına gönderilmektedir. Diğer taraftan ön ısıtıcıdan geçen hava yakıt pilinin katot tarafına gönderilmektedir. Yakıt pili içerisindeki elektrokimyasal tepkimeler sonucunda anot egzoz gazından çıkan yaklaşık 900°C civarındaki su buharı, metanın reformlanma işleminde kullanılmak üzere ikincil akışkan olarak oluşan basınç farkı sebebiyle sisteme çekilmektedir. Yine elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan kullanılmamış hidrojen, yakıt pili sistemine tekrar dahil edilmektedir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Katı oksit yakıt pili sistem elemanları

1.5 Motivasyon

Mevcut katı oksit yakıt pillerinde kullanımı düşünölen ejektörler birincil akışkanın enerjisi ile ikinci akışkanın pompalandığı ve hiçbir hareketli aksamının olmadığı ve dış kaynaklı herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymadan çalışabilen cihazlardır. Dolayısı ile katı oksit yakıt pilinde yakıt kullanım miktarının artırılması ve stakta üretilen ısı enerjisi ve su buharının reformlama işleminde kullanılması ile sistem boyutları küçültölmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında, anot egzoz gazının reformer giriş hattına beslenmesinde kullanılacak bir ejektörün nozul kısmı çalışma koşullarına göre tasarlanmış, COMSOL MULTIPHYSICS yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

1.6 Tez İçeriğı

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Bölüm I’de yakıt pilleri hakkında genel bilgilendirme yapılmış olup KOYP’nin çalışma prensibi ve ejektörler hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm II’de literatür araştırması ile ejektörlerin modelleme aşaması, KOYP hücrelerine uygulanması, KOYP sistemi verimine olan pozitif etkisi incelenmiştir. Bölüm III’de ejektörler modelleme aşamaları, yapılan kabuller belirtilmiştir. Bölüm IV’de nümerik analiz konusu incelenmiş ve Bölüm V’de genel sonuçlar değerlendirilerek, ejektör nozul bölümünün modelleme sonuçlarına ait grafikler değerlendirilmiş ve Bölüm VI’da ise sonuç ve öneriler yer almıştır.

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

KOYP'leri farklı yakıtlarla çalışabilen, endüstriyel tesislerden elektrik santrallerine, elektrik ve ısı enerjisinin bir arada üretilbildiği kombine sistemlerden kojenerasyon uygulamalarına kadar birçok uygulamada kullanılabilen, hareketli parçası olmayan yüksek verimli sistemlerdir. Geleceğin teknolojisi olarak görülen KOYP'nin öngörülen ölçüde yaygınlaşabilmesi KOYP sisteminin çevresel elemanlarının da geliştirilmesine bağlıdır. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan KOYP'leri için kararlı, maliyeti düşük ve uzun ömürlü; elektrot, sızdırmazlık ve destek malzemelerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. KOYP'de yakıt olarak saf hidrojenin kullanılmasının getirdiği yüksek maliyet ile yakıtın reaksiyona girmeden yakıt hücresini terletmesi performansın düşmesine neden olan ve geliştirilmesi gereken konular arasındadır. Bu problemlere çözüm olarak yakıt kullanım verimin artırılması yani yakıt-egzoz gazı karışımının bir kısmının anot girişine geri beslenmesi gerekmektedir. Ayrıca KOYP'lerinde fosil yakıtlara uygulanan endotermik ön-dönüştürme için gerekli olan ısı ihtiyacının da karşılanması dolayısıyla ısı verimin artırılması bakımından anot egzoz gazının geri beslemesi çok önemlidir. Bununla birlikte KOYP çalışma sıcaklığının yüksek olması egzoz gazı geri beslemesi için mekanik sistemlerinin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Ejektörler, yüksek sıcaklıkta çalışan KOYP uygulamalarında anot egzoz gazı geri beslemesinde iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Literatürde ejektörlerin yakıt pillerine uygulanması üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Literatürde ejektörlerin yakıt pillerine uygulanması üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Jenn-Jiang vd. (2015), PEMFC anot çıkış gazının sisteme geri dönüşümünün sağlanması için ejektör modeli geliştirmişler, geliştirdikleri ejektör modelini nümerik ve deneysel olarak inceleyip nümerik sonuçları deneysel olarak doğrulamışlardır. Ejektör performans simülasyonları ve akış karakteristiklerini 3 boyutlu, sıkıştırılabilir, steady-state k- ϵ türbülans model olarak tanımlayarak simülasyonlarda özellikle sistem girişindeki kütleli debi, nozul boğaz çapı, sıcaklık ve Mach sayısı profilleri, emme kanalının giriş ve çıkışındaki kütleli debi parametrelerinin ejektör performansı üzerinde yoğunlaşmışlardır. Ejektör girişinde kütleli debinin artmasıyla beraber emme kanalındaki debinin arttığını, nozul boğaz çapındaki azalmanın sürüklenme oranını artmasına sebep olduğunu rapor

etmişlerdir. Nozul boğaz çapının 1 mm'nin altında olması durumunda giriş debisinin yüksek olmasına rağmen oluşan şok dalgalarının emme kanalında oluşturduğu basınç değişimleri nedeniyle sürüklenme oranın düştüğünü; 1 mm'nin üzerinde olması durumunda sürüklenme oranının, giriş debisinin artmasıyla arttığını; boğaz çapının büyük, giriş debisinin düşük olması durumunda ise akışın nozul boğazında sonik şartlara ulaşamayacağını belirtmişlerdir.

Marsano vd. (2004), geliştirdikleri tek boyutlu KOYP ejektör modelini bu iki ejektör tasarımı için, 250 kW gücündeki bir KOYP hibrit sistemi çalışma parametrelerini kullanarak sayısal olarak çözmüştür. Göz önüne alınan sabit basınç ve sabit alan karışmalı ejektör geometrilerinin her ikisinin de düşük basınç artışı ve yüksek karışma oranından dolayı KOYP geri besleme açısından yakın performanslar ortaya koyduğu belirlenmiştir. Öte yandan düşük yakıt giriş sıcaklığı veya düşük yakıt tüketim oranlarında su buharı/karbon oranının problem oluşturabileceği tespit edilmiştir. Hücre çalışma basıncı, akış sıcaklıkları, geri besleme oranı, yakıt debisi gibi çalışma parametrelerinin birbirlerini nasıl etkiledikleri bu çalışmada ayrıca ele alınmıştır.

Bu model daha sonra Ferrari vd. (2005), tarafından ejektörün; ana denklemlerin ayrı ayrı sayısal olarak çözüldüğü hücrelere bölünmesi ile geliştirilmiştir. Her ne kadar model geliştirilmiş olsa da hız, basınç ve sıcaklığın ejektör radyal doğrultusu boyunca sabit olarak kabul edildiği tek boyutluluktan kurtulamamıştır.

Bu durum Zhu vd. (2007), tarafından ele alınmıştır. Özellikle KOYP' de anot gazı geri beslenmesi durumunda ikincil akış alanının mevcut ejektörlere kıyasla çok daha büyük olması nedeni ile standart ejektörlere uygulanan tek boyutlu modellerin yüksek hatalar vereceği ifade edilmiştir. Bu kapsamda ejektör ikincil akışına iki boyutlu bir hız modeli uygulanmıştır. Model 240 kW gücündeki bir KOYP sistemine uygulanmıştır. Çalışmada birincil ve ikincil akışın sıcaklık, kimyasal kompozisyon ve basıncının, geri besleme performansına, su buharı/karbon oranına, ejektör çıkışındaki basınç, sıcaklık ve kimyasal kompozisyona olan etkileri incelenmiştir. Özellikle yakıt giriş basıncının yakıt debisi, KOYP performansı ve su buharı/karbon oranı üzerindeki en etkili parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhu vd. (2008), bir önceki çalışmalarında geliştirdikleri modeli üç farklı ejektör performans moduna uyarlayarak sayısal olarak çözmüştür. Çalışmada yakıt pili çalışma koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanan basınç değişikliklerinin güvenli bir operasyon için anında güncellenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca birincil akış basıncının kritik mod basıncından düşük olduğu durumlarda ejektörün çalışmayacağı ve bu durumda su buharı/karbon oranının dikkatle takip edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Öte yandan birincil akış giriş basıncının ejektör çıkış basıncının 1,15 katı olması durumunda ikincil akışı sürüklemeye başladığı bulunurken kritik moda ulaşılması için bu oranın 2,2 olması gerektiği rapor edilmiştir.

Zhu vd. (2009), başka bir çalışmalarında, önceden geliştirdikleri iki boyutlu ejektör modelini deneysel çalışmalarla doğrulamıştır. Daha sonra model farklı birincil akış lüle çıkış bölgesi ve karışma bölgesi açıları için sayısal olarak çözülmüştür. Birincil akış basıncı 6 ile 4,5 bar arasında iken, optimum nozul çıkış noktası karışmanın başladığı noktadan, karışma bölgesi boğaz çapının 1,7 ile 3,4 katı kadar uzakta bulunmuştur. Karışma bölgesi açısının ise özellikle optimum değere yakın değerlerinin ejektör performansını ciddi boyutlarda etkilediği görülmüştür. Aynı birincil akış basınç aralığında optimum açının 1.45 ile 4.2° arasında olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca göz önüne alınan her iki parametrenin de optimumlarının birincil akış basıncının artmasına paralel olarak büyüdüğü tespit edilmiştir. Bu kapsamda bütün çalışma koşullarına hitap eden optimum bir lüle çıkış konumu veya karışma bölgesi açısının mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır.

Maximilian vd. (2015), KOYP sisteminde anot gazı geri dönüşümünü sağlamak için yakıt ve buhar ejektörü olmak üzere iki farklı ejektör modeli geliştirerek kısmi yük durumlarını karşılaştırmışlardır. %70 yakıt kullanımı ve uygun ejektör geometrisi varsayarak karbon oluşumunun belirlediği yakıt ejektörü kısmi yükleme eşliğini %77.8 olarak belirtmişlerdir. En küçük kısmi yükün yoğunlaştırıcıdaki yoğuşma sıcaklığı tarafından belirlendiği buhar ejektörlerinde, simülasyon sonuçlarına göre kısmi yük kapasitesini %37.8 olarak kaydetmişlerdir. Karbon oluşma riskini azaltan düşük kısmi yük ve yüksek geri besleme şartları altında tasarladıkları yakıt ejektör geometrisini; nozul çapı 0.712 mm, karışma odası çapı 6 mm ve difüzör uzunluğunu 48 mm olduğunu rapor etmişlerdir. Aynı koşullara göre tasarladıkları buhar ejektörü geometrisinin; nozul çapı 0.877 mm, karışma odası çapı 3.2 mm ve difüzör uzunluğunu

25.6 mm olduğunu belirtmişlerdir. Buhar ejektörlerinin yoğuşturucu, pompa, buharlaştırıcı ve 2 ısı değiştiricisi olmak üzere en az 5 bileşenden oluştuğunu, bu yüzden sistem maliyetinin yakıt ejektörlerine göre yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Ming vd. (2013), ejektör resirkülasyon davranışlarının KOYP sistemi performansına etkilerini, termodinamik sistem modellemesi ve nümerik simülasyon bakımından ele almışlardır. Doğal gaz ve gazlaştırılmış sentez gazının KOYP sistemi anot resirkülasyon performanslarını analiz ederek karşılaştırmışlardır. Aynı şartlar altında doğal gaz ve gazlaştırılmış sentez gazının (gasification syngas) sürüklenmelerini sırasıyla 8.9 ve 0.71 olduğunu bildirmişlerdir. 40-200 amper ve %70 ile %90 yakıt kullanımı koşullarında çalışan stakta gazlaştırılmış sentez gazı kullanımının KOYP hücresinde karbon birikimini ve nikel oksidasyonunu azaltıcı etkisi olduğunu, doğal gazla karşılaştırıldığında KOYP elektriksel veriminin %15 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Dang vd. (2012), etanolün yakıt olarak kullanıldığı katı oksit yakıt pili (KOYP) sisteminin performansını anot egzoz gazı geri dönüşümü yapıldığı ve yapılmadığı durumlar için incelemişler aynı şartlar altında anot gazı resirkülasyonu olan sistemin veriminin (%46.16), diğeriyle (%42.87) kıyaslandığında elektriksel ve termal verimlerinin daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Aynı zamanda etanol buhar reformer'ında oluşan karbon birikiminin resirkülasyon oranı ve yakıt kullanımının artmasıyla birlikte azaldığını belirtmişlerdir. Düşük yakıt kullanımında KOYP sisteminin termal verimi azalırken, artan resirkülasyon oranıyla birlikte elektriksel veriminde arttığını rapor etmişlerdir.

Ralph-Uwe vd. (2010), reformer/burner reaktör ve sıcak gaz püskürtücü geliştirip katı oksit yakıt pili (KOYP) anot çıkış gazı geri dönüşüm sistemi için uygunluğunu araştırmıştır. Propanın yakıt olarak kullanıldığı 300 W'lık KOYP stak için birleşik reformer/burner sistemi anot çıkış gazı geri dönüşümü ve kısmi oksidasyon modlarında çalıştırıp karşılaştırılmıştır. anot çıkış gazı geri dönüşümü (%41) modunun kısmi oksidasyon (%21) ile kıyaslandığında sistem veriminin oldukça yüksek olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

Vincenzo vd. (2013), mikro kombine ısı ve güç sistemine ait bir KOYP hücresi için bir ejektör tasarlayıp teorik olarak analizini yapmışlardır. Yakıt ejektörü ile entegre bir anodik resirkülasyonlu KOYP sisteminin performansını incelemişlerdir. Ejektör tasarımı için sundukları yaklaşımın avantajlarını test sonuçlarıyla doğrulamışlardır. Birincil akışkan giriş sıcaklığının resirkülasyon oranı ve ejektör performansını etkilediğini, yüksek sıcaklıkların resirkülasyon oranı ve ejektör verimine pozitif etki ettiğini belirtmişlerdir. Karışım odası çapı büyüdükçe resirkülasyon oranının arttığını fakat ejektör performansının düştüğünü belirtmişlerdir.

