

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ (KOYH) EJEKTÖRÜ
AKIŞ KANALININ SAYISAL YÖNTEMLERLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin AKALAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

MAYIS 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ (KOYH) EJEKTÖRÜ
AKIŞ KANALININ SAYISAL YÖNTEMLERLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin AKALAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK

MAYIS 2023

Yasin AKALAN tarafından hazırlanan “KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ (KOYH) EJEKTÖRÜ AKIŞ KANALININ SAYISAL YÖNTEMLERLE GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 08.05.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Enerji** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ahmet KOLİP**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Cemil YİĞİT**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ (KOYH) EJEKTÖRÜ AKIŞ KANALININ SAYISAL YÖNTEMLERLE GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(29/05/2023).

Yasin AKALAN





Cumhurbaşkanımıza, babama, anneme, eşime ve çocuklarıma...



TEŞEKKÜR

Öncelikle tez süresi boyunca ülkemizin yürütme makamında görev alan, dik duruşundan, yerli ve milli mücadelesinden yola çıkarak çalışmamız çok çalışmamız gerektiği bilincini bize kazandıran, milletine sevgili, saygıdeğer Sayın Cumhurbaşkanımız Recep Tayyip ERDOĞAN'a teşekkür ve tebriklerimi iletirim.

Bu tez çalışmasının başından itibaren her aşamasında bana güvenerek yol gösteren ve bilimsel tartışmalar yaparak doğru sonuca ulaşmamı sağlayan, anlayış ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, bilgi ve deneyimine güvendiğim danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, özel hayatımda ve öğrenim hayatım boyunca, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve tez çalışması sırasında sürdüren, bana her zaman güvenen ve inanan babam Yaşar AKALAN'a ve annem Huriye AKALAN'a, yaşadığımız her türlü sıkıntı ve zorluğa rağmen benim yanımda duran, bana her zaman destek veren eşim Büşra AKALAN'a, oğlum Yasir AKALAN'a ve kızım Yüstra AKALAN'a ithaf ediyorum.

Yasin AKALAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ	3
3. EJEKTÖR VE AKIŞ KANALI GEOMETRİK PARAMETRELERİ	11
4. TAGUCHI DENEY TASARIMI	19
5. SAYISAL ANALİZ	23
6. BİRİNCİ KADEME ANALİZLER VE SONUÇLARI	25
7. İKİNCİ KADEME ANALİZLER VE SONUÇLARI	37
7.1. $D_m=3,48\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları	39
7.2. $D_m=5,22\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları	43
7.3. $D_m=6,96\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları	47
7.4. En Uygun Akış Kanalı Geometrilerinin Karşılaştırılması	51
8. EN UYGUN GEOMETRİLİ MODELİN Değerlendirilmesi	55
8.1. Ağ Yapısı ve Eleman Sayısından Bağımsızlık Kontrolü	55
8.2. En Uygun Geometrilili Modelde NXPnin Etkisi	58
8.3. En Uygun Geometrilili Modelde Birincil Akışkan Giriş Basıncının Etkisi	60
8.4. En Uygun Geometrilili Modelde Birincil Akışkan Giriş Sıcaklığının Etkisi	63
9. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	67
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79



KISALTMALAR

1-B	: Bir Boyutlu
1-D	: One dimensional
AYH	: Alkali Yakıt Hücresi
CFD	: Computational fluid dynamic
CH₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
DMYH	: Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
EKYH	: Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi
FAYH	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
GBÖ	: Geri Besleme Oranı
BKO	: Buhar karbon oranı
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
H₂	: Hidrojen
H₂O	: Su buharı
KOYH	: Katı Oksit Yakıt Hücresi
L27	: Taguchi ortogonal dizisi
mCHP	: Micro Combined Heat and Power
mBIG	: Mikro Birleşik Isı ve Güç
ANOM	: Ortalamaların Analizi (Analysis of Means)
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
NXP	: Birincil lüle çıkışının konumu
O	: Oksijen
PEMYH	: Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi
S/G	: Sinyal/Gürültü oranı
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell



SİMGELER

P_{el}	: Elektriksel güç üretimi [kW]
GBO_{HAD}	: HAD analizi sonucu geri besleme oranı
BKO_{HAD}	: HAD analizi sonucu buhar karbon oranı
η_{el}	: Elektrik üretim verimi
LHV	: Alt ısı değeri [J/mol] (Lower Heating Value)
U_f	: Yakıt kullanım oranı
$\dot{m}_p$	: Birincil akışkanın kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_s$	: İkincil akışkanın kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{p,0}$	: Birincil akışkanın giriş kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{p,HAD}$	: HAD analizi sonucu birincil akışkanın kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{s,0}$	: İkincil akışkanın giriş kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{s,3}$	: İkincil akışkanın karışım odası girişi kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{s,HAD}$	: HAD analizi sonucu ikincil akışkanın kütleli debisi [kg/s]
$\dot{n}_{CH_4}$	: Metan molekül debisi [kmol/s]
$\dot{n}_{H_2O}$	: Su buharı molekül debisi [kmol/s]
$\dot{n}_{CO}$	: Karbonmonoksit molekül debisi [kmol/s]
$\dot{n}_{CO_2}$	: Karbondioksit molekül debisi [kmol/s]
$\dot{n}_{H_2}$	: Hidrojen molekül debisi [kmol/s]
T_5	: Ejektör çıkış sıcaklığı [K]
$T_{p,0}$	: Birincil akışkan ejektör giriş sıcaklığı [K]
$T_{s,0}$	: İkincil akışkan ejektör giriş sıcaklığı [K]
p_5	: Ejektör çıkış basıncı [kPa]
p_p	: Birincil akışkanın giriş basıncı [kPa]
$p_{p,e}$	: İkincil akışın emilmeye başlandığı, birincil akışkan giriş basıncı [kPa]
$p_{p,c}$	: Ejektörün kritik koşulda çalıştığı, birincil akışkan giriş basıncı [kPa]
$p_{p,0}$	: Birincil akışkan ejektör giriş basıncı [kPa]
$p_{s,0}$	: İkincil akışkan ejektör giriş basıncı [kPa]
$p_{p,3}$	: Birincil akışkan karışım odası giriş basıncı [kPa]

$p_{s,3}$	: İkincil akışkan karışım odası giriş basıncı [kPa]
M_p	: Birincil akışkan lülesinin boğaz kesitindeki akışın mach sayısı
M_s	: Birincil akışkan lülesinin boğaz kesitindeki akışın mach sayısı
$M_{p,1}$	: Birincil akışkan lülesinin boğaz kesitindeki akışın mach sayısı
$M_{p,3}$	: Birincil akışkanın karışım odası giriş kesitindeki akışın mach sayısı
$v_{p,3}$	: Birincil akışkan jetinin karışım odasına giriş hızı [m/s]
$v_{s,3}$	: İkincil akışkan jetinin karışım odasına giriş hızı [m/s]
$v_s(r)$	: Emme odasının ikincil akışkan bölgesindeki hız dağılımı [m/s]
$D_{t,1}$	: Yakınsak-ıraksak lüle boğaz çapı [mm]
$D_{p,3}$	: Birincil akışkan jetinin karışım odası girişindeki çapı [mm]
$D_{s,3}$	: İkincil akışkan jetinin karışım odası girişindeki çapı [mm]
$D_{m,3}$	: İkincil akışkan jetinin karışım odası girişindeki çapı [mm]
α_1	: Yakınsak-ıraksak lüle genişleme açısı [°]
α_2	: Emme odası daralma açısı [°]
α_3	: Difüzör genişleme açısı [°]
α_4	: Birincil lüle dış yüzeyinin daralma açısı [°]
α_5	: Birincil lüle iç yüzeyinin daralma açısı [°]
$L_s=L_{s1}$	: Emme odasının sabit kesitli bölümünün eksenel uzunluğu [mm]
L_{s2}	: Emme odasının yakınsak bölümünün eksenel uzunluğu [mm]
L_m	: Karışım odası uzunluğu [mm]
L_d	: Difüzörün eksenel uzunluğu [mm]
L_{nd}	: Yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu [mm]
NXP	: Birincil lüle çıkış kesitinin emme odası giriş kesitine mesafesi [mm]
D_m	: Karışım odası çapı [mm]
D_t	: Birincil lülenin boğaz çapı [mm]
D	: İkincil akışkanın emme odasına giriş hattının çapı [mm]
d	: Birincil akışkan lülesi giriş hattının çapı [mm]
s	: Birincil akışkan lülesi boru cidar kalınlığı [mm]
y	: Taguchi sonuç verileri
$\bar{y}$	: Taguchi sonuç verilerinin aritmetik ortalaması
s^2_y	: Taguchi sonuç verilerinin varyansı
n	: Gözlem sayısı
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]

m	: Kütle [kg]
τ_{ij}	: Viskoz gerilme tensörü
Φ	: Viskoz disipasyon terimi
k	: Isı iletim katsayısı [W/mK]
R	: Gaz sabiti [kJ/kgK]
h	: Entalpi [kJ/kg]
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı [kJ/kgK]
μ	: Dinamik viskozite [kg/ms, Pa.s]
k-ϵ	: Türbülans modeli





TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. KOYHnin tasarım ve işletme koşulları [18].	12
Tablo 3.2. Hesaplanan ve seçilen ejektör tasarım parametreleri.	13
Tablo 3.3. Ejektör akış kanalı geometrik parametreleri için önerilen ve seçilen seviyeler.	16
Tablo 3.4. Ağ yapısı ve elaman sayısından bağımsızlık çalışması parametre seviyeleri ($D_m/D_t=6,6$ ve $D_m=3,9\text{mm}$).	17
Tablo 3.5. Ejektör akış kanalı birinci seviye analizinde kullanılan parametre seviyeleri ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	17
Tablo 4.1. $L_{27}(3^5)$ Ortogonal dizisi.	20
Tablo 6.1. Ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışması (Tablo 3.1.'deki işletme ve Tablo 3.2.'deki tasarım parametreleriyle yapılan analizler) sonuçları.	27
Tablo 6.2. Taguchi'nin $L_{27}(3^5)$ ortogonal dizisine uygun tasarlanan sayısal modeller ve HAD sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	29
Tablo 6.3. Tablo 6.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	30
Tablo 6.4. Tablo 6.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	31
Tablo 6.5. Tablo 6.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	31
Tablo 6.6. En uygun ejektör akış kanalı geometrik parametre seviyeli AKM-F1.7 modeli ve HAD sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	32
Tablo 6.7. AKM-F1.7 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 6.1) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	32
Tablo 7.1. Taguchi $L_{27}(3^6)$ Ortogonal dizisi.	38
Tablo 7.2. $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.	39
Tablo 7.3. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).	40
Tablo 7.4. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).	41
Tablo 7.5. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).	41
Tablo 7.6. AKM-F2.6 modelinin HAD sonuçları ($D_m=3,48\text{mm}$).	42

Tablo 7.7. AKM-F2.6 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.1.) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=6$ $D_m=3,48\text{mm}$).	42
Tablo 7.8. $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.	43
Tablo 7.9. Tablo 7.8.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).	44
Tablo 7.10. Tablo 7.8.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).	45
Tablo 7.11. Tablo 7.8.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).	45
Tablo 7.12. AKM-F2.9 ejektör modelinin HAD sonuçları ($D_m=5,22\text{mm}$).	46
Tablo 7.13. AKM-F2.9 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.2) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=9$ $D_m=5,22\text{mm}$).	46
Tablo 7.14. $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.	47
Tablo 7.15. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).	48
Tablo 7.16. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).	49
Tablo 7.17. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin "en büyük en iyi" S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).	49
Tablo 7.18. AKM-F2.12 ejektör modelinin HAD sonuçları ($D_m=6,96\text{mm}$).	50
Tablo 7.19. AKM-F2.12 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.3.) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=12$ $D_m=6,96\text{mm}$).	50
Tablo 7.20. $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$, $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ ve $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ ve GBO na göre belirlenen en uygun parametrelili modeller ve HAD sonuçları.	51
Tablo 8.1. İkinci kademe analizler sonrasında AKM-F2.9 ejektör modeli ile yapılan ağ sayısı ve yapısından bağımsızlık kontrol çalışması sonuçları.	56
Tablo 8.2. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı NXPlerde yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($T_{p,0}=620\text{K}$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).	58
Tablo 8.3. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı birincil akışkan giriş basınçlarında ($p_{p,0}$) yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($NXP=0$ ve $T_{p,0}=620\text{K}$).	61
Tablo 8.4. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı birincil akışkan giriş sıcaklıklarında ($T_{p,0}$) yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$). ...	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Katı oksit yakıt hücresi (KOYH).....	4
Şekil 2.2. Katı oksit yakıt hücresi sisteminin elemanları ve şematik akış diyagramı..	7
Şekil 2.3. Ejektörün karakteristik çalışma modları [38].	8
Şekil 3.1. KOYH ejektörünün geometrik boyutları.	11
Şekil 3.2. Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında kullanılan ejektör katı modeli.....	14
Şekil 6.1. Akışkan debilerine göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık sonuçları.	26
Şekil 6.2. GBO ve BKOna göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık sonuçları.	26
Şekil 6.3. En uygun ağ yapılı ve eleman sayılı model (MBA-24).	27
Şekil 6.4. Tablo 6.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	30
Şekil 6.5. En uygun parametre seviyeleri ile tasarlanan ejektörün (AKM-F1.7) ağ yapısı ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).	32
Şekil 6.6. AKM-F1.7 ejektör modelinde hız dağılımı.	33
Şekil 6.7. AKM-F1.7 ejektör modelinde basınç dağılımı.	34
Şekil 6.8. AKM-F1.7 kodlu ejektör modelinde sıcaklık dağılımı.	34
Şekil 6.9. AKM-F1.7 modelinde gaz bileşenlerin kütle oranlarının akış doğrultusundaki değişimleri.....	35
Şekil 7.1. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).	40
Şekil 7.2. AKM-F2.6 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=3,48\text{mm}$).	42
Şekil 7.3. Tablo 7.8.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).	44
Şekil 7.4. AKM-F2.9 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=5,22\text{mm}$).	46
Şekil 7.5. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).	48
Şekil 7.6. AKM-F2.12 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=6,96\text{mm}$).	50
Şekil 7.7. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin hız konturları.	52
Şekil 7.8. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin basınç konturları.....	52
Şekil 7.9. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin sıcaklık konturları.....	53
Şekil 8.1. AKM-F2.9 ejektör modelinde kütleli debilerin ağ yapısı eleman sayısı ile değişimi.	56
Şekil 8.2. AKM-F2.9 ejektör modelinde GBO ve BKOnun ağ yapısı eleman sayısı ile değişimi.	57
Şekil 8.3. AKM-F2.9 ejektör modelinin, en uygun ağ yapılı ve eleman sayılı MBA-24 modeline uygulanan ağ yapısı parametreleri ile oluşturulan ağ yapısı.	57
Şekil 8.4. NXP'nin kütleli debilere etkisi ($T_{p,0}=620\text{K}$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).	59