Sonuç olarak literatür çalışmaları göz önüne alındığında, ejektörlerin KOYP sisteminde hem anot gazı resirkülasyonu hem de hidrokarbon içeren yakıtların ön reformlama işlemleri için sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Yakınsak ıraksak lülelerin içerisinde yer aldığı, akışkan hızını ses üstü hızlara çıkarıldığı nozul kısmının çalışma şartlarına göre en uygun şekilde tasarlanması ejektör performansını doğrudan etki etmektedir. Tez kapsamında 500 W güce sahip metan yakıtlı bir katı oksit yakıt pili stağında anot gazı geri kazanımı için ejektör nozul kısmı tasarlanarak modellemiştir. Tasarımı yapılan ejektör nozul kısmı için kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri uygulanarak bir model oluşturulmuştur. Ejektörün nozul kısmı Comsol Multiphysics programı ile çözdürülmüş, sonuçların dizayn parametreleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

BÖLÜM III

MATEMATİKSEL MODELLEME

3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Mühendislik hesaplamalarında, akışkan davranışının doğru tespit edilmesi oldukça önemlidir. Analitik yöntemler kullanılarak direkt olarak hesaplama imkanı bulunmayan kompleks modellerde, ısı transferi, basınç kayıpları, akış hızları gibi verilerin, nümerik yöntemlerle parçanın tasarım aşamasında iken belirlenmesi zaman, maliyet vb. açılardan üreticiye önemli avantajlar sağlamaktadır.

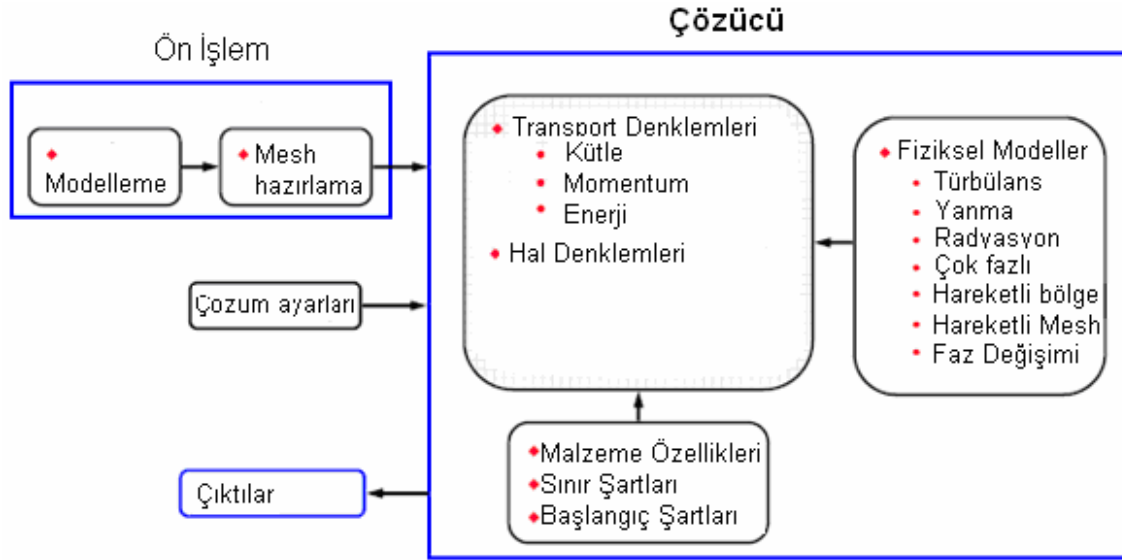
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD); genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbo makine endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Comsol, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı farklı fiziksel modeller sayesinde laminer ve türbülanslı akışlara, iletim taşınım ve radyasyonla ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretebilmektedir.

Günümüzde HAD mühendisler ve bilim adamları için, akış çözümlemelerinde sıklıkla ihtiyaç duyulan bir araç haline gelmiştir. HAD'nin öne çıkan avantajlarından bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- CFD yazılımlarıyla yapılan sayısal simülasyon sayesinde, sonuçlar ve sanal deney ortamı simülasyondan sonra dahi elinizin altında olur,
- Klasik deneylerde kullanabileceğiniz ölçüm cihazları ve sensörler sınırlıdır. Oysa bir CFD analizinde, kullanılan sayısal ağ elemanı kadar ölçüm elemanınız vardır ve veri dağılımlarını, deneylerdeki gibi sadece ayırık veriler halinde değil, gradyanlar olarak geniş bir alanda görebilirsiniz,
- CFD, akış özelliklerini, akışı bozmadan incelemenize olanak tanır,
- CFD ile gözlemlenmesi tehlikeli veya ulaşılamaz bölgelerdeki akışkan davranışlarını inceleyebilirsiniz,

- CFD, bir anlamda, bilgisayar üzerindeki esnek deney laboratuvarıdır. Tasarımcı ve analizcilere sanal prototipler üzerinde deney yapma olanağı tanır,
- Az enerji ve insan gücü gerektirir.

Şekil 3.1’de CFD çözümünün akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.1. CFD modellemenin özeti

Bu yüksek lisans tezi kapsamında KOYP anot egzoz gazının sisteme geri dönüşümü için kullanılmak üzere bir ejektör geliştirilecek, COMSOL programı kullanılarak modellemesi yapılacaktır.

3.2 Matematiksel Model

Tez kapsamında 500W gücündeki birincil akışkanı metan olan bir katı oksit yakıt pili stağında anot egzoz gazının KOYP sistemine geri döngüsünün sağlanabilmesi için ejektör nozulu tasarımı yapıp sayısal olarak incelenmiştir. Hesaplamalarda ejektör nozulu, anot egzoz gazının minimum %20' sini tekrar katı oksit yakıt pili stağına geri kazandırabilecek ve sabit oranda momentum değişim koşullarında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan ejektör nozulunda kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri uygulanarak bir model oluşturulup, modelin literatür ile kıyaslanarak doğrulanması yapıp ve en uygun nozul geometrisi belirlenmiştir.

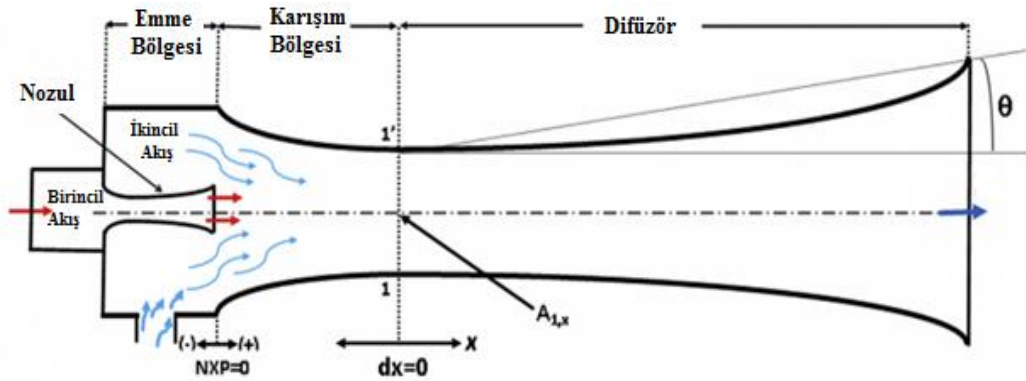
Literatürde ejektörlerin KOYP sistemlerine uygulandığı birçok çalışma mevcuttur fakat kullanılan ejektörlerin ya sabit kesitte ya da sabit basınçta karışım ilkesine göre çalışmaktadır. Sabit oranda momentum değişim ilkesine göre çalışan ejektör modelinin KOYP sisteminde uygulaması bulunmayıp çoğunlukla soğutma çevrimleri için kullanılmıştır. SOMD ilkesine göre tasarlanan ejektörlerin KOYP sisteminde anot gazı geri kazanım miktarını klasik ejektörlere göre arttıracak ve önemli bir avantaj oluşturacak düşünülmektedir. Ayrıca soğutma çevriminde kullanılan gaz karışımları ve sıcaklıkları KOYP'ye göre oldukça farklılık göstermektedir.

SOMD metodu ile üretilen ejektör geometrisi (Şekil 3.2) difüzör bölgesinde oluşan termodinamik şokları engeller. Difüzör bölgesinden geçişte momentumun sabit oranda değişiminin sağlanması statik basıncın girişten çıkışa doğru kademeli olarak azalmasını sağlarken, toplam basınç düşüşünün önüne geçerek şok oluşumunu engeller.

SOMD kabulü şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$\frac{dM_0}{dx} = m_g(1 + R_m) \frac{dc}{dx} = \beta \quad (3.1)$$

β : (Sabit) , R_m : Sürüklenme oranı, m_g : Birincil akış debisi



Şekil 3.2. SOMD difüzör geometrisi

SOMD ilkesine göre çalışan ejektör için yapılan kabuller ve ejektör içerisinde gerçekleşen olayları ifade eden matematiksel denklemler aşağıda verilmiştir.

Yapılan kabuller;

- Ejektör içerisindeki ikincil akışkanın radyal yöndeki hız dağılımı üniform değildir ve ejektör iç duvarına yakın bölgede hız sınır tabaka oluşmaktadır.

- Birincil akışkan hızı radyal yönde üniformdur. Birincil akışkanın akış alanı ikincil akışkanın akış alanından daha küçüktür.
- Birincil akışkanın sıcaklığı ikincil akışkan sıcaklığına çıkmıştır bu yüzden ikincil akışkanın ısı enerjisi kaybı yoktur.
- Birincil ve ikincil akışkan ideal gazdır.
- Birincil ve ikincil akışkanların sıcaklık ve basınç dağılımları ejektör içerisinde üniformdur.

Matematiksel İfadeler;

Süreklilik denklemi:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (3.1)$$

Enerji korunumu:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad dT + \frac{VdV}{C_p} = 0 \quad (3.2)$$

T: Sıcaklık, C_p: Özgül ısı

Momentumun korunumu:

$$\rho V dV + dP + \frac{1}{2} V^2 4f \frac{dx}{D} = 0 \quad \frac{dP}{P} + \frac{\gamma}{2} M^2 \frac{4f dx}{D} + \gamma M^2 \frac{dV}{V} = 0 \quad (3.3)$$

$$f = \frac{0.0625}{\left[\log_{10} \left(\frac{K}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.4)$$

f: Sürtünme faktörü (Darcy Friction Faktör), K: Duvar pürüzlülüğü(mikron), D: Hidrolik çap

γ: Özgül ısılar oranı, P: Basınç

Momentum değişim oranı (λ):

$$\lambda = \frac{dM}{dx} = \dot{m}_p (1+w) \frac{dV}{dx} \quad \frac{dV}{V_{1,x}} = \frac{\lambda dx}{\dot{m}(1+w)V_{1,x}} \quad (3.5)$$

w: Sürüklenme oranı ($\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p}$), $\dot{m}_s$: İkincil akış debisi, $\dot{m}_p$: Birincil akış debisi

Alan hesaplaması:

$$\frac{dA}{A_{1,x}} = \frac{\gamma}{2} M_{1,x}^2 \frac{4 f_{1,x} dx}{D_{1,x}} + (M_{1,x}^2 - 1) \frac{\lambda dx}{m_p (1+w) V_{1,x}} \quad (3.6)$$

M: Mach Sayısı

Basınç hesaplaması:

$$\frac{dP}{P_{1,x}} = - \left[1 + (\gamma - 1) M_{1,x}^2 \right] \frac{\lambda dx}{m_p (1+w) V_{1,x}} - \frac{dA}{A_{1,x}} \quad (3.7)$$

Sıcaklık hesaplaması:

$$\frac{dT}{T_{1,x}} = \left[(1 - \gamma) M_{1,x}^2 \right] \frac{\lambda dx}{m_p (1+w) V_{1,x}} \quad (3.8)$$

Mach sayısı hesaplaması:

$$\frac{dM}{M_{1,x}} = \left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{1,x}^2 \right] \frac{\lambda dx}{m_p (1+w) V_{1,x}} \quad (3.9)$$

Toplam basınç hesaplaması:

$$P_{0,1,x} = P_{1,x} \left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{1,x}^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.10)$$

Toplam sıcaklık hesaplaması:

$$T_{0,1,x} = T_{1,x} \left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{1,x}^2 \right] \quad (3.11)$$

3.2.1 Karışım bölgesi hesaplamaları

Birincil akışkan ve ikincil akışkan arasındaki sürüklenme prosesi aşağıdaki momentum denkleminde hesaplanabilir.

$$\sum F = \oint Adp = \dot{m}_p (1+w) V_m - \dot{m}_p V_{n,e} - \dot{m}_s V_s \quad (3.12)$$

V_m = Karışım hızı, $V_{n,e}$ = Nozul çıkış hızı, V_s = İkincil akış hızı

Karışım esnasında statik basıncın sabit kaldığı varsayılarak, karışım bölgesinin sonundaki özellikler momentum korunumundan hesaplanır.

$$V_{1,x} = \frac{V_{n,e} + wV_s}{1 + w} \quad (3.13)$$

Enerji Korunumunu uygulayarak Karışım bölgesinin sonundaki sıcaklık;

$$T_{0,x} = \frac{T_{0,p} + wT_{0,s}}{1 + w} \quad (3.14)$$

Karışımın sonu/Difüzörün girişindeki sıcaklık;

$$T_{1,x} = T_{0,x} - \frac{V_{1,x}^2}{2C_p} \quad (3.15)$$

İdeal gazların bir boyutlu izentropik akışın analizinde kullanılan parametrelerden biri de Ma^* 'dır ve yerel hızın boğazdaki ses hızına oranıdır.

$$Ma^* = \frac{V}{c^*} \quad (3.16)$$

Bu bağıntı şöyle de ifade edilebilir;

$$Ma^* = Ma \sqrt{\frac{T}{T^*}} \quad (3.17)$$

Bu ifadede Ma yerel Mach sayısı, T yerel sıcaklık, T^* ise kritik sıcaklıktır. Bu denklem sıcaklıktan bağımsız bir denklemle şu şekilde ifade edilebilir;

$$Ma^* = Ma \sqrt{\frac{k+1}{2+(k-1)Ma^2}} \quad (3.18)$$

Ma^* parametresi boğazdaki ses hızına göre boyutsuzlaştırılmış yerel hız iken, Ma ifadesi yerel ses hızına göre boyutsuzlaştırılmış yerel hızdır. Mach sayısına göre Ma^* 'ın değişimi $k=1.3$ için Çizelge 3.1. de verilmiştir.