Şekil 8.5. NXP'nin GBOna ve BKOna etkisi ($T_{p,0}=620K$ ve $p_{p,0}=280kPa$).	59
Şekil 8.6. NXP +3mm konumunda hız konturları/vektörleri ($T_{p,0}=620K$, $p_{p,0}=280kPa$).	60
Şekil 8.7. $p_{p,0}=200kPa$ giriş basıncında basınç konturları ($NXP=0$, $T_{p,0}=620K$).	61
Şekil 8.8. Birincil akışkan giriş basıncının kütledebilere etkisi ($NXP=0$ ve $T_{p,0}=620K$).	62
Şekil 8.9. Birincil akışkan giriş basıncının GBOna ve BKOna etkisi ($NXP=0$ ve $T_{p,0}=620K$).	62
Şekil 8.10. Birincil akışkan giriş sıcaklığının kütledebilere etkisi ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280kPa$).	64
Şekil 8.11. Birincil akışkan giriş sıcaklığının GBOna ve BKOna etkisi ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280kPa$).	65
Şekil 8.12. $T_{p,0}=500K$ giriş sıcaklığında sıcaklık konturları ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280kPa$).	65



KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ (KOYH) EJEKTÖRÜ AKIŞ KANALININ SAYISAL YÖNTEMLERLE GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Fosil enerji kaynaklarının sürekli yükselen maliyetleri ve çevresel etkileri enerji sistemlerinde verimliliğin önemini artırmaktadır. Geliştirilmekte olan katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), konutlarda mikro birleşik ısı ve güç üretimine (mBIG), dolayısıyla da en yüksek verimle, dağıtık elektrik üretimine olanak sağlar. Anot atık gazının geri beslenmesi, yüksek maliyetleri nedeniyle boyutları sınırlı tutulan KOYH'lerinde verimi artırmasının yanında, KOYH girişindeki yakıt dönüştürücüye su buharı ve ısı enerjisi de sağlar. Küçük güçlü KOYH'lerinde ($P_{el} < 5$ kWe), yüksek sıcaklıklardaki ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) anot atık gazının geri beslenmesinde ejektörler tercih edilir. KOYH'nin performansını doğrudan etkileyen ejektörün geri besleme oranı (GBO); işletme koşullarına ve ana akış kanalı boyunca en-kesitlerin geometrik boyutları ile değişen sıkıştırılabilir akış yapılarına bağlıdır.

Sunulan tezde, 2 kWe elektriksel güç üreten bir KOYH'nin sıcak anot atık gazını geri besleyen ejektörün ana akış kanalı tasarlanmıştır. Bu amaçla; emme odası daralma açısının (α_2), emme odası uzunluğunun (L_s), karışım odası çapının (D_m), karışım odası uzunluğunun (L_m), difüzör genişleme açısının (α_3), difüzör uzunluğunun (L_d) ve birincil lüle ıraksak bölümü uzunluğunun (L_{nd}) GBO üzerindeki etkileri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve Taguchi deney tasarımı yöntemleriyle incelenmiştir.

Öncelikle literatürde ejektörler için önerilen 1-B termo-hidrokinematik sıkıştırılabilir akış modelleri ile yakınsak-ıraksak birincil lülenin boğaz çapı (D_t) gibi kritik akış en-kesitlerinin geometrileri belirlenmiştir. Daha sonra ejektörün ana akış kanalının, hesaplamalarla doğrudan belirlenemeyen diğer geometrik boyutlarının her biri için, açık literatürde önerilen aralıklarda üçer seviye seçilmiştir.

İlk kademe HAD deneylerinde kullanılacak ejektör modellerinin tasarımında, seçilen beş akış kanalı geometrik parametresinin alt seviyeleri, Taguchi'nin önerdiği $L_{27}(3^5)$ ortogonal dizisine göre eşleştirilmiştir. HAD analizleri SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile yapılmıştır. HAD analizlerinin sonuçları ile hesaplanan GBO'ları, Taguchi'nin önerdiği "en-büyük en-iyi" sinyal/gürültü (S/G) oranına göre değerlendirilmiştir.

İlk kademe analizlerde ele alınan beş geometrik parametrenin en uygun seviyeleri ve etki dereceleri sırasıyla; $\alpha_3 = 9^{\circ}$ (%32,09), $L_s \cong 8,1\text{mm}$ (%23,54), $\alpha_2 = 15^{\circ}$ (%16,97), $L_m \cong 24,4\text{mm}$ (%11,23) ve $L_d \cong 48,7\text{mm}$ (%0,1) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatürle uyumludur.

Üç farklı karışım odası çapı ($D_m/D_t = 6, 9$ ve 12) için yapılan ikinci kademe analizlerde, her bir karışım odası çapı için hazırlanan 27 adet ejektör modeline (toplamda 81 adet farklı ejektör modeli) HAD analizleri uygulanmıştır. Bu analizlerde, KOYH için hedeflenen GBO'na (7,2) en yakın sonuçlar $D_m/D_t = 9$ için hazırlan ejektör modelleri ile elde edilmiştir. İkinci kademe analizlerde ele alınan altı geometrik parametrenin en

uygun seviyeleri ve etki dereceleri sırasıyla; $\alpha_3 = 7^\circ$ (%35,01), $L_m = 27,3\text{mm}$ (%25,85), $L_{nd} = 0,58\text{mm}$ (%12,75), $\alpha_2 = 25^\circ$ (%7,65), $L_d = 54,5\text{mm}$ (%7,13) ve $L_s = 3,0\text{mm}$ (%1,67) olarak belirlenmiştir. Bu değerler literatürle uyumludur.

GBO bakımından ejektör akış kanalının en önemli geometrik tasarım parametreleri, beklendiği gibi karışım odasının çapı (D_m) ve uzunluğudur (L_m). Karışım odasının çapı büyüdükçe gerekli uzunluk kısalmaktadır ve bu iki parametrenin en uygun oranları $D_m/D_t = 9$ ve $L_m/D_m = 5-7$ olarak belirlenmiştir. Difüzör genişleme açısı (α_3) da önemli parametrelerdendir ve belirlenen en uygun açı literatürle uyumlu olarak 8° 'dir. Emme odası daralma açısının (α_2) GBO'na etkisi buraya kadar bahsedilen parametrelerden daha azdır. Elde edilen sonuçlara göre bu açı 20° 'den büyük olmalıdır.

Karışım odasının çapı büyüdükçe, emme odası ve birincil lüle ıraksak bölüm uzunluklarının GBO'na etkileri artmaktadır. Difüzör uzunluğu GBO'na etkisi en düşük olan ejektör akış kanalı parametresidir. Dolayısıyla, difüzör olabildiğince kısaltılarak ejektörün toplam uzunluğu kısaltılabilir.

Genel bir değerlendirme olarak, KOYH'ne özgü anot atık gazı geri besleme ejektörüne ait ana akış kanalı tasarımının sayısal yöntemlerle (Taguchi deney tasarımı ve HAD analizleri) geliştirilebileceği gösterilmiştir.

DEVELOPOMENT OF SOLID OXIDE FUEL CELL (SOFC) EJECTOR FLOW CHANNEL BY NUMERICAL METHODS

SUMMARY

The ever-increasing costs and environmental effects of fossil energy resources increase the importance of efficiency in energy systems. Solid oxide fuel cells (SOFC) under development enable micro-combined heat and power generation (mCHP) in residential buildings, thus, distributed electricity production with the highest efficiency.

The efficiency of SOFCs depends on the consumption of the fuel as much as possible by chemical reactions (higher fuel utilization factor). Recirculation of the anode exhaust gas not only increases the efficiency of the SOFCs whose dimensions are limited due to their high costs but also provides water vapor and heat energy to the fuel reformer at the SOFC inlet. Ejectors are preferred for recirculation of the high temperature ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) anode exhaust gas for low-power SOFCs ($P_{el} < 5 \text{ kWe}$).

In ejectors without moving parts, the required energy is provided by the high-pressure primary fluid. The static pressure decreases as the flow energy of the primary fluid transforms into dynamic pressure with increasing flow velocity in the convergent-divergent primary nozzle. The high velocity (low pressure) primary fluid exiting the convergent-divergent nozzle is required to reduce the static pressure of the suction chamber below the inlet pressure of the secondary fluid. Thus, the secondary fluid flows into the suction chamber and enters the ejector. The momentum of the primary fluid is transferred to the secondary fluid in the suction and mixing chambers. Finally, the dynamic pressure of the mixed fluids is converted to static pressure in the subsonic diffuser at the ejector outlet.

The pressure at the diffuser outlet is higher than the inlet pressure of the secondary fluid to the ejector. Thus, the ejector, which has no moving parts, the pressure of the secondary fluid is increased by the energy of the high-pressure primary fluid. The ratio of the mass flow rate of the secondary fluid to the mass flow rate of the primary fluid is defined as the recirculation rate (RR).

The ejector's RR, which directly affects the performance of the SOFC, depends on the operating conditions and the compressible flow structures varying with the geometric dimensions of cross-sections along the main flow channel. In the presented thesis, the main flow channel of the ejector that recirculates hot anode exhaust gas of a SOFC generating 2 kWe of electricity is designed.

The operating conditions and design constraints, such as the inlet pressures and temperatures, flow rates and chemical compositions of the fluids, and the energy conversion efficiency of SOFC are taken from the literature. Boundary conditions such as the inlet temperatures and pressures of the fluids, and the ejector outlet pressure determine the mass flow rates of the primary and secondary fluids (hence RR). The geometric design of the ejector flow channel is as effective on the performance (GBO) of the ejector as these boundary conditions at the inlet and outlet.

For this, the effects of suction chamber constriction angle (α_2), suction chamber length (L_s), mixing chamber diameter (D_m), mixing chamber length (L_m), diffuser expansion angle (α_3), diffuser length (L_d) and the length of the divergent section of the primary nozzle (L_{nd}) on the RR were investigated by computational fluid dynamics (CFD) and Taguchi experimental design method.

In the 1-D preliminary design calculations of KOYH ejectors, generally simplifying assumptions are applied. In the preliminary design calculations, general assumptions from the literature were applied, such as that the fluids are ideal gases or ideal gas mixtures, the ejector walls are adiabatic, the radial distributions of pressure and temperature are uniform in all flow cross-sections, and the thermal equilibrium between the mixing fluids is instantaneous.

At the desired primary fluid mass flow rate and known primary fluid inlet conditions (pressure and temperature), the convergent-divergent nozzle throat cross-sectional area (throat diameter), where the flow velocity will increase to the speed of sound ($M=1$), can be calculated by isentropic flow assumption. The primary fluid jet, after exiting the convergent-divergent primary nozzle, expands in the suction chamber and enters the mixing chamber. The velocity and cross-sectional area (diameter) of the primary fluid jet at the inlet of the mixing chamber are calculated using the conservation equations and the assumption of isentropic flow. The geometric dimensions of the flow channel other than these two flow cross-section diameters that can be calculated are chosen within the ranges recommended in the literature. Therefore, the preliminary design of the ejector has been completed.

First of all, the geometry of the critical cross-sections such as throat diameter (D_t) of the convergent-divergent primary nozzle was determined with the 1-D thermo-hydrodynamic compressible flow models suggested for ejectors in the literature.

Before the main CFD analyzes with this ejector model, the mesh number independence study was carried out with the numerical ejector models prepared with 29 different mesh structures (with different mesh numbers). The results of this study were evaluated in terms of both the mass flow rates of the primary and secondary fluids and the RR. It has been determined that the results are independent of the mesh structure (mesh number) in the models with $\sim 510,000$ and $\sim 1,250,000$ mesh numbers from 29 numerical models whose mesh numbers vary between $\sim 14,000$ and $\sim 1.250,000$. In all CFD analyzes in the presented study, the mesh structure used in the numerical ejector model with this 720.000 mesh number was applied.

Then, three levels were selected for the ranges recommended in the open literature for each of the other geometric dimensions of the main flow channel of the ejector that could not be determined directly by calculations. In the design of the ejector models used in the first stage of CFD experiments, the levels of the five selected flow channel geometric parameters were matched according to the $L_{27}(3^5)$ orthogonal array suggested by Taguchi.

CFD analyses were performed with SolidWorks Flow Simulation software. RR calculated with the results of CFD analyses were evaluated according to the “the-larger the-better” signal to noise (S/N) ratio proposed by Taguchi.

The optimum levels and percentase severity for the considered five geometric parameters (suction chamber length- L_s , suction chamber constriction angle- α_2 , mixing chamber length- L_m , diffuser expansion angle- α_3 and diffuser length- L_d) in the first stage of the analyzes are determined respectively as $\alpha_3 = 9^\circ$ (32.09%), $L_s \cong 8,1$ mm

(23.54%), $\alpha_2 = 15^\circ$ (16.97%), $L_m \cong 24.4$ mm (11.23%) and $L_d \cong 48.7$ mm (0.1%). These results are consistent with the literature.

The RR calculated with the CFD analysis results of the ejector designed with this optimal geometric flow channel parameter levels is 5.73. However, this result is $\sim 20.5\%$ lower than the desired GBO of 7.20 for SOFC.

It was determined in the first stage analysis that the effect of the diffuser length (L_d) on GBO was insignificant (0.1%). Therefore, the maximum diffuser length (48.7mm) determined as the most suitable level can be shortened to the lowest level (16.2mm). Thus, the overall length of the ejector, which is 91.1mm is shortened by $\sim 36\%$ to 58.6mm.

Since RR of the optimally designed ejector in the first-stage analyzes remained below the targeted value (7.20), the length of the divergent section of the primary nozzle (L_{nd}), whose effect on the RR was known from the literature was also added to the effective parameters list of the second-stage analyzes. Therefore, in the second-stage analyzes, six geometric parameters with three levels were considered. In addition, the effect of the mixing chamber diameter on RR was also examined by repeating the second-stage analyzes for each of the three different mixing chamber diameters ($(D_m/D_t = 6, 9 \text{ ve } 12)$). 27 different ejector designs (81 different ejectors in total) were prepared by matching the levels of flow channel geometric parameters for each mixing chamber diameter according to Taguchi's proposed L27(36) orthogonal array.

In these analyses, the closest results to the targeted RR of 7.2 for SOFC were obtained with the ejector models prepared for $D_m/D_t = 9$. The optimum levels and percentage severity for the considered six geometric parameters (diffuser expansion angle- α_3 , mixing chamber length- L_m , length of the divergent section of the primary nozzle- L_{nd} , suction chamber constriction angle- α_2 , diffuser length- L_d and the suction chamber length- L_s) in the second stage of the analyzes are determined respectively as $\alpha_3 = 7^\circ$ (35.01%), $L_m = 27,3$ mm (25.85%), $L_{nd} = 0,58$ mm (12.75%), $\alpha_2 = 25^\circ$ (7.65%), $L_d = 54,5$ mm (7.13%) and $L_s = 3,0$ mm (1,67%). These results are consistent with the literature.

The RR calculated by the CFD analysis results of the final ejector model designed for $D_m/D_t = 9$ and with the most effective parameter levels obtained from the second-stage analyzes is 8.53. This result is $\sim 18.5\%$ higher than the desired RR of 7.20 for KOYH. Therefore, unlike the first-stage analyzes, the ejector flow channel with the optimal geometry is designed in which the desired RR can be obtained in the second-stage CFD analyses.

In addition, the applicability of the element number independent mesh structure which was selected according to the first-stage analyzes for the final ejector model is also validated by CFD analysis.

In this final ejector design, it has also been shown that the desired RR can be obtained for the SOFC by tuning the adjustable operating parameters such as primary fluid inlet temperature, inlet pressure and primary nozzle outlet position (NXP).

In the CFD analyzes performed by keeping all other parameters constant in order to achieve the targeted RR of 7.2, the setting values of the primary nozzle outlet position, primary fluid inlet temperature and inlet pressure were determined as $NXP < \sim 3$ mm, ~ 483 K and ~ 212 kPa respectively.

The most important geometric design parameters of the ejector flow channel in terms of RR are the diameter (D_m) and length (L_m) of the mixing chamber, as expected. As the diameter of the mixing chamber increases, the required length becomes shorter and the optimal ratios of these two parameters were determined as $D_m/D_t = 9$ and $L_m/D_m = 5-7$.

Diffuser expansion angle (α_3) is also one of the important parameters and the determined optimal angle is 8° in accordance with the literature.

The effect of the suction chamber's constriction angle (α_2) on the RR is less than the parameters mentioned so far. This angle should be greater than 20° according to the obtained results.

As the diameter of the mixing chamber increases, the effects of the suction chamber and primary nozzle divergent section lengths on the RR increase.

The diffuser length is the ejector flow channel parameter with the lowest effect on the RR. Therefore, by making the diffuser as short as possible, the overall length of the ejector can be shortened as well.

As a general conclusion, it has been shown that main flow channel design of SOFC-specific anode exhaust gas recirculation ejector can be developed by numerical methods (Taguchi experimental design and CFD analysis).

1. GİRİŞ

Enerji fiyatlarındaki sürekli devam eden yükselme, fosil yakıtlardan kaynaklı hava kirliliği ve iklim değişikliği ile ilgili olumsuzluklardaki artışlar, kamu otoritelerini enerji tüketiminin ve zararlı salınımların azaltılması amacıyla yasal sınırları sürekli düşürmeye zorlamaktadır [1].

Sayılan nedenlerle; fosil yakıtların tüketiminin azaltılması ve enerji kullanan sistemlerde verimin artırılması amacıyla farklı politikalar denenmekte, araştırmalar ve pilot uygulamalar yapılmaktadır [2, 3].

Bu amaçla üzerinde çalışılan bazı politika ve araştırma konularına; yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki ve yaygınlaştırılması; mevcut yapı ve tesislerde enerji kayıplarının kontrol altına alınması; düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynaklarının ısı değiştiriciler, organik Rankine çevrimi ve ısı pompası gibi ek cihaz ve sistemlerle geri kazanılması; fosil yakıtlardan elektrik üreten klasik ısı-güç çevrimleri yerine yakıt hücreleri gibi yüksek verimli yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi örnek verilebilir [4, 5].

Kömür gibi kirlетici salınım yayma potansiyeli yüksek fosil yakıtlardan gazlaştırma ile ya da farklı yenilenebilir kaynaklarla üretilen hidrojen gibi temiz yakıtlardan, daha yüksek verimle yararlanmak üzere geliştirilmeye çalışılan önemli teknolojik uygulamalardan biri de yakıt hücreleridir. Bazı türleri henüz ticarileşmeye başlayan bu sistemlerde, yakıtların kimyasal enerjisi yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştürülür [6].

Yakıt hücrelerinde, klasik ısı-güç çevrimlerindeki; yanmayla ısı enerjisi üretimi, aracı akışkanın buharlaştırılması, türbin-jeneratör grubunda sırasıyla mekanik enerji ve elektrik üretimi gibi genel verimi düşüren alt enerji dönüşümleri bulunmaz. Yakıt hücrelerinde; hidrojenden veya bileşimlerinde yüksek oranda hidrojen bulunan kütleli enerji yoğunluğu yüksek yakıtlardan (kimyasal enerjiden), elektrokimyasal işlemlerle, doğrudan elektrik enerjisi üretilir. Sadece doğadaki en temiz yakıt olan

hidrojenin (H_2) kullanılabildiği yakıt hücreleri (Alkali yakıt hücresi-AYH, Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi-PEMYH, Fosforik asit yakıt hücresi-FAYH ve Erimiş karbonat yakıt hücresi-EKYH) olduğu gibi, bir takım ön işlemlerle, metan ya da daha karmaşık yapıları hidrokarbonlardan (metanol ve motorin gibi), %80'lere ulaşan verimle elektrik üretebilen yakıt hücreleri (Doğrudan Metanol yakıt hücresi-DMYH, Katı oksit yakıt hücresi-KOYH) de vardır [1, 6].

Yakıt hücreleri; yüksek verim, düşük salınım, yüksek güç yoğunluğu, hareketli bileşeni olmaması, sessiz çalışması, çok çeşitli yakıtların kullanılabilmesi, modüler olması ve ihtiyaca uygun kapasitelerde üretilebilmesi, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi “birleşik ısı-güç üretimi”, dayanıklı ve güvenli olmaları gibi üstünlükleri nedeniyle geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yakın bir gelecekte yakıt hücrelerinin; havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere, bilgisayar, tablet ve cep telefonu gibi taşınabilir kişisel cihazlarda, konutlar ve toplu yerleşim bölgelerinde, elektrik güç santralleri gibi sistemlerde, bisikletten toplu taşıma araçlarına ve gemilerden uçaklara kadar ulaşım araçlarında ve hatta uzay araçları gibi uygulamalarda, oldukça yaygın kullanılacağı öngörülmektedir. Yakıt hücrelerinin, ev ve ofislerdeki kombi ve klima gibi bireysel ısıtma-soğutma uygulamalarına benzer şekilde, elektriğin (dağıtılmış elektrik üretimi) ve ısı enerjisinin eş zamanlı üretildiği (mikro birleşik ısı ve güç üretimi) sistemlerde kullanılması da beklenmektedir [7, 8].

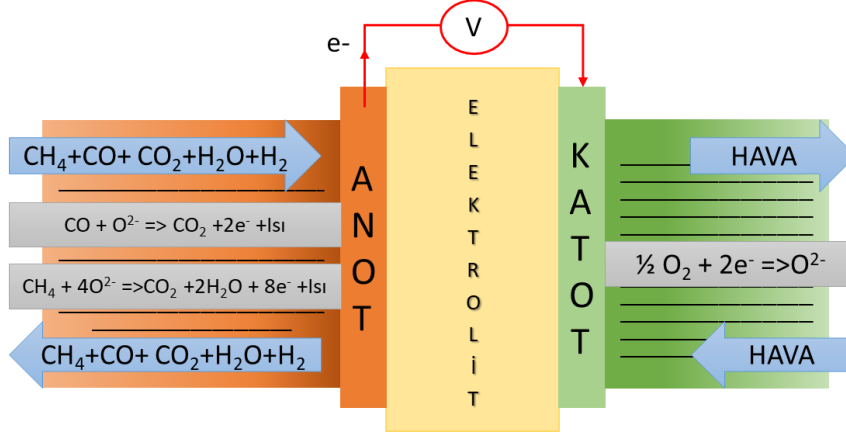
2. KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ

KOYHleri, diğer yakıt hücrelerinde olduğu gibi; enerji dönüşüm verimlerinin ve güç yoğunluklarının yüksekliği, tamamen katı bileşenlerden oluşmaları, zararlı egzoz salınım seviyelerinin düşüklüğü ve sessiz çalışmaları gibi özelliklerine ek olarak yakıt esnekliği ve egzoz gazı sıcaklığının yüksekliği (kaliteli atık ısı) gibi üstünlükleri ile dikkat çekmektedir [9, 10].

Birincil enerji kaynakları olan fosil yakıtlardan yararlanma verimini artırmak (%80-90) amacıyla, elektrik ve ısı enerjilerinin, belli oranlarda ve sürekli kullanıldığı yerlerde, eş zamanlı üretilmesi şeklinde tanımlanabilecek birleşik ısı ve güç üretimi (kojenerasyon), doğalgaz alt yapısının gelişmesiyle geniş bir güç aralığında (1kW-100MW) yaygınlaşmaktadır [11-13].

KOYHleri; hidrojen kadar saf olmayan motorin, doğalgaz, biyogaz, metanol, kömür gazı gibi yakıtları (basit sayılabilecek ön işlemlerle) ve diğer yakıt hücreleri (örneğin PEMYH) için zararlı olan karbonmonoksiti (CO) yakıt olarak kullanabilmesi, maliyetinin düşüklüğü (örneğin PEMYHde kullanılan platin katalizörler gerekmez.) ve yüksek sıcaklıkta (600-1000°C) daha iyi bir reaksiyon kinetiği ile çalışmalarından dolayı birleşik ısı ve güç üretimine (elektrik, ısıtma ve sıcak su) uygunluğu gibi nedenlerle gelecek vadetmektedir [11, 14].

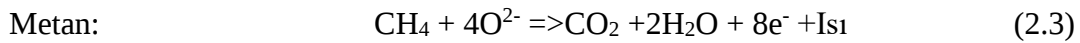
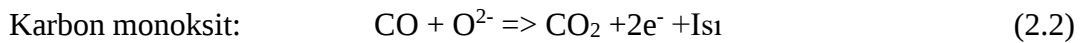
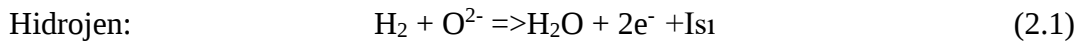
Diğer yakıt hücrelerinde en küçük iki atomlu molekül olan H₂ (yakıt), katalizör membrandan diğer tarafa geçerken (kütle geçişi daha kolay); hidrokarbonlu yakıtların kullanıldığı KOYHlerinde daha büyük yapıli oksijen iyonları katalizör membrandan geçer (kütle geçişi daha zor) (Şekil 2.1.). Ayrıca KOYHleri daha yüksek sıcaklıkta çalıştığından (Bu nedenle atık ısıdan yararlanma potansiyeli yüksektir.); yakıt kullanım veriminin artması ve yakıt dönüştürücüde büyük molekülü hidrokarbonların parçalanması için yüksek sıcaklıkta su buharı gereklidir. Sayılan tüm bu işlevlerin ve gereksinimlerin, KOYH boyutlarını büyütmeden yerine getirebilmesi, bazı ek bileşenlerle mümkündür [11, 15, 16].