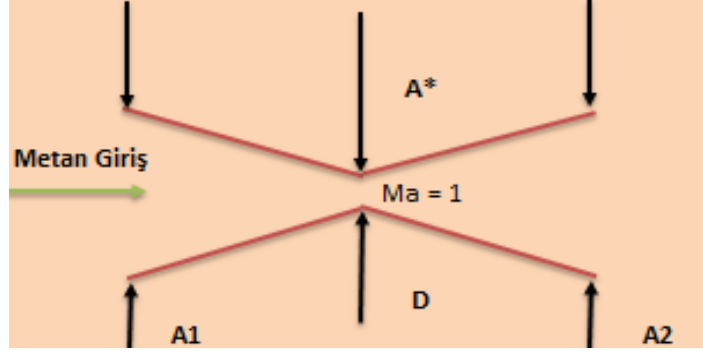
Çizelge 3.1. Lüle ve yayıcılardaki izentropik akışa ait özelliklerin oranları ($k=1.3$ için)

Ma	Ma*	A/A*	P/Po	d/d0	T/To
0,1	0,1072	5,8860	0,9935	0,9950	0,9985
0,2	0,2138	2,9940	0,9744	0,9803	0,9940
0,3	0,3196	2,0537	0,9435	0,9563	0,9867
0,4	0,4239	1,6023	0,9023	0,9240	0,9766
0,5	0,5264	1,3479	0,8525	0,8845	0,9639
0,6	0,6267	1,1932	0,7962	0,8392	0,9488
0,7	0,7245	1,0972	0,7354	0,7895	0,9315
0,8	0,8195	1,0395	0,6722	0,7367	0,9124
0,9	0,9114	1,0092	0,6084	0,6823	0,8917
1	1,0000	1,0000	0,5457	0,6276	0,8696
1,1	1,0852	1,0083	0,4854	0,5735	0,8464
1,2	1,1670	1,0321	0,4285	0,5211	0,8224
1,3	1,2452	1,0703	0,3757	0,4709	0,7978
1,4	1,3198	1,1227	0,3273	0,4235	0,7728
1,5	1,3909	1,1895	0,2836	0,3793	0,7477
1,6	1,4585	1,2712	0,2446	0,3385	0,7225
1,7	1,5226	1,3690	0,2100	0,3011	0,6976
1,8	1,5835	1,4841	0,1797	0,2671	0,6729
1,9	1,6411	1,6182	0,1533	0,2363	0,6487
2	1,6956	1,7732	0,1305	0,2087	0,6250
2,1	1,7471	1,9514	0,1108	0,1841	0,6019
2,2	1,7958	2,1556	0,0939	0,1621	0,5794
2,3	1,8417	2,3885	0,0795	0,1427	0,5576
2,4	1,8851	2,6535	0,0673	0,1255	0,5365
2,5	1,9261	2,9545	0,0569	0,1103	0,5161

Bir akışkanın lüledeki kütleli debisi, durma özelliklerinin, akış alanının ve Mach sayısının bir fonksiyonudur.

$$\dot{m} = \frac{A \cdot Ma \cdot P \cdot \sqrt{\frac{k}{R \cdot T}}}{\left[1 + \frac{(k-1)Ma^2}{2}\right]^{(k+1)/2(k-1)}} \quad (3.19)$$

Buradaki m lüle boyunca herhangi bir yerdeki kütleli debiyi, P giriş basıncını, T giriş sıcaklığını ifade eder.



Şekil 3.3. Nozul kritik alan ve çap

Tasarımı yapılan KOYP sisteminde $0,14 \times 10^{-3}$ kg/s olarak hesaplanan metan giriş debisi ve seçilen giriş basıncına göre kritik alan ve çap değişir.

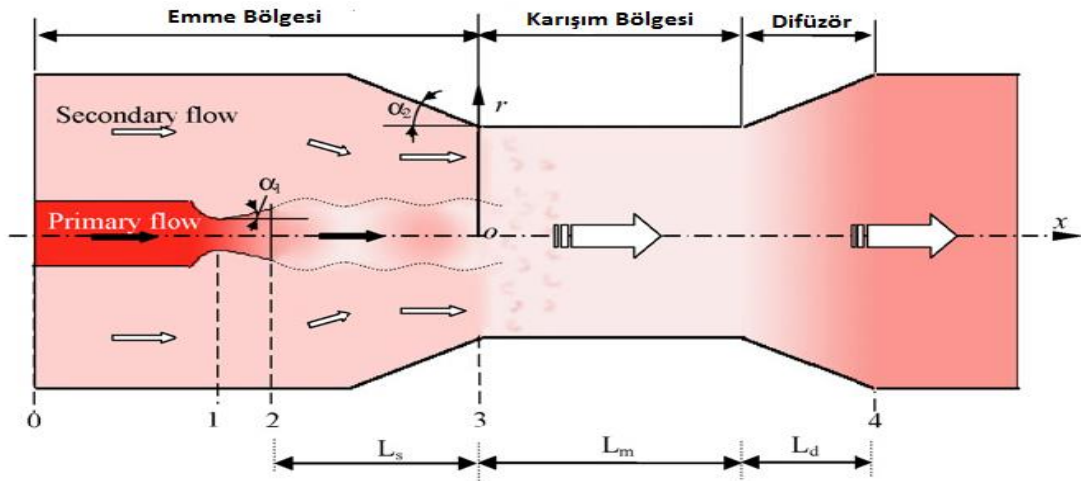
Çizelge 3.2. Metanın giriş basıncına göre kritik alan ve çap hesabı

Metan Giriş Basıncı (kPa)		A^* (m ²)	D (mm)
20 Bar	2000	0,000001305	1,2893
19 Bar	1900	1,37368E-06	1,3228
18 Bar	1800	0,00000145	1,3591
17 Bar	1700	1,53529E-06	1,3985
16 Bar	1600	1,63125E-06	1,4415
15 Bar	1500	0,00000174	1,4888
14 Bar	1400	1,86429E-06	1,5411
13 Bar	1300	2,00769E-06	1,5992
12 Bar	1200	0,000002175	1,6645
11 Bar	1100	2,37273E-06	1,7386
10 Bar	1000	0,00000261	1,8234
9 Bar	900	0,0000029	1,9220
8 Bar	800	3,2625E-06	2,0386
7 Bar	700	3,72857E-06	2,1794
6 Bar	600	0,00000435	2,3540
5 Bar	500	0,00000522	2,5787
4 Bar	400	0,000006525	2,8831
3 Bar	300	0,0000087	3,3291
2 Bar	200	0,00001305	4,0773
1 Bar	100	0,0000261	5,7661
0,9 Bar	90	0,000029	6,0780
0,8 Bar	80	0,000032625	6,4467
0,7 Bar	70	3,72857E-05	6,8919
0,6 Bar	60	0,0000435	7,4441
0,5 Bar	50	0,0000522	8,1546
0,4 Bar	40	0,00006525	9,1171

3.3 Ejektör Tasarımı

Tez kapsamında öncelikli olarak metan yakıtlı katı oksit yakıt pilinde kullanılacak ejektör için bir ön geometri oluşturulmuş süpersonik difüzör bölgesi için sayısal çözüm elde edilmiştir.

Bütün ejektör tasarımları genel olarak aşağıdaki adımlara göre yapılmaktadır (Zhu vd. 2007). Bu adımlar içerisinde geçen geometrik tanımlamalar Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Ejektör üzerindeki geometrik tanımlamalar

1. Çalışma koşullarının belirlenmesi
 - Yakıt giriş debisi
 - Yakıt girişi sıcaklık ve basıncı
 - Anot gazı kimyasal bileşimi
 - Buhar/karbon oranı
2. Buhar/karbon oranı kullanılarak anot egzoz gazı debisinin belirlenmesi
3. Nozzle boğaz alanının belirlenmesi, A_t
4. Karışım bölgesi girişindeki birincil akış hızının belirlenmesi, $V_{p,3}$
5. Karışım bölgesi girişindeki birincil akışkanın akış alanının çapının belirlenmesi, $D_{p,3}$
6. Karışım bölgesi çapının belirlenmesi, R_3
7. Iraksak nozzle açısının (α_1) belirlenmesi (4° - $7,5^\circ$ arasında değişir, yaygın kullanılan 5° - 6°)
8. Nozzle çıkışı ile karışım bölgesi girişi arasındaki mesafenin (L_s) belirlenmesi (En iyi performans için $1,5 \cdot D_3$ olarak alınır)

BÖLÜM IV

NÜMERİK ANALİZ

Katı oksit yakıt pili ejektörlerindeki çalışmalar genellikle sıkıştırılabilir akış bağıntılarını temel alarak, birincil ve ikincil akışkan girişleri ile difüzör çıkışındaki basınçların debi ve resirkülasyona etkileri üzerine olmuştur. Ejektör içerisindeki akışların, birbirlerinden farklı koşulların bir araya gelmesiyle oluştuğundan dolayı CFD analizlerinde en uygun modelin seçimi oldukça önemlidir.

Bu tez kapsamında, ejektörün nozul kısmı COMSOL MULTIPHYSICS programı içerisinde bulunan Spalart-Allmaras modeli kullanılarak çözülmüştür. Spalart-Allmaras türbülans modeli genel olarak aerodinamik uygulamalar için tasarlanmış bir türbülans modeli olmasına karşın viskoz etkilerin baskın olduğu duvar yüzeyine yakın bölgeler yani Reynolds sayısının düşük olduğu yerlerde de kullanılır. Düşük Reynolds sayılı k-epsilon modeli ile karşılaştırıldığında, Spalart-Allmaras modeli genel olarak daha güvenli olarak değerlendirilir ve daha gelişmiş modellere çözüm imkanı sunar.

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + u \cdot \nabla \tilde{v} = c_{b1} \tilde{S} \tilde{v} - c_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{v}}{I_w} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \nabla \cdot ((v + \tilde{v}) \nabla \tilde{v}) + \frac{c_{b2}}{\sigma} \nabla \tilde{v} \cdot \nabla \tilde{v} \quad (4.1)$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{K_{v2}} + \frac{1+c_{b2}}{\sigma} \quad (4.2)$$

$$X = \frac{\tilde{v}}{v} \quad (4.3)$$

$$f_{v1} = \frac{X^3}{X^3 + c_{w1}} \quad (4.4)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{X}{1+Xf_{v1}} \quad (4.5)$$

$$f_w = g \left(\frac{1+c_{w3}^6}{g^6+c_{w3}^6} \right)^{1/6} \quad (4.6)$$

$$g = r + c_{w2}(r^6 - r) \quad (4.7)$$

$$r = \min \left(\frac{\check{v}}{\check{s}_{K^2_v I^2_w}}, 10 \right) \quad (4.8)$$

$$\check{S} = \max(\Omega + C_{Rot} \min(0, S - \Omega) + \frac{\check{v}}{K^2_v I^2_w} f_{v2}, 0.3\Omega) \quad (4.9)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.10)$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (4.11)$$

$$S_{ij} = 0.5(\nabla u + \nabla u^T) \quad (4.12)$$

$$\Omega_{ij} = 0.5(\nabla u + \nabla u^T) \quad (4.13)$$

Burada S_{ij} ve Ω_{ij} ortalama gerilme oranı ve dönme hızı tensörleri, I_w en yakın olan çeper(duvar) mesafesi, V kinematik viskoziteyi ifade eder.

Modelleme parametreleri için varsayılan diğer değerler şunlardır:

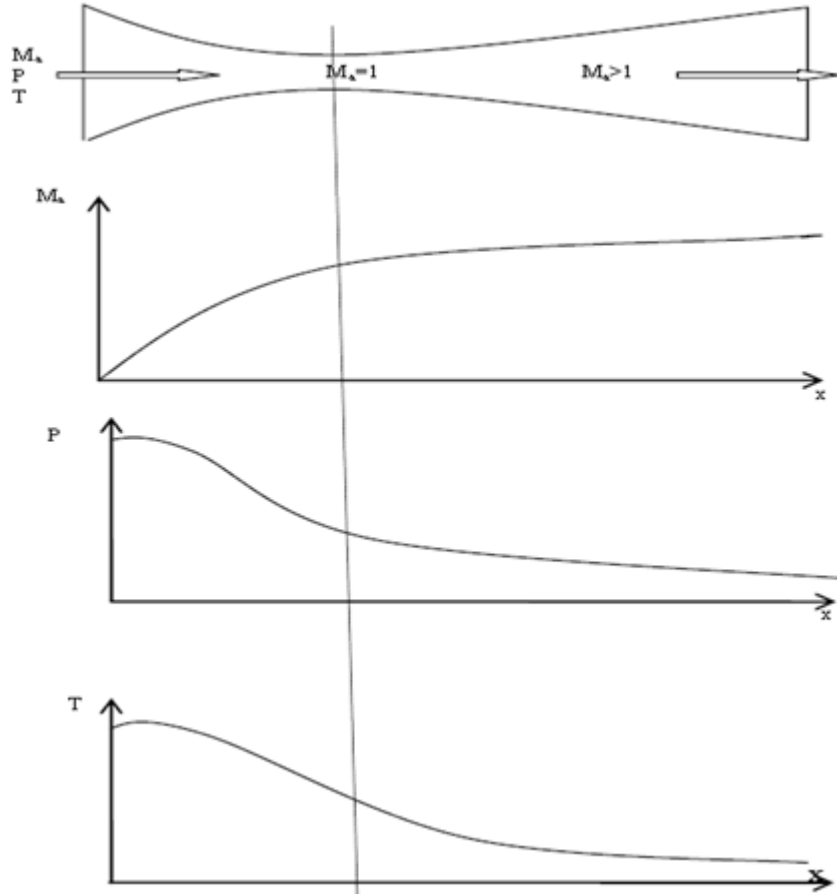
Çizelge 4.1. Modelleme parametreleri için varsayılan değerler

$c_{b1} = 0.1355$	$c_{w2} = 0.3$	$c_{w3} = 2$	$C_{Rot} = 2$
$c_{b2} = 0.622$	$c_{v2} = 7.1$	$K_v = 0.41$	$\sigma=2/3$