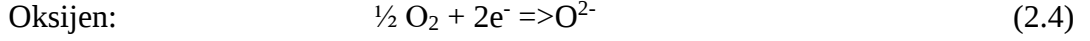
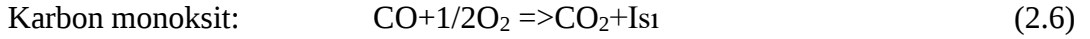
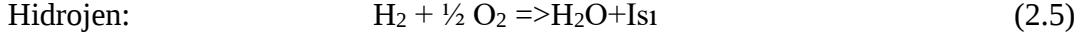


Şekil 2.1. Katı oksit yakıt hücresi (KOYH).

Yakıt hücrelerinde hızlı bir yanma yerine daha yavaş kimyasal reaksiyonlarla oksitlenme gerçekleşirken, doğrudan elektrik akımı ve hücre çalışma sıcaklığına bağlı olarak sıvı veya buhar fazında su açığa çıkar. Oksitleyici olarak hava kullanılıyorsa azot, karbonlu yakıtlar kullanılıyorsa karbondioksit de ürünler arasında bulunur. Yakıt hücresinde üretilen suyun aynı zamanda soğutucu işlevi de vardır. KOYHde atık egzoz gazlarının, yakıtın verildiği anot tarafı girişine geri beslenmesiyle, karbonlu yakıtların parçalanması için gerekli su buharı ve ısı enerjisi de sağlanmış olur. KOYHne saf hidrojen verilirse, aşağıdaki reaksiyonlardan sadece anot reaksiyonu (Denklem 2.1) gerçekleşir. KOYHne beslenen yakıt karışımında karbonmonoksit ve metan da bulunuyorsa, anot reaksiyonlarının sayısı ve çeşitliliği (Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3) de artar. Şekil 2.1.'deki şematik gösterimde olduğu gibi, katot reaksiyonu (Denklem 2.4) ile birlikte hücrede gerçekleşen reaksiyonlarda (Denklem 2.5, 2.6 ve 2.7); su buharı, karbondioksit ve ısı enerjisi açığa çıkarken, anottan katoda doğru elektron akışı olur [9, 11].

Anot reaksiyonları:



Katot reaksiyonu:**Toplam hücre reaksiyonları:**

Yukarıda verilen kimyasal reaksiyonlar, diğer yakıt hücrelerine benzer şekilde, sınırlı uzunlukta (maliyetleri düşürmek amacıyla) tutulan KOYH kanallarında, tam olarak gerçekleşmez. Bu nedenle, ürünler arasındaki karbondioksit ve su buharının yanında, hidrojen ve karbonmonoksit de bulunduğundan, sistemin verimi düşer. Karbon içerikli yakıtların parçalanmasında gerekli ısı enerjisi ve su buharının temini amacıyla, egzoz gazlarının anot tarafına geri beslenmesi, aynı zamanda KOYHnin enerji kullanma verimini de artıracaktır [9, 17].

Ejektör; emme odasında, birincil akışkanın akış enerjisi (basıncı) kinetik enerjiye dönüştürülerek bir düşük basınç alanı oluşturulan, böylece emilen ikincil akışkanın momentumunun karışım odasında artırıldığı, en son aşamada ise oluşan karışımın kinetik enerjisinin ıraksak ses altı difüzörde tekrar akış enerjisine (basınç) dönüştürüldüğü, basit ve işlevsel bir akış düzeneğidir. Başka bir ifadeyle ejektör, karışımlarında sakınca bulunmayan yüksek basınçlı bir akışkanın enerjisi ile düşük basınçlı diğer akışkanın nakledilmesini sağlayan, kesit alanı akış doğrultusunda değişen, özel tasarlanmış bir akış kanalıdır.

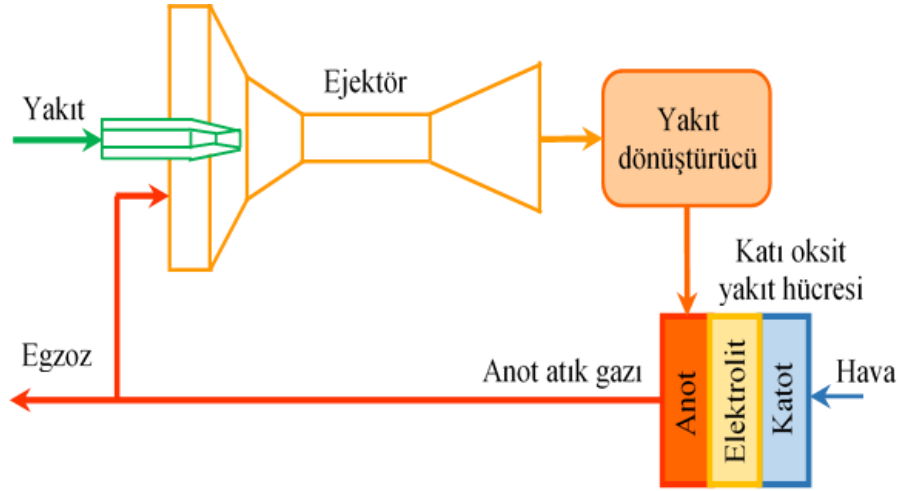
Ejektörler; kimya, yağ ve gıda sanayiileri, soğutma sistemleri, termik santraller ve maden işleme tesisleri gibi çok farklı alanlarda uygulanan endüstriyel üretim ve enerji üretim süreçlerinde yaygın kullanılmaktadır [15, 18].

Ejektörlerin, sürekli açılıp kapanan supaplar, ileri geri hareket eden pistonlar ve dönen çarklar gibi hareketli parçaları yoktur. Ayrıca ejektörler, farklı uygulamalarda istenen kapasitelere uygun ölçülerde ve özel olarak tasarlanabilir [11, 19]. Ejektörler, aynı amaçla kullanılacak diğer akım makinelerinden çok daha düşük maliyetlidir [16]. Ejektörler, fan ve kompresörlerle karşılaştırıldığında; hareketli parçaları olmadığından gürültüsüz çalışırlar, arıza yapmazlar ve harici enerji kaynaklarına ihtiyaçları yoktur.

Ejektörler sayılan tüm bu üstünlükleri nedeniyle, KOYH sistemlerinde çok yüksek sıcaklıktaki anot atık gazının geri beslenmesi amacıyla, seramik fanlar gibi yüksek maliyetli alternatiflerine tercih edilmektedir. KOYH sistemlerinde kullanılan ejektörlerle anot gazı geri kazanım oranlarının; 0,3 kW'lık sistemde ~%35 [20], 2 kW'lık sistemde ~%87 [21], 5 kW'lık sistemde %52 [22] ve %60 [23] olduğu bildirilmiştir [9].

Anot atık gazının KOYH girişine geri beslenmesi, büyük moleküllü hidrokarbonların parçalanmasında gerekli ısı enerjisini ve su buharını sağlayarak, sistemin enerji verimi önemli ölçüde iyileştirmektedir. Özellikle birleşik ısı-güç üretimi yapılan KOYHlerinde, ejektörlerin sistem performansına katkısı daha da önemlidir [24].

Anot atık gazının ejektörle geri beslendiği KOYH sisteminde, ejektör ile KOYH grubu arasında bir yakıt dönüştürücü bulunur. Ejektör, yakıt dönüştürücü ve KOYHnden oluşan sistemin basit devre şeması, Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Ejektörün KOYH sistemindeki temel görevi; KOYH çıkışından istenen oranda (debide) anot atık gazını, sistemdeki tüm basınç kayıplarını (bağlantı kanallarında, yakıt dönüştürücüde ve KOYH akış kanallarında) yenerek, yakıt dönüştürücüye geri beslemektir. KOYH ejektörleri, soğutma sistemlerinde, gıda ve madencilikte susuzlaştırma gibi amaçlarla kullanılan buhar ejektörlerinden farklı olarak, daha yüksek GBOlarında ve daha düşük ikincil akışkan basınç farklarında çalışır. Ayrıca KOYH ejektörlerinde, birincil akışkan (itici gaz-yakıt gazı) ve emilen atık gazın (itilen gaz-anot egzoz gazı) bileşimleri ve sıcaklıkları diğer buhar ejektörlerine göre oldukça farklıdır [25-28].



Şekil 2.2. Katı oksit yakıt hücresi sisteminin elemanları ve şematik akış diyagramı.

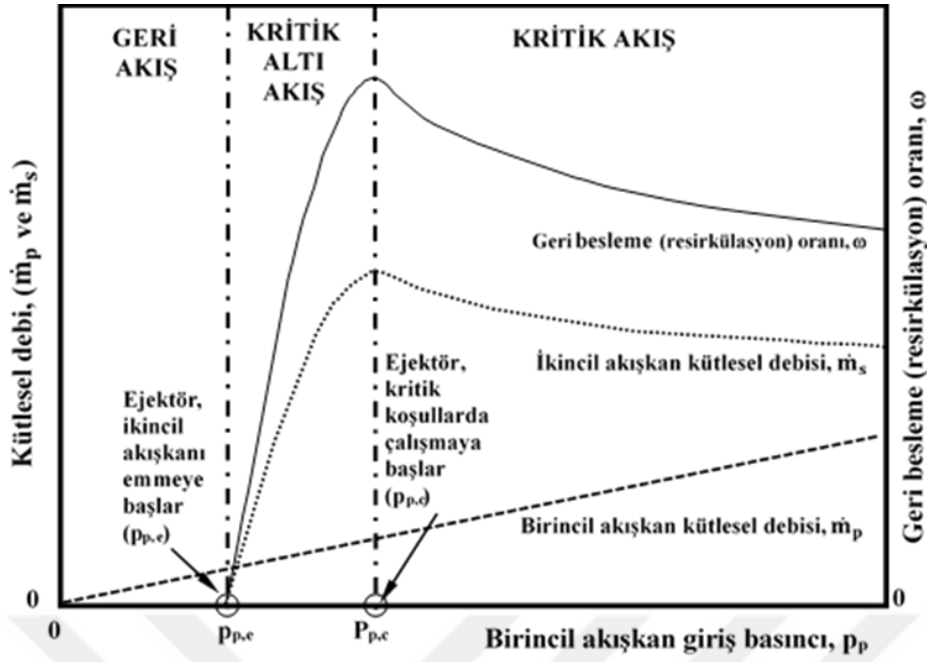
KOYH ejektörlerinde performans hedefi, GBO'nın, KOYH'deki kimyasal reaksiyonları tam olarak gerçekleştirecek en yüksek değere çıkarılmasıdır. KOYH'leri için geri besleme oranı, emilen ikincil akışkan (anot atık gazı) miktarının, birincil akışkan (doğal gaz yakıtlı mikro birleşik ısı-güç uygulamalarında metan gazı) miktarına oranıdır (Denklem 2.8). KOYH ejektörlerinde GBO; birincil ve ikincil akışkanların ejektöre giriş koşullarına (basınç, sıcaklık ve anot atık gazı karışımındaki bileşenlerin oranları), ikincil akışkanda istenen basınç artışına (ikincil akışkan basınç oranı) ve KOYH grubundaki kimyasal reaksiyonların en yüksek verimle gerçekleşmesi için istenen reaktant oranlarına (buhar karbon oranı-Denklem 2.10) bağlıdır [26-28].

$$GBO = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.8)$$

GBO = Geri besleme oranı (—)

$\dot{m}_s$ = İkincil akışkanın kütledebisi (kg/s)

$\dot{m}_p$ = Birincil akışkanın kütledebisi (kg/s)



Şekil 2.3. Ejektörün karakteristik çalışma modları [38].

Ejektörler, birincil akışkan lülesi çıkışındaki basıncın (emme odası basıncı), ikincil akışkanın ejektöre giriş basıncından yeterince düşük olması halinde sağlıklı çalışır. Birincil akışkan lülesi çıkışındaki basıncın istenen seviyelere düşmesi de birincil akışkanın ejektöre giriş basıncına ve sıcaklığına bağlıdır. Dolayısıyla birincil akışkanın ejektöre giriş koşulları, ejektörün işleyişinde oldukça önemlidir ve ejektörün, geri akış, kritik altı akış ve kritik akış olmak üzere üç farklı moddan hangisinde çalışacağını belirler [11, 29, 30].

Her üç çalışma modunda da (Şekil 2.3.) birincil akışkan debisi; birincil akışkanın giriş basıncı (p_p) yükseldikçe, birincil akışkan lülesinin boğaz kesitindeki akış hızı ses hızına ($M_p=1$) ulaşılncaya kadar artar. Birincil akışkan giriş basıncı $p_{p,e}$ eşik değerine ulaşncaya kadar, ikincil akışkanın giriş basıncı emme odası basıncından düşük olduğundan, ikincil akışkan emme odasına giremez ve ejektör geri akış modunda çalışır.