BÖLÜM V

SONUÇLAR

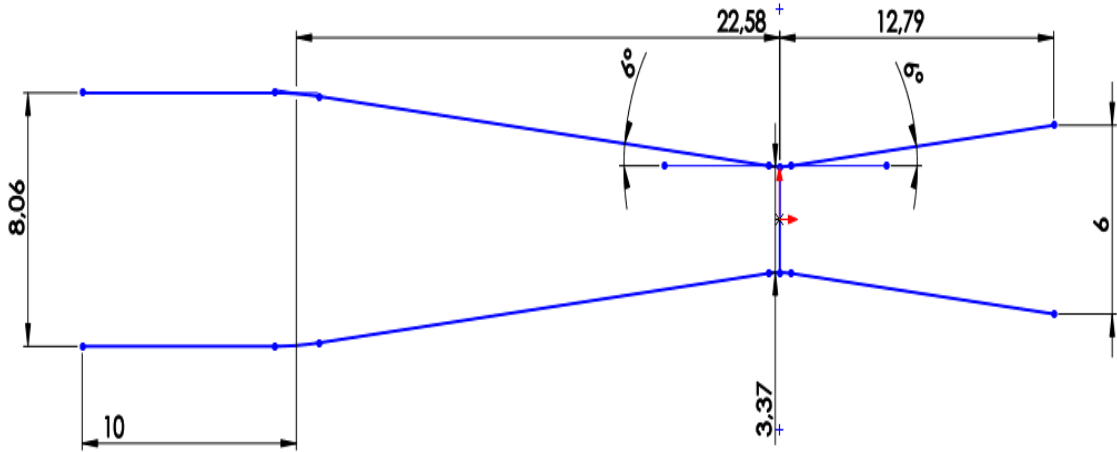
Yakınsak bir lülede bir akışkanın çıkabileceği en yüksek hız, lülenin çıkış düzleminde (boğaz) oluşan ses hızı ($Ma=1$) ile sınırlıdır. Akışkanın sesüstü hızlara ($Ma>1$) çıkarılması ve bu sayede basıncının iyice düşürülebilmesi yalnızca boğazdaki sesaltı lüleye ıraksak akış kısmı eklenerek gerçekleştirilebilir. Şekil 5.1’ de görüldüğü gibi belirli bir basınç, sıcaklık ve hızla ($Ma<1$) sesüstü lüleye giren akışkanın hızı tam boğazda ses hızına ($Ma=1$) ulaşırken basınç ve sıcaklığı sesüstü lüle boyunca azalmaktadır.



Şekil 5.1. Sesüstü lülede mach sayısı, sıcaklık ve basıncın lüle boyunca değişimi

Bu çalışmada, sistem çalışma şartlarını sağlayacak nihai geometri, sesüstü lülede giriş çapı, çıkış çapı ve boğaz çapı sırasıyla 8,06 mm, 6 mm ve 3,37 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Sesüstü lüle için ayrıntılı geometrik özellikler Şekil 5.2’ de verilmiştir.

Tasarlanan sesüstü lülede farklı giriş basınçlarına göre sayısal çözümler elde edilmiş, her bir giriş basıncı için sesüstü lüle boyunca mach sayısı, sıcaklık ve basınç değişimlerinin grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca ses üstü lüle uzunlukları değiştirilerek yeni parametreler oluşturup sayısal olarak çözülmüştür.

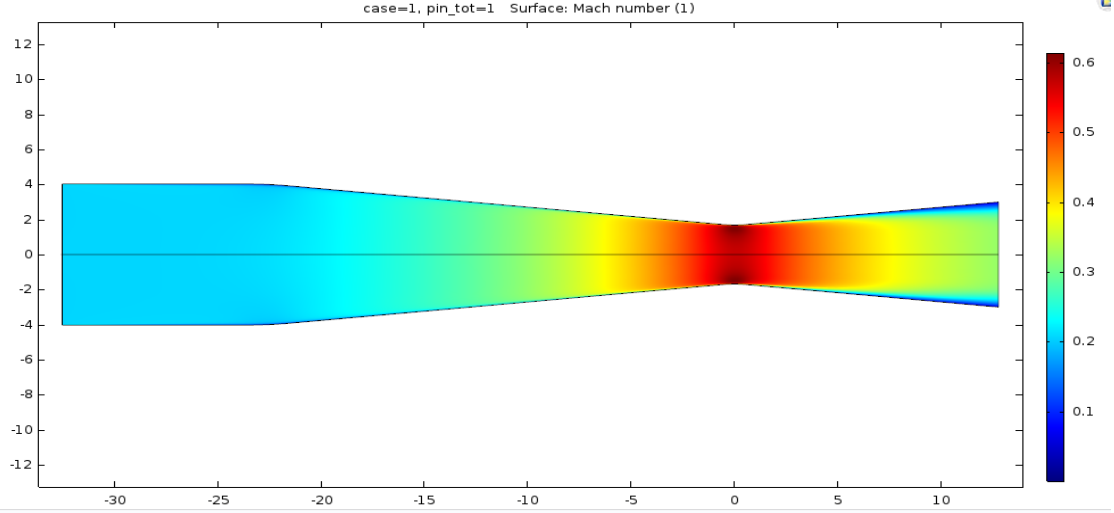


Şekil 5.2. Sesüstü lüle tasarımı

Yakıtın (birincil akışkan) basıncını karışım bölgesi girişinde Egzoz gazı (İkincil akışkan) basıncından daha düşük seviyelere getirebilmek için tasarlanan ejektör sesüstü lülesinde gerçekleşen olayları ifade eden matematiksel denklemler COMSOL multiphysics ticari yazılımı kullanılarak çözülmüştür.

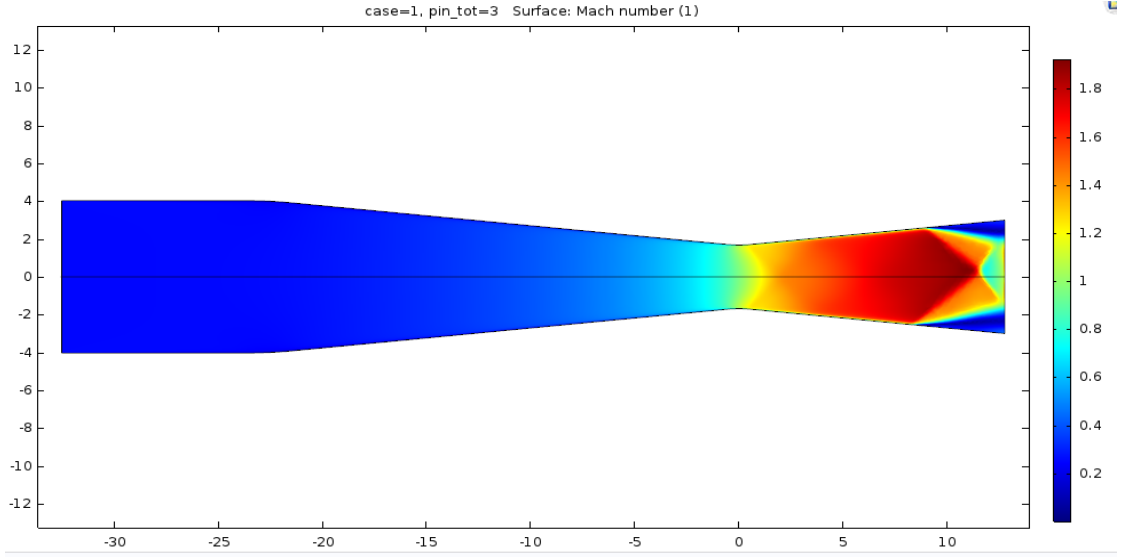
Ejektörlerde sesüstü lüle kullanarak birincil akışı sesüstü hızlara ($Ma > 1$) çıkarmaktaki asıl amaç aslında akışkanın basıncını, hızındaki artışa bağlı olarak ikincil akışkan basıncından daha düşük seviyelere getirerek vakum etkisi ile ikincil akışkanı akışa dahil etmektir.

Şekil 5.3 giriş basıncı 1 bar olduğunda sesüstü lüle boyunca değişen mach sayısını göstermektedir. Lüle boyunca akış hızının en yüksek olduğu nozul boğazında bile sesüstü hızlara ulaşılamamış, mach sayısı ise en fazla 0.6 olmuştur. Lüle boğazından sonra ıraksak kesitte de mach sayısı giderek düşmüş, akış hızı azalmıştır.



Şekil 5.3. Giriş basıncı bir bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi

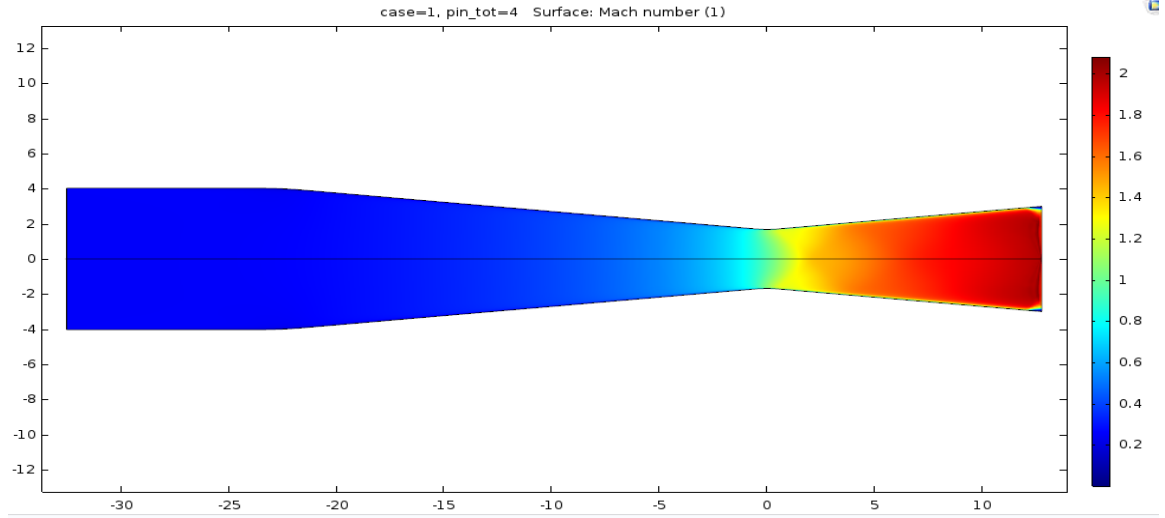
Şekil 5.4 giriş basıncının 3 bar olduğu durumdaki lüle eksenı boyunca mach sayısının değişimini göstermektedir. Sesüstü lüle boğazında akış, ses hızına ulaşmış ve ıraksak lülenin giriş bölgesinde lokal olarak sesüstü hızlara ulaşmış olsa bile sesüstü lülenin çıkışında sesaltı hıza tekrar düşmüştür.



Şekil 5.4. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi

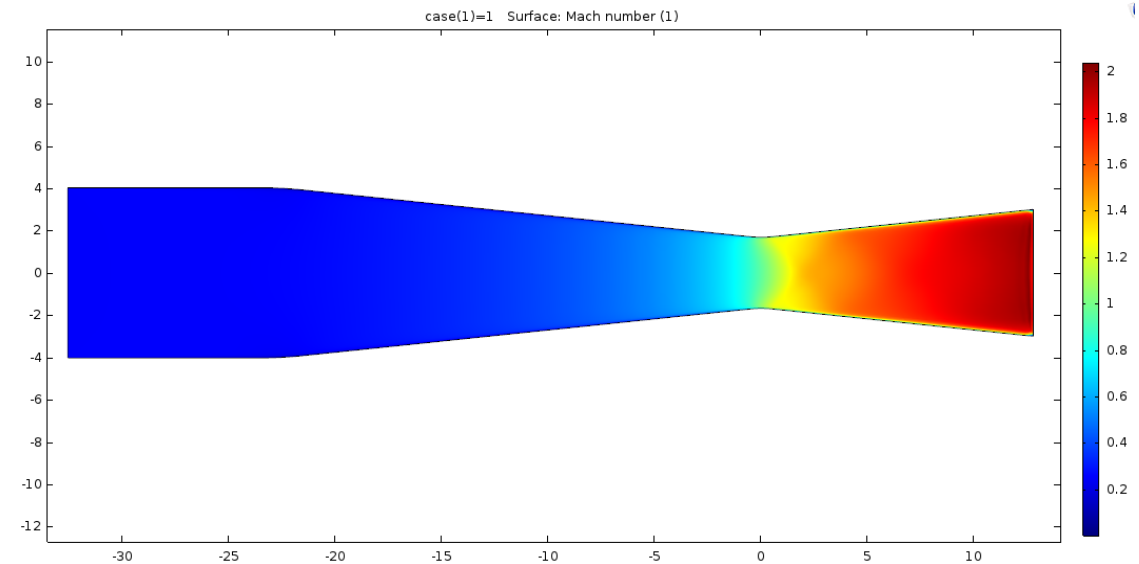
Şekil 5.5 giriş basıncının 4 bar olduğu durumdaki lüle eksenı boyunca mach sayısının değişimini göstermektedir. Sesüstü lüle boğazında akış ses hızına ulaşmış, lüle çıkışına yakın bölgelere kadar hızlanarak devam etmiş sesüstü hızlara ulaşmıştır.

Fakat Lüle çıkışında özellikle nozul duvarına yakın bölgelerde akış hızında ani düşüşler olmuş ve mach sayısı yaklaşık 0.5'lere kadar düşmüştür.



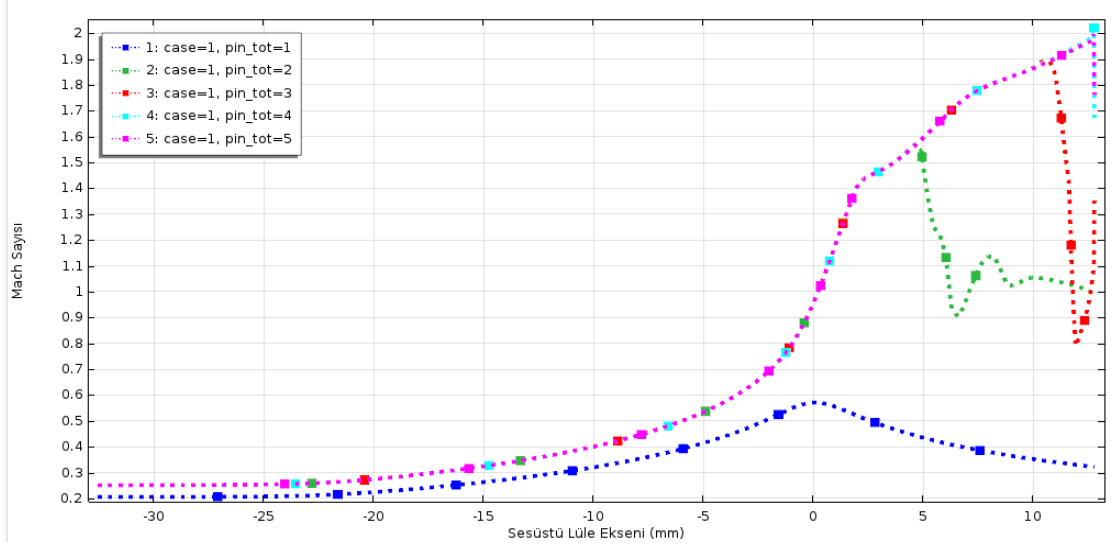
Şekil 5.5. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi

Giriş basıncı 5 bar, giriş sıcaklığı 700 K ve giriş mach sayısı 0,2 olduğu durumda optimum sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.6 optimum şartlarda sesüstü lülenin eksen boyunda mach sayısının değişimini göstermektedir. Sesüstü lülede istenildiği gibi mach sayısı tam boğazda 1 olduğu görülmektedir. Sesüstü lüle çıkışında da istenildiği gibi sesüstü akış elde edilmiştir.



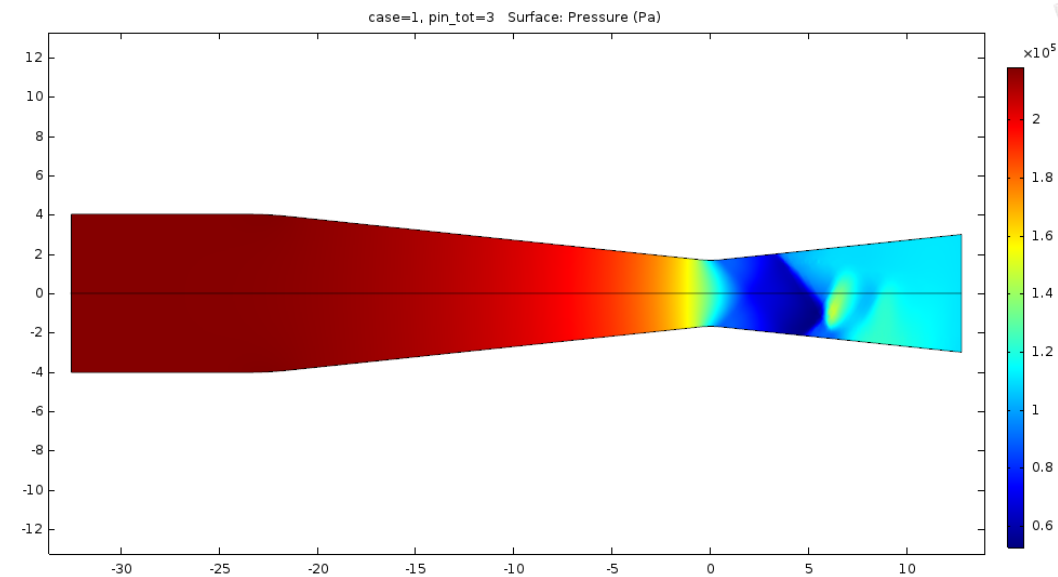
Şekil 5.6. Giriş basıncı beş bar olduğunda sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi

Şekil 5.7 giriş basıncının 1, 3, 4 ve 5 bar olması durumunda sesüstü lüle boyunca mach sayısının değişimini göstermektedir. Sesüstü lülede giriş basıncının 5 bar olduğu durumda lüle boğazı ve lüle çıkışında akış hızında optimum şartlar sağlanmıştır.



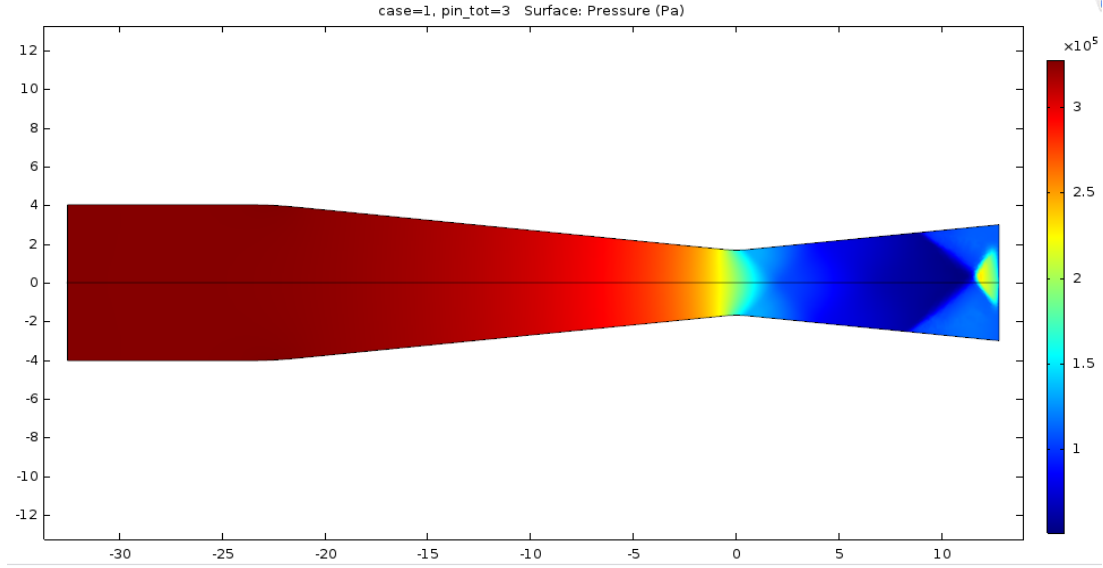
Şekil 5.7. Farklı giriş basınçlarında sesüstü lüle boyunca mach sayısı değişimi

Şekil 5.8 giriş basıncın 2 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca basınçta meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle boğazında basıncın yaklaşık 1.5 bar, lüle çıkışında ise yaklaşık 1.2 bar olduğu görülmektedir. İraksak lülenin bazı bölgelerinde basınçta artmalar ya da azalmalar mevcuttur.



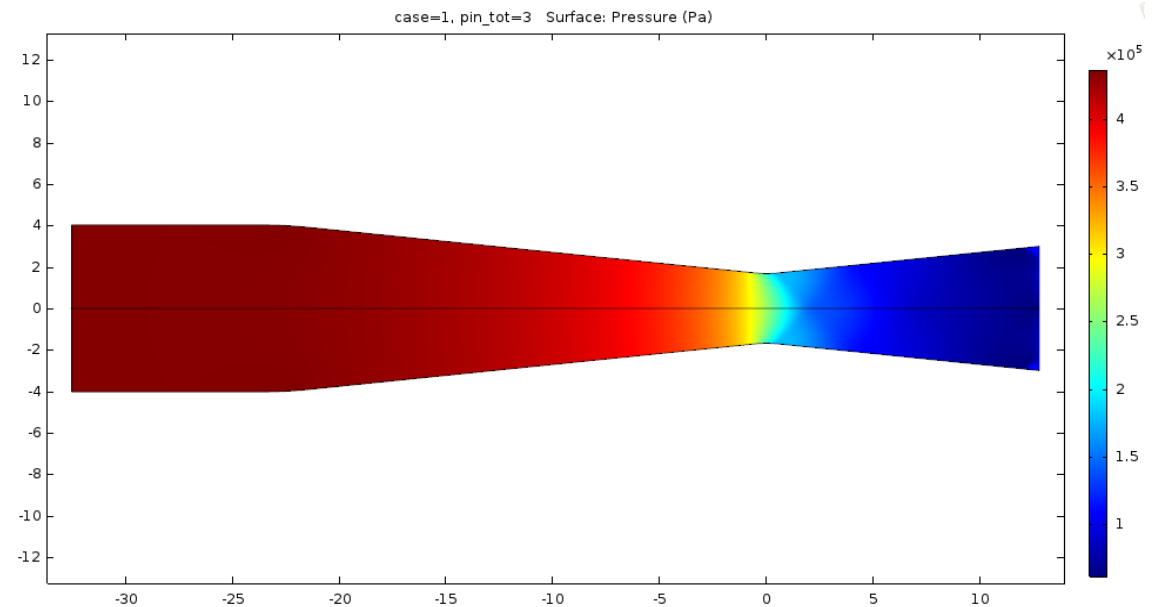
Şekil 5.8. Giriş basıncı iki bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi

Şekil 5.9 giriş basıncın 3 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca basınçta meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle boğazında basıncın yaklaşık 2 bar, lüle çıkışında ise yaklaşık 1 bar olduğu fakat lüle çıkışında ani basınç dalgalanmalarının olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi

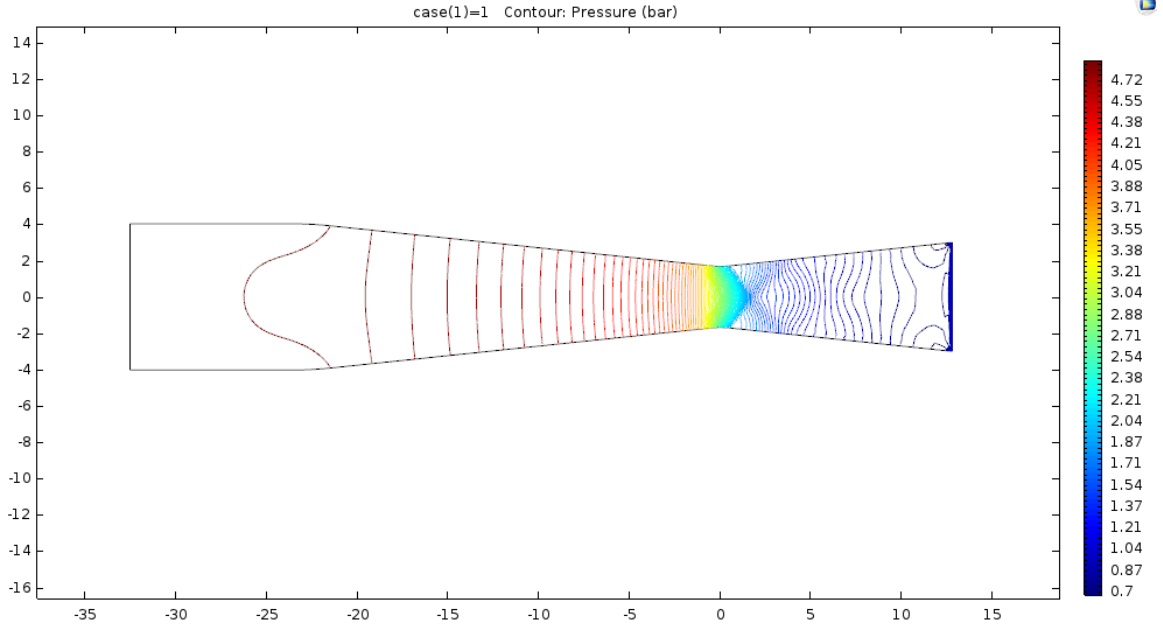
Şekil 5.10 giriş basıncın 4 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca basınçta meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle boğazında basıncın yaklaşık 2.5 bar, lüle çıkışında basıncın homojen dağıldığı ve yaklaşık 1 bar olduğu görülmektedir.



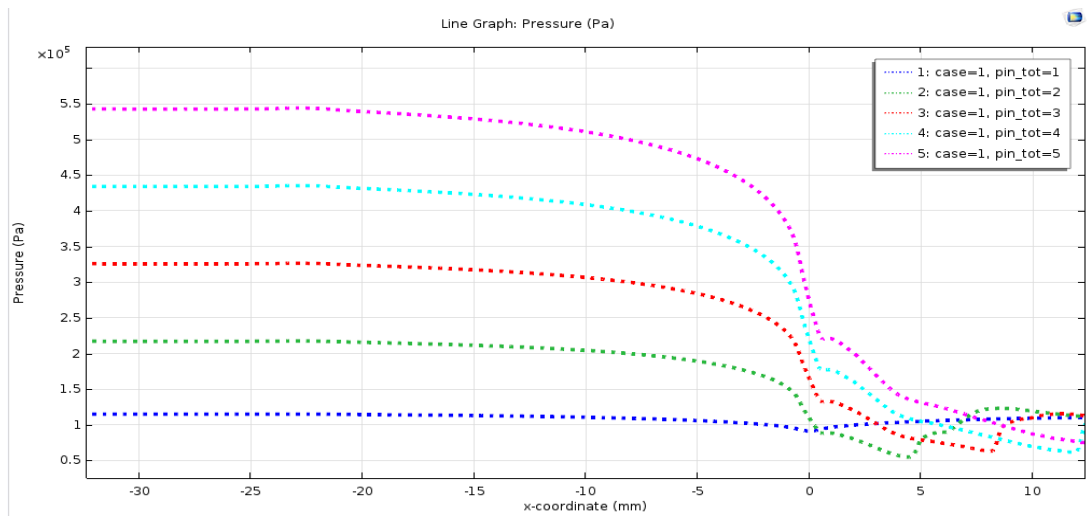
Şekil 5.10. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi

Şekil 5.11 sesüstü lüle boyunca akışkan basıncındaki değişimi göstermektedir. Birincil akışkan (Metan gazı) yaklaşık 5 bar basınçla sesüstü lüleye girmiş ve sesüstü lüleyi yaklaşık 0,7 bar basınçla terk etmiştir. Bu durum istenildiği gibi akışkanın sesüstü hızlara çıkmasına bağlı olarak basıncındaki düşüşü elde etmemizi sağlamıştır.

Bu basınç düşüşü ikincil akışkanı (anot egzoz gazı) akışa dahil etmemize olanak sağlayacağı düşünülmektedir.