Birincil akışkan giriş basıncı, $p_p=p_{p,e}$ basıncının üzerine çıktığında ise ikincil akışkan emme odasına akmaya (ejektör çalışmaya) başlar. Kritik altı akış modu olarak tanımlanan bu bölgede ($p_{p,e}-p_{p,c}$ basınç aralığı), ikincil akışkan debisi ve GBO, birincil akışkan giriş basıncıyla hızla artar. Birincil akışkan basıncı $p_{p,c}$ değerine ulaştığında,

ikincil akışkan debisi ve GBO en yüksek değerlerini alır. Ejektör kritik altı akış modunda çalışırken, ikincil akışkan debisi, birincil akışkanın giriş koşullarından göreceli olarak çok fazla etkilenir. Nitekim, KOYH ejektörlerinin çalışma modunu belirleyen $p_{p,e}$ ve $p_{p,c}$ basınçlarının; birincil ve ikincil akışkanın giriş basınçlarına, sıcaklıklarına ve bileşimlerine bağlı olduğu bildirilmiştir [31].

Ejektörün üçüncü ve asıl çalışma modu, birincil akışkan giriş basıncının $p_{p,c}$ değerinin üzerinde olduğu, kritik akış modudur. Bu bölgede ikincil akışkan debisi ve GBO, artan birincil akışkan giriş basıncı ile önce bir miktar düşer, daha sonra sabitlenir. Karşım odasındaki şok dalgaları, sadece kritik akış modunda oluşur ve akış boğulur. Bu nedenle ejektör, kritik akış modunda kritik altı akış moduna göre daha kararlı çalışır [31, 32].

Akış doğrultusunda akış en-kesitini azaltan emme odası duvarı ile ses üstü lüleden çıkarak genişleyen birincil akışkan jetinin arasında, ikincil akışkan için karışım odasına doğru daralan (halka en-kesitli) bir akış yapısı (aerodinamik boğaz) oluşur. Bu akış yapısının herhangi bir yerinde, ikincil akışkanın hızı da ses hızına ($M_s=1$) yükselir (ikincil akış boğulur). Etkin alan olarak da adlandırılan, ikincil akışkanın boğulduğu akış en-kesitinin konumu; emme odasının daralma açısına, birincil akışkan jetinin genişleme açısına ve ejektörün çalışma şartlarına bağlıdır [18, 19].

İki akışkan, karışım odasında birbiriyle karışırken, birincil akışkanın momentumu ikincil akışkana aktarılır. Başka bir ifadeyle ikincil akışkan hızlanırken, birincil akışkan yavaşlar. Ejektörlerin termo-hidrokinamik modellemesinde yaygın kullanılan sabit basınç modelinde, karışma sırasında (akışkan karışımı boğaz bölgesine varıncaya kadar) statik basıncın sabit kaldığı varsayılır. Ejektör (difüzör) çıkışındaki karşı basınç, karışım odasında (genellikle çıkışa yakın) bir şok dalgasının oluşmasına neden olur. Bu şok dalgasından geçen akışkan karışımı, ses üstü hızdan ses altı hıza yavaşlar ve basınç aniden yükselir. Akışkan karışımı, en-kesiti genişleyen difüzörde ilerledikçe; akış hızı düşmeye ve statik basınç da artmaya devam eder [19, 31, 32]. Sonuç olarak, ejektör girişinden çıkışa doğru sıkıştırılabilir akış koşulları (akışkan basıncı, hızı ve tüm akışkan termodinamik özellikleri), art arda gerçekleşen en-kesit değişimlerinden çok fazla etkilenir ve değişir.

Yakıtın saf metan kabul edildiği doğal gaz yakıtlı KOYHnde; yakıt kullanım oranı (U_f) ve metanın alt ısı değeri (LHV) göre tanımlanan elektrik üretim verimi (η_{el}) biliniyorsa, gerekli yakıtın (birincil akışkanın) debisi Denklem 2.9 ile hesaplanır. Metanın alt ısı değeri LHV=802340 [J/mol] dür. 2 kW elektriksel güç üretecek KOYHnde %80 yakıt kullanma verimi ve %60 elektrik üretim veriminde, gerekli metan debisi, $5,193 \times 10^{-6}$ kmol/s ($8,309 \times 10^{-5}$ kg/s) olarak elde edilir [33].

$$\dot{n}_{CH_4} = \frac{P_{el}}{\eta_{el} \cdot U_f \cdot LHV} \quad (2.9)$$

$\dot{n}_{CH_4}$ = Metanın molekül debisi (kmol/s)

P_{el} = Elektriksel güç üretimi (kW)

η_{el} = Elektrik üretim verimi (—)

U_f = Yakıt kullanım oranı (—)

LHV = Alt ısı değeri (J/mol)

KOYHnde, ejektörün çalışma şartlarına bağlı olan en önemli işletme parametresi, KOYHdeki kimyasal reaksiyonların dengeli bir şekilde devamı için gereken BKO'nun (Denklem 2.10) korunmasıdır. Eğer BKO 2,40'ün altına düşerse, reaksiyonlarda oluşan ürünler arasındaki is (yanmamış karbon), KOYH akış kanallarında birikerek, akışı ve sistemin çalışmasını engeller [18].

$$BKO = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CO} + \dot{n}_{CH_4}} \quad (2.10)$$

BKO = Buhar Karbon Oranı (—)

$\dot{n}_{H_2O}$ = Su buharının molekül debisi (kmol/s)

$\dot{n}_{CO}$ = Karbonmonoksitin molekül debisi (kmol/s)

$\dot{n}_{CH_4}$ = Metanın molekül debisi (kmol/s)

Ejektörlerde, yukarıda da bahsedildiği gibi, akış doğrultusunda kısa sayılabilecek mesafelerde; akış en-kesitindeki ani değişiklikler, şok dalgaları gibi süreksizlikler, hızları oldukça farklı iki akışın etkileşimi (karışması) gibi analitik olarak tanımlanması imkânsız ve sayısal olarak çözülmesi oldukça zor ve karmaşık akış yapıları arka arkaya görülmektedir.

Bu nedenle, KOYH ejektörlerinin 1-boyutlu tasarım hesaplarını basitleştirmek amacıyla sıklıkla yapılan; akışkanların ideal gaz veya ideal gaz karışımı gibi davrandığı, ejektör duvarlarının adyabatik olduğu, akışkanlar arasında ısıl dengenin (ısı geçişinin) karışımın başlangıcında aniden oluştuğu, tüm akış en-kesitlerinde basınç ve sıcaklığın radyal doğrultuda düzgün dağıldığı gibi genel bazı kabuller, farklı kaynaklarda verilmektedir [18, 19].

Tablo 3.1. KOYHnin tasarım ve işletme koşulları [18].

Katı Oksit Yakıt Hücresi Sistemi	
Elektriksel güç üretimi (P_{el})	2000 (W)
Buhar karbon oranı (BKO)	2,40 (-)
Geri besleme oranı (GBO)	7,20 (-)
Elektrik üretim verimi (η_{el})	60 (%)
Ejektör çıkış sıcaklığı (T_5)	1055 (K)
Ejektör çıkış basıncı (p_5)	105 (kPa)
Yakıt kullanım oranı (U_f)	80 (%)
Birincil Akışkan (Yakıt)	
Bileşimi (molar)	X_{CH_4} (%100)
Sıcaklığı ($T_{p,0}$)	620 (K)
Basıncı ($p_{p,0}$)	280 (kPa)
İkincil Akışkan (Anot atık gazı)	
Bileşimi (molar)	X_{H_2O} (%61,74)
	X_{CO_2} (%29,58)
	X_{H_2} (%4,90)
	X_{CO} (%3,79)
Sıcaklığı ($T_{s,0}$)	1180 (K)
Basıncı ($p_{s,0}$)	104 (kPa)

Bilinen birincil akışkan kütleli debisi ($\dot{m}_p$), giriş sıcaklığı ($T_{p,0}$) ve basıncı ($p_{p,0}$) için akış hızının ses hızına çıktığı ($M_{p,1}=1$), yakınsak-ıraksak lüle boğazındaki akışın en-kesit alanı ($D_{t,1}$, boğaz çapı), izentropik akış kabulü ile hesaplanabilir [11, 18]. Yine karışım odası girişinde, birincil akışkan jeti ile ikincil akışkan tam olarak karışmasalar da, basınçlarının eşitlendiği ($p_{p,3}=p_{s,3}$) kabul edilir [11]. İzantropik akış ve korunum denklemleri kullanılarak, karışım odasının girişinde, birincil akışkan jetinin hızı ($v_{p,3}$) ve akış en-kesitinin alanı dolayısıyla çapı ($D_{p,3}$), hesaplanabilir [11]. Kritik akış koşullarında, karışım odası girişindeki akış en-kesitinde, birincil akışkan jetinin dış yüzeyindeki (iki akış arasındaki ara yüzeyde) akış hızının ses hızına ($M_{p,3}=1$ ve $v_{p,3}=v_{s,3}$) eşit olduğu kabul edilir [11, 18].

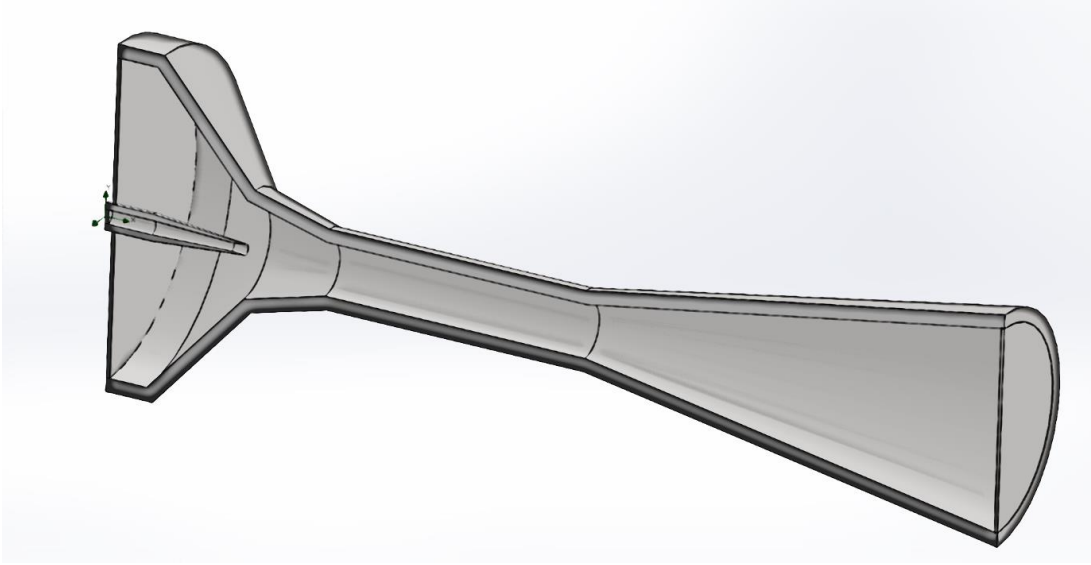
İkincil akışkanın ejektöre giriş basıncı ($p_{s,0}$) ve sıcaklığı ($T_{s,0}$) biliniyorsa; emme odasının ikincil akış bölgesindeki hız dağılımının ($v_s(r)$), deneysel verilere dayalı önerilen hız dağılımı ifadesine [11] uyduğu kabul edilerek; KOYHnin hesaplanan ikincil akışkanın kütleli debisi ($\dot{m}_{s,3}$) için karışım odası girişinde gerekli akış en-kesit alanı ($D_{s,3}$) hesaplanabilmektedir [11].

Ayrıca ejektördeki akış yapılarının karmaşıklığı nedeniyle, işletme parametrelerinden ve kendi aralarındaki karmaşık etkileşimlerden dolayı kesin bir değeri ve bilinen bir hesaplama yöntemi bulunmayan, diğer akış kanalı geometrik parametreleri; bu parametreler literatüre uygun seçilmiş ve Tablo 3.1.'deki koşullara göre tasarlanan ejektörden alınmıştır (Tablo 3.2.) [18, 34]. Tablo 3.1.'de verilen koşullarda ve yukarıda özetlenen yöntemle hesaplanan; birincil ve ikincil akışkan kütleli debileri, yakınsak-ıraksak lülenin boğazında ve karışım odası girişinde gerekli akış en-kesitlerinin çapları Tablo 3.2.'de verilmektedir.

Bu çalışmada, Şekil 3.2.'de katı modeli gösterilen KOYH ejektörünün tasarımında; Tablo 3.1.'de verilen KOYH işletme şartları ile hesaplanan, literatüre uygun seçilen Tablo 3.2.'de verilen diğer geometrik parametreler kullanılmıştır. KOYH ejektörü tasarımında, sonuçların gerçek çalışma koşullarını yansıtabilmesi amacıyla, 3-boyutlu üretilebilir bir model hazırlanmıştır.

Tablo 3.2. Hesaplanan ve seçilen ejektör tasarım parametreleri.