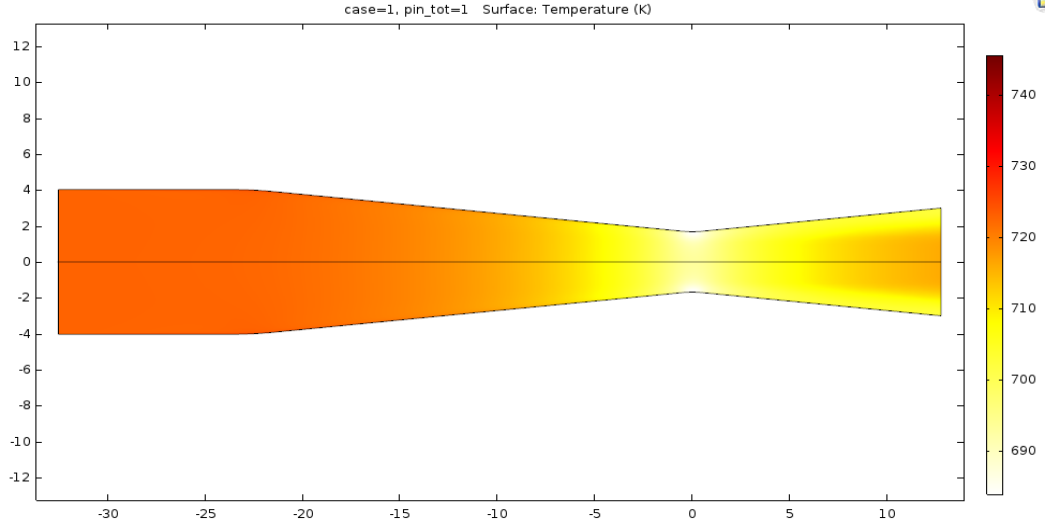
Şekil 5.11. Giriş basıncı beş bar olduğunda sesüstü lüle boyunca basınç değişimi



Şekil 5.12. Farklı giriş basınçlarında sesüstü lüle boyunca basınç değişimi

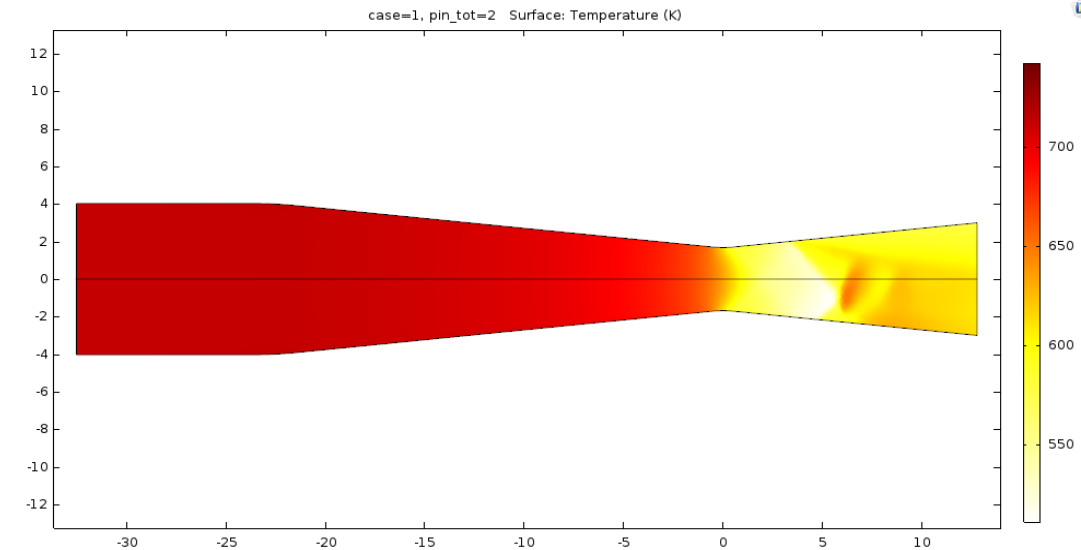
Şekil 5.13 giriş basıncın 1 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca sıcaklıkta meydana gelen değişimi göstermektedir.

Lüle girişinde sıcaklık 720 K iken, lüle boğazında sıcaklık yaklaşık 690 K'e kadar düşmekte, lüle çıkışında ise yaklaşık olarak 715 K'e kadar çıkmaktadır. Iraksak lüle boyunca sıcaklığın artması dizayn açısından istenmeyen bir durumdur.



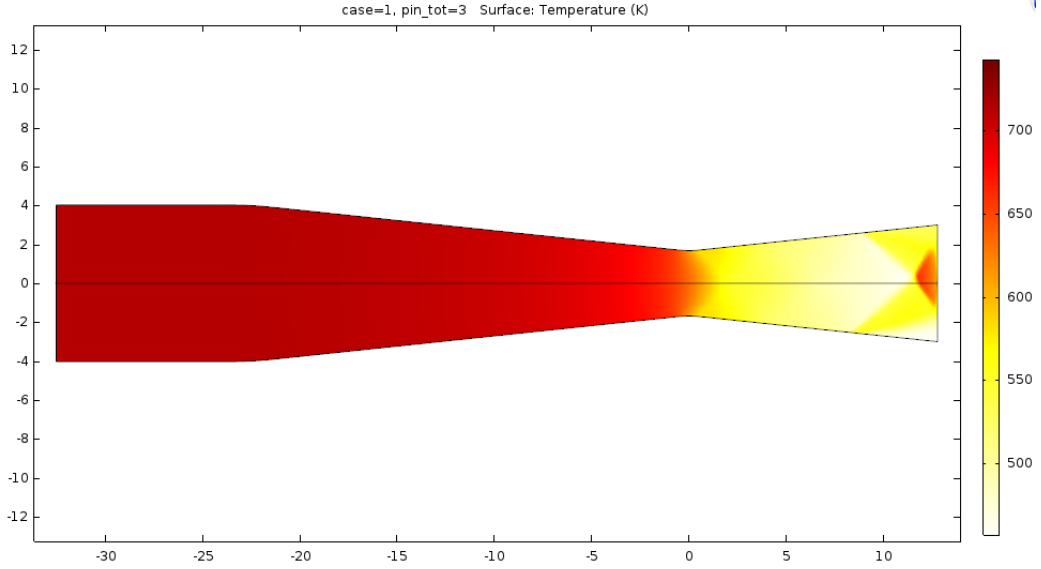
Şekil 5.13. Giriş basıncı bir bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 5.14 giriş basıncın 2 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca sıcaklıkta meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle girişinde sıcaklık yaklaşık 710 K iken, lüle boğazında sıcaklık yaklaşık 650 K'e kadar düşmekte, lüle çıkışında ise yaklaşık olarak 550 K'e kadar düşmektedir. Iraksak lüle boyunca sıcaklık dağılımı homojen değildir.



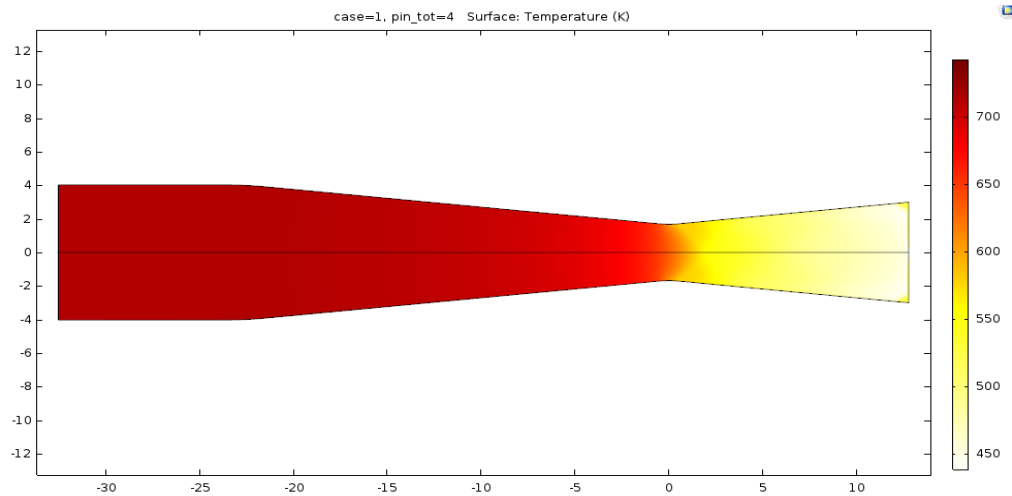
Şekil 5.14. Giriş basıncı iki bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 5.15 giriş basıncın 3 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca sıcaklık meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle girişinde sıcaklık yaklaşık 710 K iken, lüle boğazında sıcaklık yaklaşık 650 K'e kadar düşmekte, ıraksak lüle boyunca ise sıcaklık dağılımı belli bölgelerde artmaktadır.

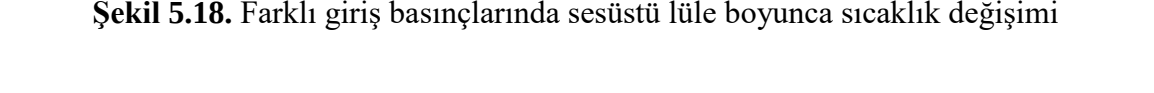


Şekil 5.15. Giriş basıncı üç bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi

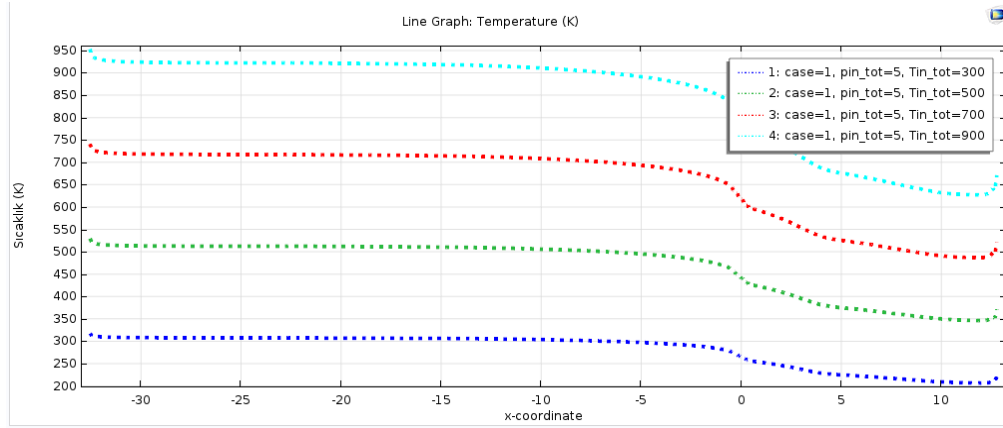
Şekil 5.16 giriş basıncın 4 bar olduğu durumda sesüstü lüle boyunca sıcaklık meydana gelen değişimi göstermektedir. Lüle girişinde sıcaklık yaklaşık 710 K iken, lüle boğazında sıcaklık yaklaşık 650 K'e kadar düşmekte, lüle çıkışında ise yaklaşık olarak 450 K'e kadar düşmektedir.



Şekil 5.16. Giriş basıncı dört bar olduğunda sesüstü lüle boyunca sıcaklık değişimi

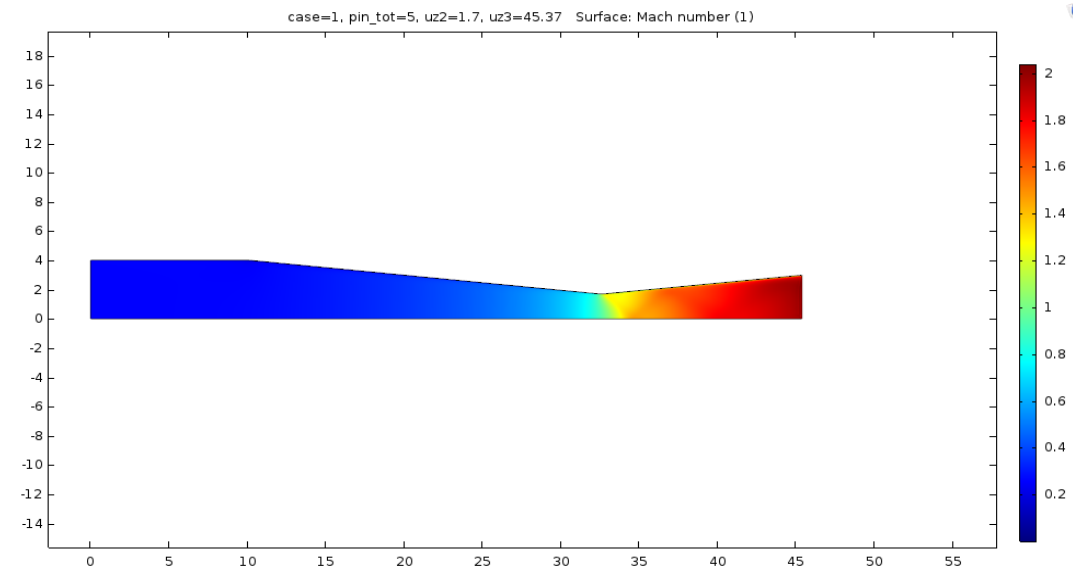


Şekil 5.19 farklı giriş sıcaklıklarının (300K, 500K, 700K, 900K) sesüstü lüle boyunca değişimini göstermektedir.

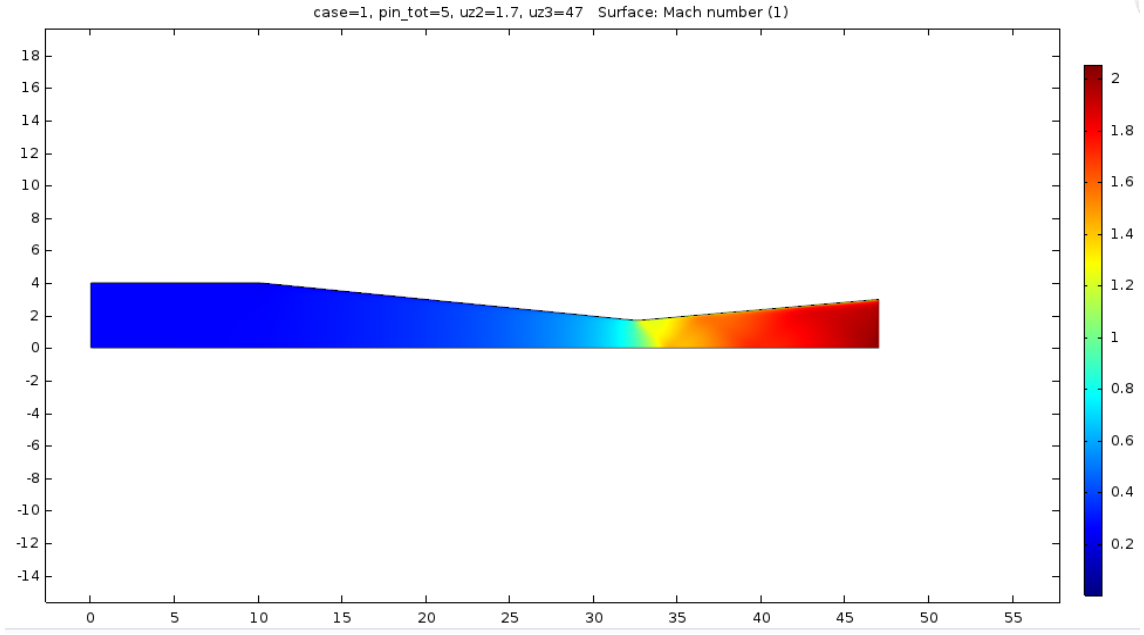


Şekil 5.19. Farklı giriş sıcaklıklarının sesüstü lüle boyunca değişimi

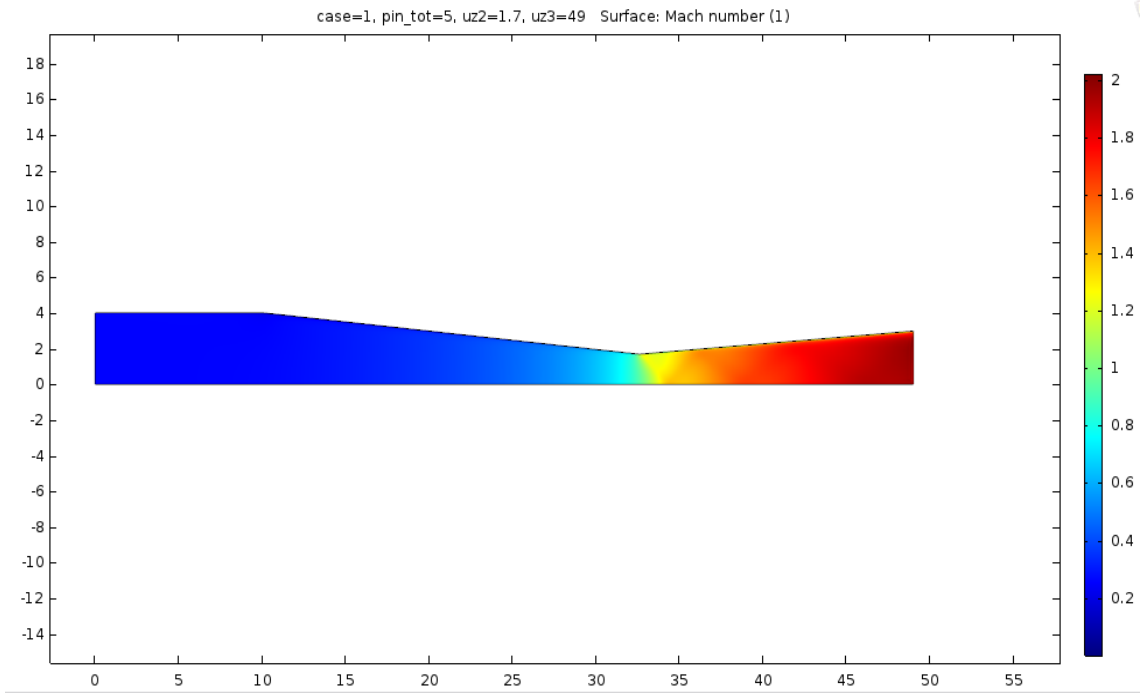
Tasarlanan nozulun, farklı uzunluklarındaki değişimlerin; mach sayısı, basınç ve sıcaklık dağılımlarına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Giriş basıncı 5 bar, giriş sıcaklığı 700 K ve giriş mach sayısı 0.2 seçilerek bu şartlardaki sesüstü lüle uzunlukları değiştirilmiş (45.37 mm, 47 mm, 49 mm, 51 mm, 53 mm ve 55 mm), bu çalışma koşullarında sayısal olarak çözülmüştür. Uzunluklardaki değişimin nozul boğazı ve çıkıştaki mach sayısı üzerinde etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.26). Sesüstü lüle uzunluklarındaki değişimin basınç değişimine etkisi Şekil 5.27’de, sıcaklık değişimine etki de Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



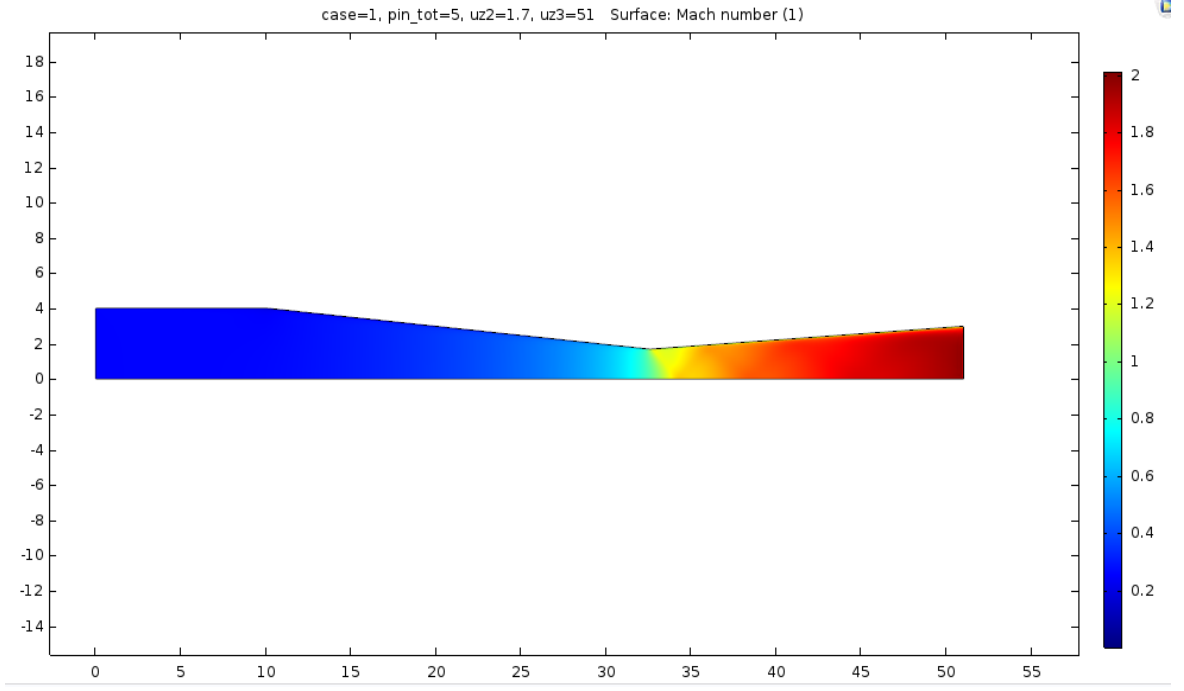
Şekil 5.20. Sesüstü lüle uzunluğunun (45.37 mm) mach sayısı değişimine etkisi



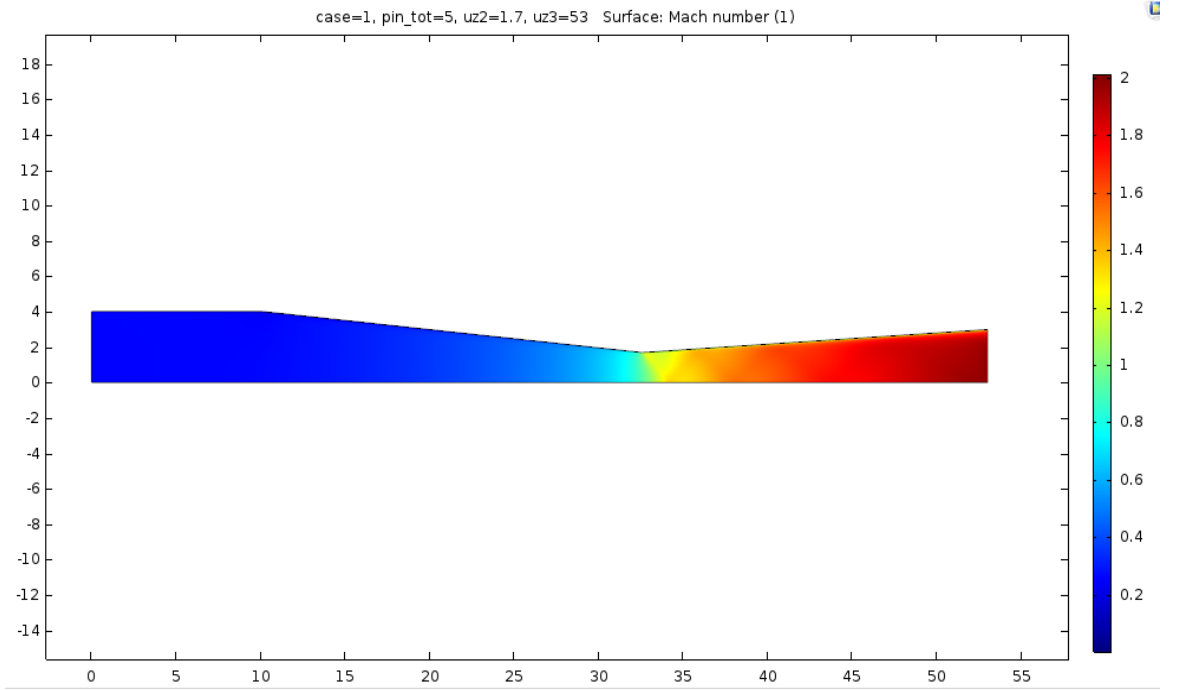
Şekil 5.21. Sesüstü lüle uzunluğunun(47 mm) mach sayısı değişimine etkisi



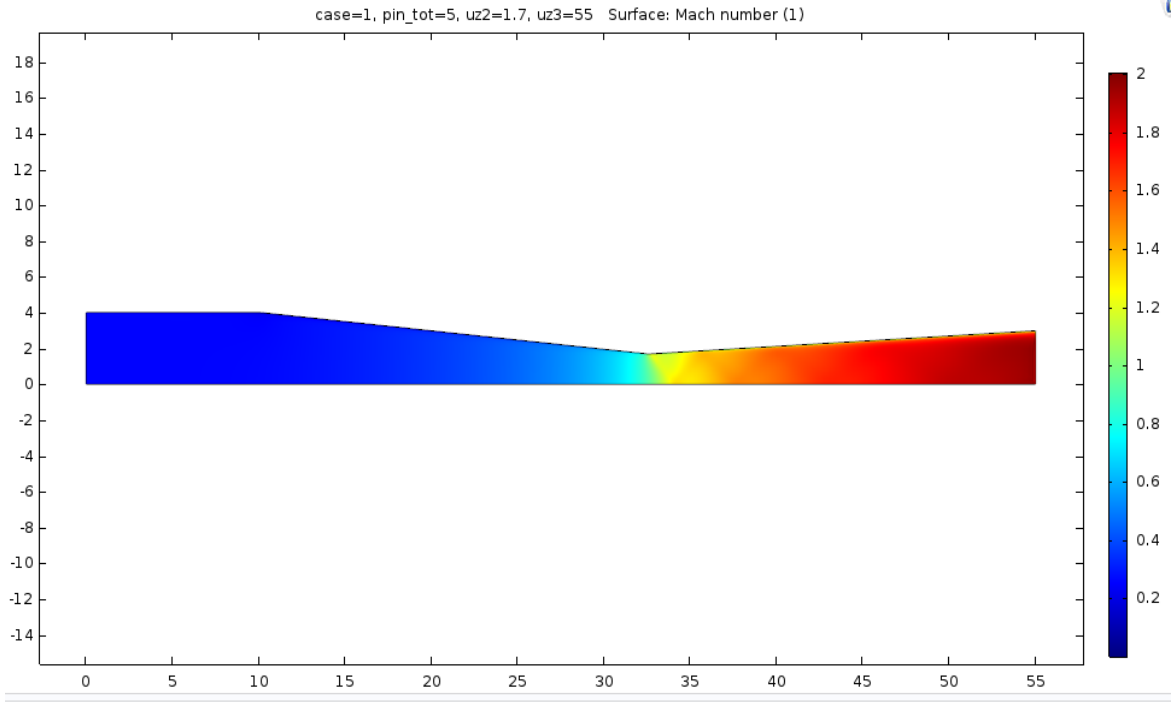
Şekil 5.22. Sesüstü lüle uzunluğunun(49 mm) mach sayısı değişimine etkisi



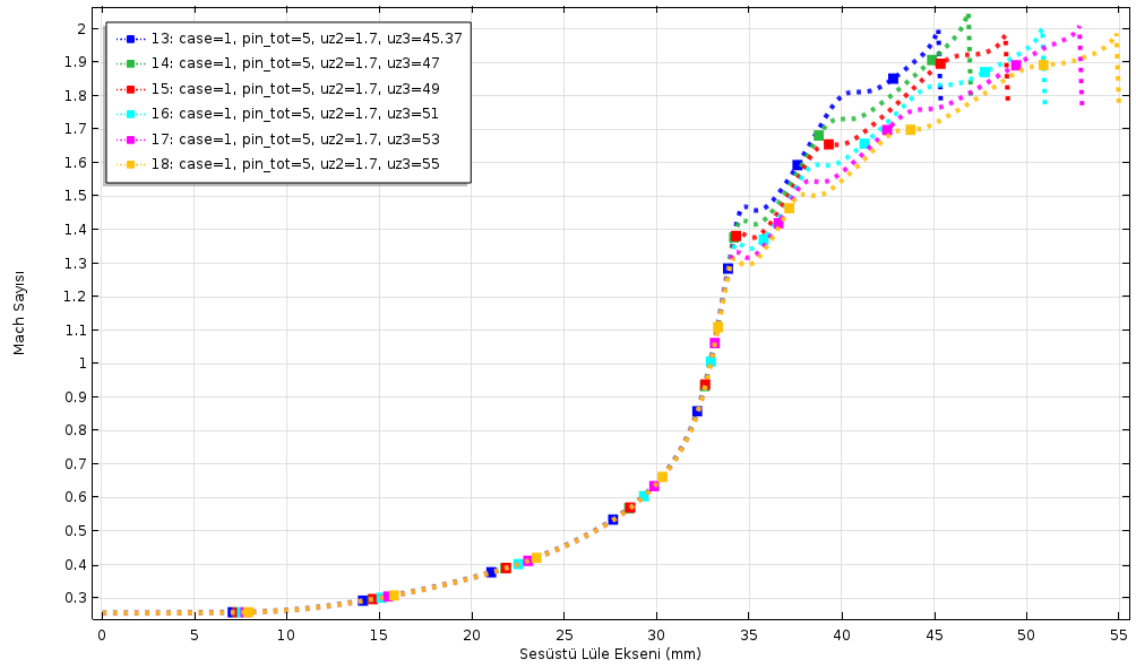
Şekil 5.23. Sesüstü lüle uzunluğunun(51 mm) mach sayısı değişimine etkisi