Hesaplanan tasarım parametreleri	
Birincil akışkanın kütleli debisi ($\dot{m}_{p,0}$)	$8,31 \times 10^{-5}$ (kg/s)
İkincil akışkanın kütleli debisi ($\dot{m}_{s,0}$)	$5,99 \times 10^{-4}$ (kg/s)
Geri besleme oranı (GBO)	7,2 (-)
Birincil lüle boğaz çapı ($D_{t,1}$)	$5,8 \times 10^{-4}$ (m)
Birincil akışkan jetinin karışım odası girişindeki çapı ($D_{p,3}$)	$6,3 \times 10^{-4}$ (m)
İkincil akışkanın karışım odası girişindeki çapı ($D_{s,3}=D_{m,3}$)	$3,9 \times 10^{-3}$ (m)
Seçilen tasarım parametreleri [34]	
Yakınsak-ıraksak lüle genişleme açısı (α_1)	6 (°)
Yakınsak-ıraksak lüle genişleme uzunluğu (L_{nd})	$1,0 \times 10^{-3}$ (m)
Lüle çıkışının-emme odası girişine mesafesi (NXP)	0 (m)
Emme odası daralma açısı (α_2)	15 (°)
Emme odası uzunluğu (L_s)	$6,0 \times 10^{-3}$ (m)
Karışım odası uzunluğu (L_m)	$19,3 \times 10^{-3}$ (m)
Difüzör genişleme açısı (α_3)	10 (°)
Difüzör uzunluğu (L_d)	$30,8 \times 10^{-3}$ (m)



Şekil 3.2. Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında kullanılan ejektör katı modeli.

Yapılan literatür araştırmalarına göre KOYH ejektörü tasarımında performansa olan etkisi değerlendirilebilecek 27 adet parametre vardır ve bunlar 4 ana gruba ayrılabilir (Şekil 3.1.).

Bunlardan sekiz tanesi akış kanalının geometrik parametreleri ($\emptyset D$, L_{s2} , α_2 , L_{s1} , D_m , L_m , α_3 ve L_d), sekiz tanesi yakınsak-ıraksak lüle ve emme odasındaki konumuyla ilgili geometrik parametreler ($\emptyset d$, s , α_4 , α_5 , D_t , α_1 , L_{nd} ve NXP), altı tanesi de ejektör işletme parametreleri (girişlerde ve çıkıştaki sınır şartlar) ($T_{p,0}$, $p_{p,0}$, $T_{s,0}$, $p_{s,0}$, T_5 ve p_5) ve son olarak da beş tanesi birincil ($\dot{m}_p$ -CH₄) ve ikincil ($\dot{m}_s$ -CO, CO₂, H₂, H₂O) akışkanların KOYH tasarımına uygun debileri ve kütleli karışım oranlarıdır.

Zhu & Jiang [27] KOYH ejektörü ile yaptığı sayısal analizlerde; ejektör akış kanalında momentum aktarımının gerçekleştiği karışım odası çapının (D_m), birincil akışkan debisini belirleyen yakınsak-ıraksak lüle boğaz çapına (D_t) oranını (D_m/D_t) 3,3 ile 6,2 arasında değiştirmiştir. Yakınsak-ıraksak lüle boğaz çapı D_t , daha önce de ifade edildiği gibi, KOYHnde tanımlı giriş şartları ve istenen yakıt debisine bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

Zhu [11], KOYH ejektörlerinde emme odası daralma açısı (α_2) için de 3,5-5° aralığını önermiştir. ASHRAE Handbook 1983'de [35] buhar ejektörleri için emme odasının ilk bölümündeki daralma açısı için 7-10° ve ikinci bölümdeki daralma açısı için 3-4°

aralıkları önerilmiştir. Rusly [25] ise tasarladığı soğutma sistemi ejektöründe emme odası daralma açısını 10° seçmiştir.

Literatürde emme odası uzunluğu (L_s), karışım odası çapının (D_m) katları ile tanımlanmıştır. ASHRAE Handbook 1983'de buhar ejektörlerinde $L_s/D_m=6-10$ aralığı ve en iyi sonuç için ortalama değer olarak $L_s=7D_m$ kullanılması önerilmiştir [35]. Zhu ise KOYH ejektöründe, $L_s=1,5D_m$ değerini önermiştir [11]. Zhu & Jiang ise, emme odası uzunluğu L_s için $L_s/D_m=2-4$ oranlarını kullanmışlardır [27].

Literatürde karışım odası uzunluğunda (L_m) karışım odası çapının (D_m) belirli katları kullanılmış olup; Zhu, KOYH ejektöründe L_m/D_m oranını 5,7 ve 8 olarak seçmiştir [11]. ASHRAE Handbook 1983'de ise L_m/D_m oranı için 3-5 aralığı önerilmiştir [35].

Difüzörde akışın duvardan ayrılmasını engellemek amacıyla, ASHRAE Handbook 1983'de [35] ve Zhu'da [11], difüzör genişleme açısı (α_3) için geniş ($5^\circ-12^\circ$) ve daha dar ($8^\circ-10^\circ$) iki farklı aralık önerilmiştir. Rusly [25] ise soğutma sistemi buhar ejektöründe difüzör genişleme açısını 7° kullanmıştır.

Literatürde difüzör uzunluğu (L_d) için karışım odası çapına (D_m) bağlı olarak, ASHRAE Handbook 1983'de [35] $L_d/D_m=4-12$ oranları önerilmiş ve Zhu [11] difüzör uzunluğunun etkisini çok geniş bir aralıkta $L_d/D_m=7-23$ çalışmıştır. Rusly [25] ise $L_d/D_m=3$ değerini kullanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle ana akış kanalının geometrik parametreleri olan α_2 , L_s , L_m , L_d ve α_3 'ün ejektör performansına etkileri değerlendirilecektir. Diğer tüm parametreler ise Tablo 3.1 ve Tablo 3.2.'de verilen değerlerde sabit kabul edilecektir. Karışım odası çapına bağlı tanımlanan diğer akış kanalı geometrik boyutlarından; emme odası, karışım odası ve difüzör uzunlukları (L_s , L_m , ve L_d) da literatürde önerildiği gibi karışım odası çapının katları şeklinde belirlenmiştir.

Birinci kademe analizlerin sonuçları değerlendirilerek, ele alınan beş akış kanalı geometrik parametresinin en uygun seviyeleri belirlenerek, bu parametreler için ikinci kademe analizlerde seçilecek seviyeler yeniden değerlendirilecektir (daraltılacak veya genişletilecektir). İkinci kademe analizlerde ise karışım odası çapının (D_m) ve

yakınsak-ıraksak birincil lülenin ıraksak bölümünün uzunluğunun (L_{nd}) ejektör performansına etkileri de değerlendirilecek parametrelere eklenecektir.

Ejektör akış kanalı geometrik parametreleri için literatürde önerilen ve ejektör akış kanalı tasarımında kullanılmak üzere birinci kademe ve ikinci kademe analizlerde seçilen seviyeler (oranlar ve değerler) Tablo 3.3.'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Ejektör akış kanalı geometrik parametreleri için önerilen ve seçilen seviyeler.

Parametreler	α_2 (°)	L_s (L_s/D_m)	L_m (L_m/D_m)	α_3 (°)	L_d (L_m/D_m)	L_{nd} (L_{nd}/D_t)	D_m (D_m/D_t)
Zhu ark. [11]	3,5-5	1,5	5-7-8	5-12 (8-10)	---	---	---
ASHRAE Handbook 1983 [35]	7-10	6-10	3-5	5-12 (8-10)	4-12	---	---
Rusly ark. [25]	10	---	---	7	3	---	---
Zhu & Jiang [27]	---	2-4	---	---	7-23	1,6-2	3,33-6,16
Seçilen seviyeler (1. Kademe analizler)	5-15-25	1-2-3	3-6-9	6-9-12	4-8-12	---	6,6-7
Seçilen seviyeler (2. Kademe analizler)	15-20-25	0,6-1,5-1,8	3,5-5,2-7	7-9-11	3,5-10,5-17,4	4-8-12	6-9-12

Yukarıda verilen literatür bilgilerine uygun olarak, ağ yapısından ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında kullanılmak üzere hazırlanan ejektör modellerinde, $D_m/D_t=6,6$ seçilmiş ve $D_m=3,9\text{mm}$ kullanılmıştır.

Ancak bu analizlerde elde edilen ikincil akışkan debisi ve GBO, tasarım değerlerinden ortalama $\sim\%29$ daha düşük elde edilmiştir. Bu nedenle ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin performansa etkilerinin incelendiği asıl analizlerde, çaplar oranı büyütülerek $D_m/D_t=7$ seçilmiş ve hazırlanan 27 ejektör modelinde karışım odası çapı $D_m=4,1\text{mm}$ kullanılmıştır. İkinci kademe analizlerde ise literatüre uygun olarak seçilen üç farklı karışım odası çapının ($D_m=3,48\text{mm}$, $D_m=5,22\text{mm}$ ve $D_m=6,96\text{mm}$) herbiri için oluşturulan 27 toplamda ise 81 ejektör modeli hazırlanmıştır.

Benzer şekilde ikinci kademe analizlere eklenen diğer parametre yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu için de literatüre uygun üç seviye ($L_{nd}=0\text{mm}$, $L_{nd}=1\text{mm}$ ve $L_{nd}=2\text{mm}$) seçilmiştir.

Literatür verileriyle hazırlanan Tablo 3.3.'e uygun seçilen, ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında kullanılan geometrik parametre seviyeleri $D_m=3,9\text{mm}$ için Tablo 3.4.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışması parametre seviyeleri ($D_m/D_t=6,6$ ve $D_m=3,9\text{mm}$).

Parametre	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
Değer	15	6	19,3	10	30,8

Ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin en uygun seviyelerini belirlemek için yapılan birinci kademe analizlerde kullanılan akış kanalı geometrik parametre seviyeleri ($D_m=4,1\text{mm}$ için) Tablo 3.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Ejektör akış kanalı birinci seviye analizinde kullanılan parametre seviyeleri ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Seviye	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
1	5	4,1	12,2	6	16,2
2	15	8,1	24,4	9	32,5
3	25	12,2	36,5	12	48,7



4. TAGUCHI DENEY TASARIMI

Mühendislik uygulamalarında kullanılacak yöntemlerin ve tasarımı yapılacak ürün ve cihazların optimizasyonunda, ele alınan ürün veya sistem için laboratuvarında yapılan parametrik deneylerin veya bilgisayar ortamında yapılan parametrik sayısal çözümlerin sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bu verileri en kısa zamanda, en düşük maliyetle ve en az işçilikle elde edebilmek için gerekli minimum deney sayısını veya yapılacak minimum sayısal çözüm sayısını belirlemek amacıyla farklı istatistiksel yöntemler önerilmiştir. Deney tasarımında kullanılan bazı klasik istatistiksel yaklaşımların çok fazla zaman alması, yüksek maliyeti ve çok fazla işçilik gerektirmesi gibi nedenlerle, yeni yöntemler aranmıştır. 1980 sonrasında üretim sistemlerinin ve ürünlerin geliştirilmesinde yaygın kullanılan Taguchi metodu, Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi metodu, ürün ve yöntem geliştirmenin yanında ürün veya yöntemdeki problemleri de gidermek için kullanılan güçlü bir istatistiksel metoddur [36, 37].

Taguchi metodu, istenen değere ulaşabilmek amacıyla yapılacak optimizasyon çalışmalarında kullanılacak deney sayısını minimize etmeyi ve istenen değer etrafında oluşan değişken sonuçların saçılımını azaltmayı hedefler. Yöntemin adımları; kontrol edilebilir değişken parametreleri belirlemek, kontrol edilemeyen sonuçları gözlemlemek, istatistiksel yaklaşımlarla sonuç üzerinde en etkili parametrelerin ve bu parametrelerin en uygun seviyelerinin tahmin edilmesidir [37].

Taguchi metodu, kontrol edilebilir değişken parametrelerin sayısı ve bu parametrelerin seviyeleri ile yapılacak kombinasyonlarda; deney sayısının, zaman, maliyet ve iş gücünün azaltılması istenen durumlarda kullanılır. Bu sayede, daha az sayıda deney yapılarak, daha verimli sonuçlar elde edebilmek mümkündür [38].

Dr. Genichi Taguchi, deneme sayısını azaltarak daha iyi sonuçlar elde edilebilecek deneyleri belirleyen ortogonal dizileri geliştirmiştir. Ortogonal dizide amaç, değişken

değerlerin yani parametre seviyelerinin, teker teker uygulanması yerine, eş zamanlı uygulamasını sağlamaktır.

Örneğin, 3'er seviyesi olan 5 değişken parametrenin sonuçlar üzerindeki etkisini inceleyip en iyi modeli ortaya koyabilecek deneylerin sayısı, klasik deney tasarım yöntemi olan tam faktöriyel yöntemine göre $3^5=243$ adettir. Ancak Taguchi yöntemi uygulanacak olursa, $L27(3^5)$ ortogonal dizisi ile sadece 27 adet deney yapmak yeterli olacaktır. Bundan dolayı Taguchi yönteminde kullanılan ortogonal dizilerle, klasik tam faktöriyel deney tasarımına göre daha az deneyle, işgücü, zaman ve maliyet kaybı ortadan kalkar. Bu çalışmada da kullanılan $L27(3^5)$ ortogonal dizisi Tablo 4.1.'de gösterilmiştir [37-40].

Tablo 4.1. $L27(3^5)$ Ortogonal dizisi.