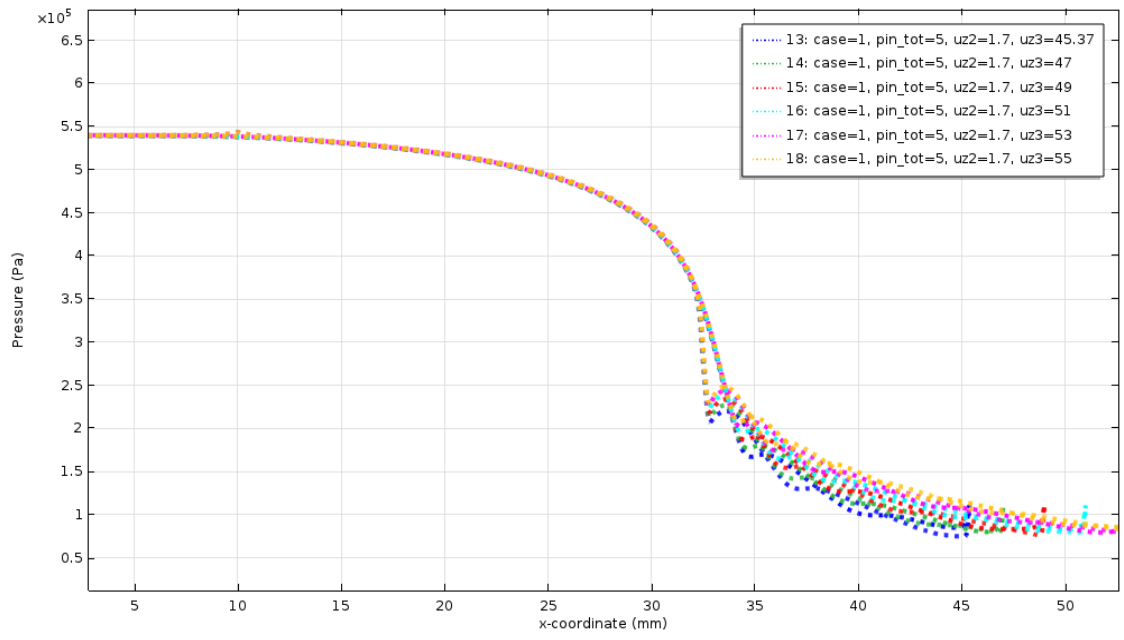
Şekil 5.24. Sesüstü lüle uzunluğunun(53 mm) mach sayısı değişimine etkisi



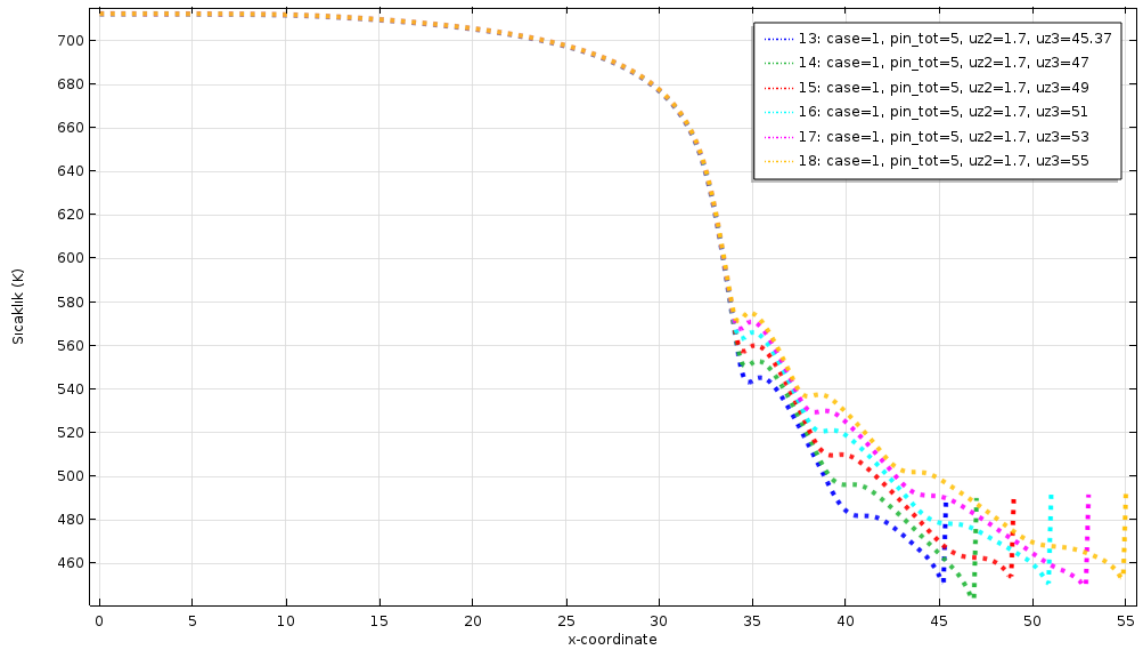
Şekil 5.25. Sesüstü lüle uzunluğunun(55 mm) mach sayısı değişimine etkisi



Şekil 5.26. Sesüstü lüle uzunluğunun mach sayısı değişimine etkisi



Şekil 5.27. Sesüstü lüle uzunluğunun basınç değişimine etkisi



Şekil 5.28. Sesüstü lüle uzunluğunun sıcaklık değişimine etkisi

BÖLÜM VI

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, 500W elektriksel güç kapasitesine sahip, metan ile çalışan, yakıt kullanım verimini arttıracak, KOYP sistemine geri beslendiğinde su buharıyla reformlama işlemini sağlayacak bir ejektörün nozul bölümü COMSOL MULTİPHYSİCS yazılımıyla sayısal olarak incelenmiştir. Sistemde birincil akışkan için $0,14 \times 10^{-3}$ kg/s olarak metan giriş debisi hesaplanmış ve çalışma koşullarına uygun sıcaklık ve basınç aralıkları belirlenmiştir. Ejektör nozul geometrisi giriş çapı, çıkış çapı ve boğaz çapı sırasıyla 8,06 mm, 6 mm ve 3,37 mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Tasarlanan geometriye farklı giriş basınçları (1, 2, 3, 4, 5 bar) uygulanarak sayısal çözümler elde edilmiş, her bir giriş basıncı için sesüstü lüle boyunca mach sayısı, sıcaklık ve basınç değişimlerinin grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca, nozuldaki uzunluk değişimlerinin; mach sayısı, basınç ve sıcaklık dağılımlarına etkisi sayısal olarak incelenmiş, giriş basıncı 5 bar, giriş sıcaklığı 700 K ve giriş mach sayısı 0.2 seçilerek bu şartlarda sesüstü lüle uzunlukları değiştirilmiş (45.37 mm, 47 mm, 49 mm, 51 mm, 53 mm ve 55 mm) ve sayısal olarak çözülmüştür. Giriş basıncı 5 bar, giriş sıcaklığı 700 K ve giriş mach sayısı 0,2 olduğu durumda optimum sonuçlar elde edilmiş, bu şartlarda sesüstü lülede istenildiği gibi mach sayısı tam boğazda 1 olduğu, lüle çıkışında da istenildiği gibi sesüstü hızlara ulaştığı ve lüle çıkışındaki basıncında ikincil akışkana vakum oluşturabileceği görülmüştür. Diğer giriş basınçlarında akış lüle boğazında ses hızına ulaşamamış ya da lüle çıkışında bölgesel hız düşüşleri meydana gelmiştir. Uzunluklardaki değişimin ise nozul boğazı, mach sayısı, basınç ve sıcaklıklara üzerinde etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir.

Sunulan çalışma, literatürde KOYP sistemine uygun olarak geliştirilen sınırlı sayıdaki ejektör modelleme çalışmaları referans alınarak yapılmıştır. Ancak ejektör nozulu geliştirmesi özelinde yegane çalışmalardan birisidir. Bu kapsamda sonraki çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Dang, S., Yaneeporn, P. and Amornchai, A., “Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation”, *Journal of Power Sources*, 208, 120-130, 2012.

Dere, E., CFD Kullanarak gaz ejektörlerinin performansının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray, 2013.

Dietrich, U., Oelze, J., Lindermeir, A., Spitta, C., Steffen, M., Küster, T., Chen, S., Schlitzberger, C. and Leithner R., “Efficiency gain of solid oxide fuel cell systems by using anode offgas recycle – Results for a small scale propane driven unit”, *J. Power Sources*, 196, 7152-7160, 2011.

EAMES, I.W., “A new prescription for the design of supersonic jet-pumps: the constant rate of momentum change method”, *Applied Thermal Engineering*, 22, 121–31, 2002.

Eames, W., Milazzo, A., Paganini, D. and Livic M., “The design manufacture and testing of a jet-pump chiller for air conditioning and industrial application”, *Applied Thermal Engineering*, 58, 234–40, 2013.

FERRARI, M.L., Traverso, A., Magistri, L. and Massardo, A.F., “Influence of the anodic recirculation transient behaviour on the SOFC hybrid system performance”, *Journal of Power Sources*, 149, 22-32, 2005.

Hooger, G., Fuel Cell Technology Handbook, *Boca Raton*, FL: CRCPress, 1667s. 2003.

Jenn-Jiang, H., Kuo-Ching C., Ching-Chang, C. and Chih-Hong L., “Numerical and experimental investigation into passive hydrogen recovery scheme using vacuum ejector”, *Journal of Power Sources*, 275, 539-546, 2015.

Kumar, V., Singhal, G. and Subbarao, P., “Study of supersonic flow in a constant rate of momentum change (CRMC) ejector with frictional effects”, *Applied Thermal Engineering*, 3, 61-71, 2013.

Larrain, D. and Van Herle, J., Favrat D., “Simulation of SOFC stack and repeat elements including interconnect degradation and anode reoxidation risk”, *J. Power Sources*, 161, 392-403, 2000

Mai, A., Sfeir, J. and Schuler, A., “Status of SOFC stack and system development at Hexis”, Fuel Cell Seminar, 12(1). CD 000453, 2007.

MARSANO, F., Magistri, L. and Massardo A.F., “Ejector performance influence on a solid oxide fuel cell anodic recirculation system”, *Journal of Power Sources*, 129, 216-28, 2004.

Maximilian, E., Roland, P., Ludger, B. and Detlef S., “Comparison of a fuel-driven and steam driven ejector in solid oxide fuel cell systems with anode off-gas recirculation: Part-load behavior”, *Journal of Power Sources*, 277, 251-260, 2015.

Ming, L., Lanzini, A., Halliop, W., Cobas, V.R.M., Verkooijen, A.H.M. and Aravind, P.V., “Anode recirculation behavior of a solid oxide fuel cell system: A safety analysis and a performance optimization”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 2868-2883, 2013.

Noponen, M., Halinen, M., Saarinen, J. and Kiviaho J., “Experimental study of anode gas recycling on efficiency of SOFC”, *ECS Trans.*, 5 545-551, 2007.

Ralph, D., Jana, O., Andreas, L., Christian, S., Michael, S., Torben, K., Shaofei, C., Christian, S. and Reinhard L., “Efficiency gain of solid oxide fuel cell systems by using anode offgas recycle-results for a small scale propane driven unit”, *Journal of Power Sources*, 196, 7152-7160, 2010.

Riensch, E., Meusinger, J., Stimming, U. and Unverzagt, G., “Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant”. Part II: variation of the flowsheet”, *J. Power Sources*, 71, 306-314, 1998.

Schuler, A., Nerlich, V., Doerk, T. and Mai, A., “Galileo 1000 N e status of development and operation experiences”, ***Proceedings of 9th European Solid Oxide Fuel Cell Forum***, 2, 98, 2010.

Singhal, C. S., “Solid Oxide Fuel Cells”, ***The Electrochemical Society***, 41-44, 2007.

Stambouli, A. B. and Traversa, E., “Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews*** 6, 433-455, 2002.

Sumeru, K., Nasution, H. and Ani, F.N., “A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 2012.

Taşdelen, G., “Katı oksit yakıt hücreleri için ejektör tasarımı ve analizi”, ***Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Sakarya, 2015.

W. Eames, I., Wu, S., Worall, M. and Aphornratana S., “An experimental investigation of steam jet-pumps for applications in jet-pump refrigerators powered by low-grade heat, Proceedings of the IMechE”, ***Power and Energy***, Proceedings A, vol. 213, issue A5, Professional Engineering Publications, pp. 351 361. ISSN 0957-6509.

ZHU, Y., Cai W., Li, Y. and Wen C., “Anode gas recirculation behavior of a fuel ejector in hybrid solid oxide fuel cell systems: Performance evaluation in three operational modes”, ***Journal of Power Sources***, 185, 1122-30, 2008.

ZHU, Y., Cai, W., Wen, C. and Li Y., “Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system”, ***Journal of Power Sources***, 173, 437-49, 2009.

ÖZ GEÇMİŞ

Uğur Çatık 20.12.1990 yılında Kastamonu’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kastamonu’da tamamladı. Lise eğitimini Prof. Dr. Saime İnal Savi Lisesi’nde tamamlayan Çatık, lisans eğitimini 2009-2014 yılları arasında NİĞDE Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. 2011-2012 bahar yarıyılında LLP/Erasmus programı ile yurt dışında 6 ay eğitim gördü. 2014 yılında yüksek lisans eğitimine yine aynı üniversitede başladı. Bilim alanındaki ilgi alanları ısı transferi ve termodinamiktir.