DENEY	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	3
4	1	2	2	2	1
5	1	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3
7	1	3	3	3	1
8	1	3	3	3	2
9	1	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1
11	2	1	2	3	2
12	2	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1
14	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	3
16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

Taguchi yönteminde etkili değişken parametreler; girdiler (kontrol edilebilen değişkenler) ve gürültü (kontrol edilemeyen değişkenler) olarak ikiye ayrılmıştır. Burada gürültü değişkenleri, tespit edilemeyen değişkenler veya çevresel etkiler gibi kontrolü mümkün olmayan ya da çok zor olan değişkenlerdir. Taguchi yönteminde, kontrol edilemeyen faktörlerin deney sonuçlarına etkisini azaltabilmek amacıyla Sinyal/Gürültü (S/G) oranını kullanılmıştır. Bu oran girdi parametre ve değerlerinin değişkenliğinin, ortalama yanıt değerine etkilerini, gürültü faktörlerinin bir sonucu olarak tanımlar. S/G oranı üç farklı kategoride açıklanmıştır. Bunlar, en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal en iyi S/G oranlarıdır [37, 38].

En küçük en iyi S/G oranı, performansın en iyi olması için sonuç değerlerinde sayısal olarak en küçük değeri veren modelin belirlenmesinde kullanılır [41]. Örneğin, zayıflamak için bazı gıdaların vücut ağırlığına ve beden ölçülerine etkisini belirlenmesi amacıyla deney yapılacak olursa, en küçük en iyi S/G oranı kullanılır. Bu sayede, kilo almaya etkisi en az olan gıdalar seçilerek, zayıflama süresi kısaltılıp, beslenme ve diyet optimizasyonu yapılır. En küçük en iyi S/G oranı Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$S/G = -10 \log \left(\frac{1}{10} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.1)$$

En büyük en iyi S/G oranı, performansın en iyi olması amacıyla sonuç değerlerinde sayısal olarak en büyük değeri veren modelin tespitinde kullanılır [41]. Örneğin, kilo aldirmek için bazı gıdaların vücut ağırlığına ve beden ölçülerine etkisinin belirlenmesi amacıyla deney yapılırsa, en büyük en iyi S/G oranı kullanılır. Bu sayede kilo almaya etkisi en fazla olan gıdalar seçilerek, kilo almak için gereken süre kısaltılarak, beslenme optimizasyonu yapılır. En büyük en iyi S/G oranı Denklem 4.2’de verilmiştir.

$$S/G = -10 \log \left(\frac{1}{10} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.2)$$

Nominal en iyi S/G oranı, performansın en iyi olması amacıyla sonuç değerlerinde sayısal olarak beklediğimiz hedef değere en yakın değeri veren modelin

araştırılmasında kullanılır [41]. Örneğin, fit bir vücuda sahip olmak amacıyla bazı gıdaların vücut-kitle indeksine etkisini belirlemek amacıyla yapılacak deneylerde, nominal en iyi S/G oranı kullanılır. Bu sayede istenen vücut-kitle indeksine ulaşılırken en uygun beslenme programı oluşturulabilir. Bu sayede sağlıklı beslenmeyle fit bir vücuda ulaşmada gerekli süre kısaltılır. Nominal en iyi S/G oranı Denklem 4.3’de verilmiştir.

$$S/G = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (4.3)$$

y = Sonuç verileri

$\bar{y}$ = Sonuç verilerinin aritmetik ortalaması

s_y^2 = Sonuç verilerinin varyansı

n = Gözlem sayısı

Taguchi yönteminde son adım, elde edilen sonuçlarla üretilen model ile doğrulama testinin yapılmasıdır. Doğrulama testlerinde kullanılan model, değişkenlerin performans ölçütünde ürettiği toplam etki ile tanımlanmaktadır.

Belirlenen en uygun parametre seviyeleriyle oluşturulacak model ile elde edilebilecek performans ölçütünün Taguchi yöntemiyle tahmininde (τ_i) Denklem 4.4 kullanılmaktadır.

$$\tau = \tau_m + \sum_{i=1}^j (\tau_i - \tau_m) \quad (4.4)$$

τ = En uygun modelin S/G oranı

τ_m = HAD analizlerinden hesaplanan S/G oranının aritmetik ortalaması

τ_i = En uygun modelin HAD analizi ile elde edilecek S/G oranı

5. SAYISAL ANALİZ

Tanımlı sabit ejektör işletme şartlarında (girişlerde ve çıkıştaki basınç ve sıcaklık sınır şartlarında); birincil ve ikincil akışkan kütleli debileri ($\dot{m}_s$ ve $\dot{m}_s$), GBO ve BKO sonuçlarına sayısal modeldeki ağ yapısının ve eleman sayılarının etkisini incelemek üzere 29 sayısal model hazırlanmıştır. Bunlardan kararlı sonuç veren, minimum eleman sayılı ve fiziksel sınır şartlarına en uygun ağ yapısı parametreleriyle oluşturulan model seçilmiştir. Bu model ile etkileri incelenecek akış kanalı geometrik parametreleri için literatürde verilen aralıkta belirlenen, üçer seviye seçilmiştir. Performansa etkileri araştırılan akış kanalı geometrik parametreleri; emme odası daralma açısı (α_2), emme odası uzunluğu (L_s), karışım odası uzunluğu (L_m), difüzör genişleme açısı (α_3) ve difüzör uzunluğu (L_d)’dur. Parametre seviyeleri, Dr. Genichi Taguchi’nin önerdiği L27(3^5) ortogonal dizisine uygun eşleştirilerek, 27 farklı ejektör katı modeli ve sayısal modeli oluşturulmuştur. Bu modellerin HAD analiz sonuçları, Taguchi metodunda önerilen “en büyük en iyi” sinyal gürültü oranı (S/G) hedefine uygun olarak (KOYHnde GBO=7,2 sağlamak üzere) en etkili geometrik parametreler ve tüm parametrelerin en uygun seviyeleri belirlenmiştir.

Bu sayısal analiz çalışmasında, ejektör geometrik modellerinin oluşturulmasında SolidWorks ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinde SolidWorks Flow Simulation yazılımları kullanılmıştır. SolidWorks Flow Simulation yazılımı, Denklem 5.1’de verilen kütleli korunumu (süreklilik denklemleri), Denklem 5.2’de verilen momentumun korunumu ve Denklem 5.3’de verilen enerjinin korunumu denklemlerini sayısal olarak çözer. Ayrıca SolidWorks Flow Simulation yazılımında; gazların yoğunluğu, viskozitesi ve diğer termodinamik özellikleri sıcaklığa bağlı düzenlenen tanım bağıntılarıyla, Denklem 5.4’de verilen ideal gaz hal denklemleri ve Denklem 5.5’de verilen entalpi tanım bağıntısı ile hesaplanır [34, 37].

Kütlenin korunumu (süreklilik) denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (5.1)$$

Momentumun korunumu denklemi:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (5.2)$$

τ_{ij} = viskoz gerilme tensörü

Enerjinin korunumu denklemi:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + P(\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (5.3)$$

Φ = viskoz disipasyon terimi

k = ısı iletim katsayısı

Sıkıştırılabilir akışkanlar için ideal gaz hal denklemi:

$$P = \rho RT \quad (5.4)$$

Özgül ısı sabit kabul edilerek, entalpi:

$$dh = c_p dT \quad (5.5)$$

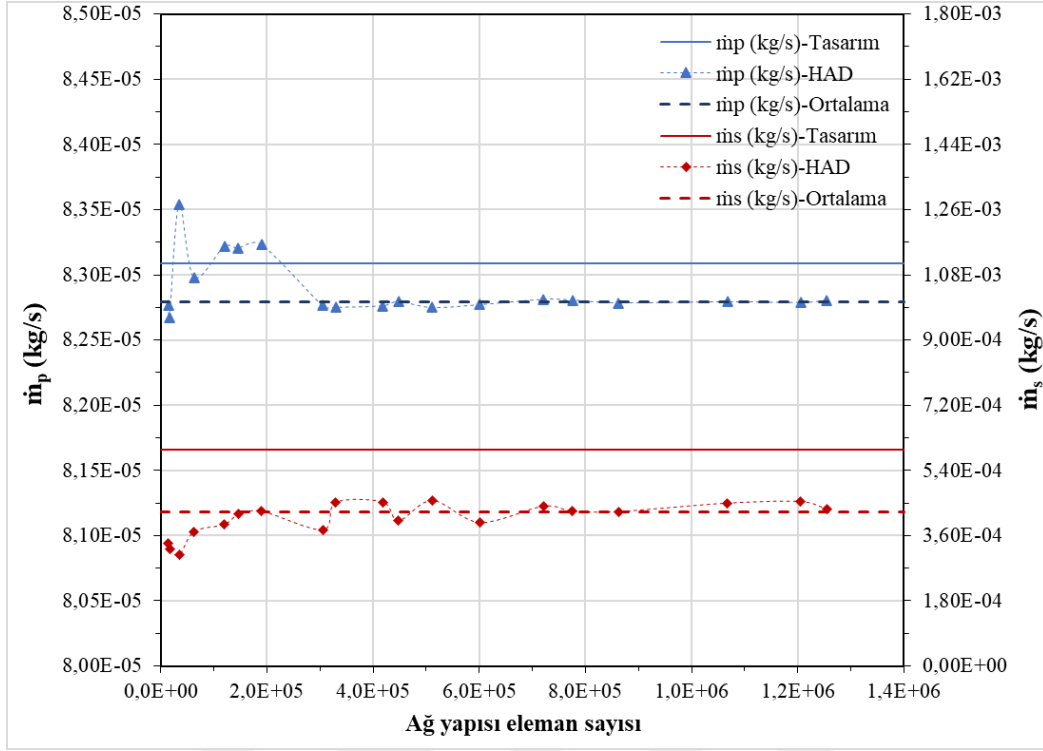
SolidWorks Flow Simulation yazılımı, farklı geometrilerdeki, daimi (zamandan bağımsız), laminar, türbülanslı ve geçiş akışlarının sayısal çözümünde, Lam ve Bremhorst'un [42] önerdiği sönümlleme fonksiyonu ile geliştirilmiş yaygın uygulanan k-ε türbülans modelini kullanmaktadır. SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile ısı ve hidrodinamik bakımdan gelişmekte olan tek fazlı akışların, KOYH ejektöründeki (yüksek sıcaklıkta gaz karışımları) sıkıştırılabilir akışların çözülebileceği, yazılımda kullanılan; yapısal ve daldırılmış ağ yapısının özellikleri ve sayısal çözüm yöntemin ayrıntıları literatürden görülebilir [9, 17, 43].

6. BİRİNCİ KADEME ANALİZLER VE SONUÇLARI

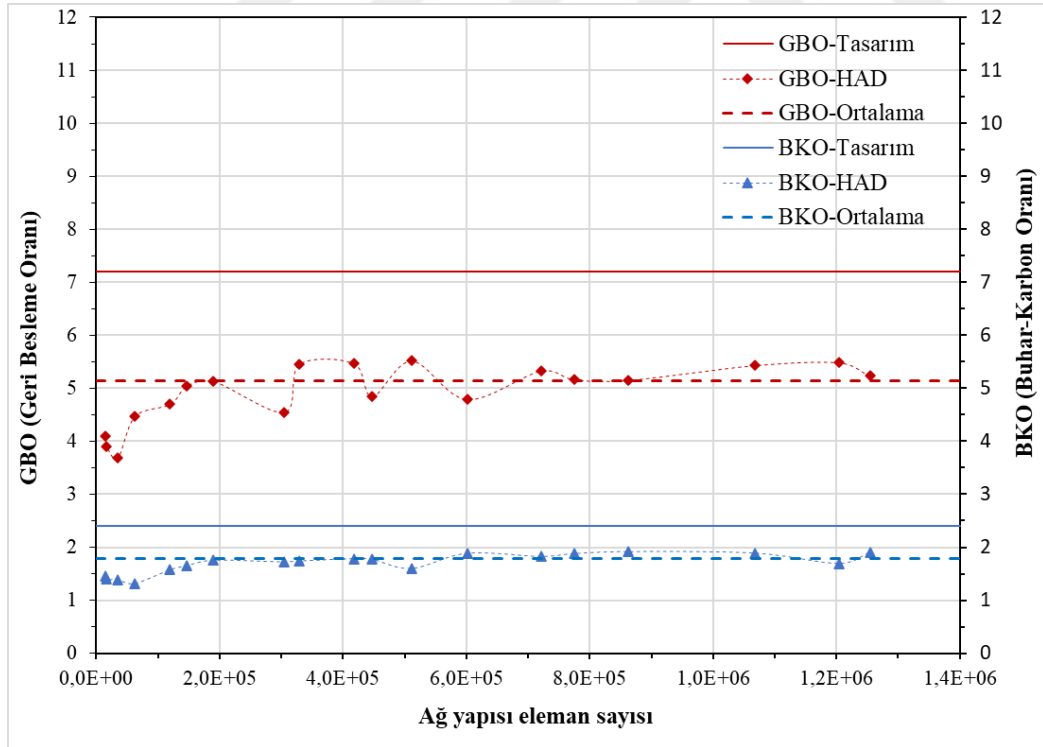
Bu çalışmada, Şekil 3.2.'de katı modeli verilen KOYH ejektörünün tasarımında; Tablo 3.1.'de verilen KOYH işletme şartları ile hesaplanan parametreler (Tablo 3.2.) ve literatüre uygun seçilen (Tablo 3.4.) diğer akış kanalı geometrik parametreleri kullanılmıştır. Ejektör akış kanalında ağ yapısı oluşturulurken; katı yüzeylerin yakınındaki bölgelerde, akış hızında ani değişikliğe neden olan şok dalgalarının görülebileceği bölgelerde ya da iki akışkanın karışması muhtemel bölgelerdeki ağ yapısı, ağ yapısı parametreleri değiştirilerek sıkılaştırılmıştır. Ağ yapısı parametreleri değiştirilerek, tüm ejektör akış kanalındaki eleman sayıları ~14.000 ile ~1.250.000 arasında değişen, 29 farklı ejektör sayısal modeli hazırlanmıştır. Tanımlı sabit ejektör işletme şartlarında (girişlerde ve çıkıştaki basınç ve sıcaklık sınır şartlarında; Tablo 3.1.); SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile yapılan analizlerin sonuçları; birincil ve ikincil akışkan debileri ($\dot{m}_s$ ve $\dot{m}_s$), Şekil 6.1.'de, GBoları ve BKoları (GBO ve BKO) ise Şekil 6.2.'de verilmiştir.

Bu grafikler, ~510.000-1.250.000 eleman sayısı aralığında, HAD sonuçlarının eleman sayısından bağımsız olduğunu göstermektedir. Ayrıca, aynı aralıkta sonuçların ortalama değerleri ve bu ortalama değere göre % farklar da Tablo 6.1.'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre de 720.000 eleman sayısının üzerinde, sayısal çözümler ağ yapısı eleman sayısından bağımsız ve kararlıdır. Bu nedenle, Şekil 6.3.'de gösterilen, kararlı sonuç veren, minimum eleman sayılı ve akışın fiziksel şartlarına en uygun ağ yapılı (ağ yapısı parametrelili) ve eleman sayılı model (MBA-24) seçilmiştir. MBA-24 modelinin ağ yapısı (ağ yapısı parametreleri), asıl akış kanalı analizleri için hazırlanan modellerin ağ yapılarının oluşturulmasında kullanılmıştır.

Ardından bu modele göre $L27(3^5)$ ortogonal dizisine uygun akış kanalı modelleri için HAD analizleri yapılmış ve Taguchi analizi ile en etkili parametrelerin S/G oranları tespit edilmiştir.



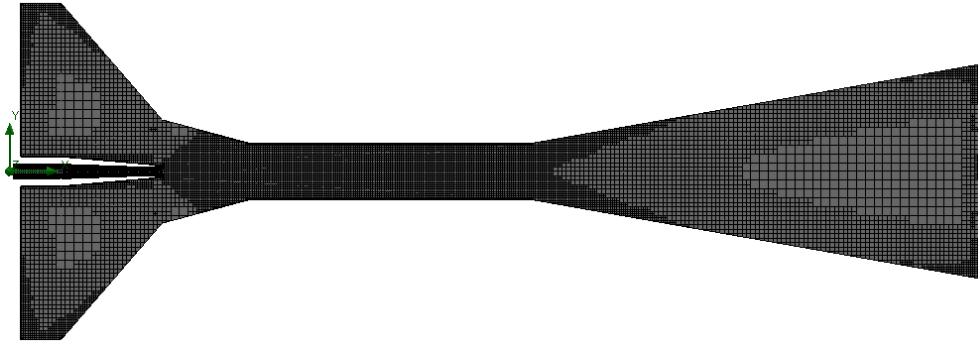
Şekil 6.1. Akışkan debilerine göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık sonuçları.



Şekil 6.2. GBO ve BKOna göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık sonuçları.

Tablo 6.1. Ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışması (Tablo 3.1.’deki işletme ve Tablo 3.2.’deki tasarım parametreleriyle yapılan analizler) sonuçları.

Model Kodu	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	GBO_{HAD} (-)	BKO_{HAD} (-)	Ortalamadan farklar			
						$\Delta\dot{m}_{p,HAD}$ (%)	$\Delta\dot{m}_{s,HAD}$ (%)	ΔGBO_{HAD} (%)	ΔBKO_{HAD} (%)
MBA-18	511.279	8,28E-05	4,57E-04	5,52	1,905	-0,05	7,24	7,30	6,47
MBA-20	554.154	8,28E-05	3,85E-04	4,66	1,636	0,01	-9,54	-9,54	-8,57
MBA-21	595.848	8,28E-05	3,92E-04	4,74	1,661	0,02	-7,97	-7,99	-7,17
MBA-22	601.224	8,28E-05	3,96E-04	4,79	1,678	-0,03	-6,96	-6,94	-6,22
MBA-24	720.676	8,28E-05	4,41E-04	5,33	1,846	0,02	3,58	3,55	3,17
MBA-23	775.575	8,28E-05	4,28E-04	5,17	1,796	0,02	0,38	0,37	0,38
MBA-25	862.162	8,28E-05	4,27E-04	5,15	1,792	-0,02	0,10	0,11	0,15
MBA-29	1.066.030	8,28E-05	4,23E-04	5,11	1,779	0,02	-0,67	-0,70	-0,57
MBA-26	1.067.329	8,28E-05	4,50E-04	5,43	1,878	0,00	5,57	5,55	4,96
MBA-27	1.204.938	8,28E-05	4,54E-04	5,49	1,895	0,00	6,60	6,62	5,91
MBA-28	1.254.744	8,28E-05	4,33E-04	5,23	1,816	0,02	1,67	1,67	1,49
Ortalamalar		8,28E-05	4,26E-04	5,15	1,789	-0,05			
Tasarım		8,31E-05	5,99E-4	7,20	2,400				
Ortalama-Tasarım %fark		-%0,4	-%29	-%29	-%26				



Şekil 6.3. En uygun ağ yapılı ve eleman sayılı model (MBA-24).

Bu S/G oranlarına göre parametrelerin önem sırasını belirleyen, ortalamaların analizi (analysis of means) ANOM ve değişken parametrelerin sonuç (hedef) parametresine yüzde etkilerini gösteren (analysis of variance) ANOVA yöntemleri kullanılmıştır.

Aynı zamanda HAD analizlerinin sonuçları ile ikinci dereceden üstel regresyon denklemi oluşturulmuş ve bu denklem en iyi parametrelere göre çözümlenerek, en uygun parametrelerle tasarlanan akış kanalı için sonuç tahmini yapılmıştır. Bunlara ek olarak en son aşamada; Taguchi metodunun tahmini GBO, üstel regresyon denkleminin verdiği GBO ve en uygun geometrili modelin HAD analizi sonuçları ile hesaplanan GBO, tasarım hedefi olan GBO (7,2) ile kıyaslanmıştır.

Ejektör performansına etkileri araştırılan; akış kanalı geometrik parametrelerinin (emme odası daralma açısı (α_2), emme odası uzunluğu (L_s), karışım odası uzunluğu (L_m), difüzör genişleme açısı (α_3) ve difüzör uzunluğu (L_d)) her biri için; seçilen L27(3^5) ortogonal dizisine ve literatüre uygun olarak, üçer seviye (Tablo 3.5.) belirlenmiştir.

Seçilen parametre seviyeleri, Dr. Genichi Taguchi'nin önerdiği L27(3^5) ortogonal dizisine uygun eşleştirilerek, 27 farklı ejektör katı modeli ve sayısal modeli oluşturulmuştur. Bu modellerin oluşturulmasında kullanılan diğer geometrik tasarım parametreleri, Tablo 3.2'de verilen değerlerdedir. 27 modelin parametrik sayısal çözümleri, SolidWorks Flow Simulation yazılımında yapılmıştır. Modellerde kullanılan akış kanalı parametre seviyeleri, sayısal modellerin ağ yapısı eleman sayıları, analizlerden elde edilen sonuçlar ve HAD analizi sonuçlarının tasarım değerlerine göre % farkları Tablo 6.2.'de görülmektedir. Tüm sonuçların aritmetik ortalamasının üzerinde sonuç veren ejektör modelleri vurgulanmıştır.

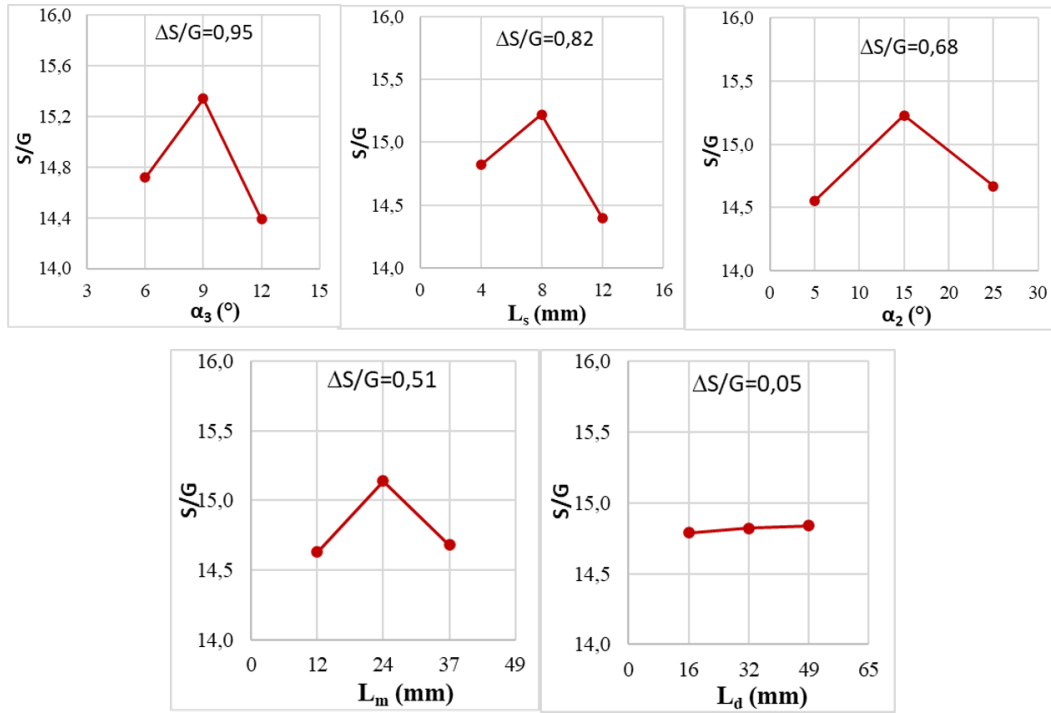
Tablo 6.2.'de verilen HAD analiz sonuçları kullanılarak ve Taguchi'nin önerdiği “en büyük en iyi” sinyal gürültü oranı (S/G) hedefine (Denklem 4.2) uygun olarak (KOYHnde GBO=7,2 sağlamak üzere), parametrelerin etki dereceleri (önem sıralaması) ve her bir parametrenin bu hedefe en uygun seviyesi belirlenmiştir (Şekil 6.4. ve Tablo 6.3.).

Ele alınan geometrik parametrelerin en uygun seviyeleri ve önem dereceleri sırasıyla; difüzör genişleme açısı $\alpha_3=9^\circ$ ($\Delta S/G=0,95$), emme odası uzunluğu $L_s \approx 8,1\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,82$), emme odası daralma açısı $\alpha_2=15^\circ$ ($\Delta S/G=0,68$), karışım odası uzunluğu $L_m \approx 24,4\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,51$) ve difüzör uzunluğu $L_d \approx 48,7\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,05$) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatürle de uyumludur. L27(3^5) ortogonal dizisindeki

modeller arasında, en uygun akış kanalı geometrik parametre seviyelerinin kombinasyonu ile tasarlanmış herhangi bir ejektör bulunmamaktadır.

Tablo 6.2. Taguchi'nin L27(3⁵) ortogonal dizisine uygun tasarlanan sayısal modeller ve HAD sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

MODEL	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman Sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO(- --)	GBO (--)	ΔBKO (%)	ΔGBO (%)
AKM-1	5	4,1	12,2	6	16,2	570.087	8,285E-05	4,524E-04	1,89	5,46	-%21,40	-%24,20
AKM-2	5	4,1	12,2	6	32,5	608.065	8,261E-05	3,957E-04	1,68	4,79	-%30,06	-%33,50
AKM-3	5	4,1	12,2	6	48,7	683.226	8,264E-05	4,364E-04	1,83	5,28	-%23,70	-%26,69
AKM-4	5	8,1	24,4	9	16,2	663.711	8,263E-05	5,040E-04	2,08	6,10	-%13,36	-%15,31
AKM-5	5	8,1	24,4	9	32,5	760.259	8,262E-05	5,193E-04	2,13	6,29	-%11,08	-%12,74
AKM-6	5	8,1	24,4	9	48,7	855.685	8,274E-05	5,062E-04	2,08	6,12	-%13,14	-%15,06
AKM-7	5	12,2	36,5	12	16,2	813.965	8,260E-05	3,863E-04	1,64	4,68	-%31,54	-%35,07
AKM-8	5	12,2	36,5	12	32,5	930.104	8,274E-05	4,045E-04	1,71	4,89	-%28,76	-%32,13
AKM-9	5	12,2	36,5	12	48,7	1.034.673	8,267E-05	3,933E-04	1,67	4,76	-%30,48	-%33,95
AKM-10	15	4,1	24,4	12	16,2	592.815	8,269E-05	4,881E-04	2,02	5,90	-%15,82	-%18,05
AKM-11	15	4,1	24,4	12	32,5	775.062	8,287E-05	4,451E-04	1,86	5,37	-%22,54	-%25,44
AKM-12	15	4,1	24,4	12	48,7	900.598	8,279E-05	4,854E-04	2,01	5,86	-%16,32	-%18,61
AKM-13	15	8,1	36,5	6	16,2	747.147	8,288E-05	4,714E-04	1,96	5,69	-%18,52	-%21,04
AKM-14	15	8,1	36,5	6	32,5	860.815	8,266E-05	5,029E-04	2,07	6,08	-%13,57	-%15,54
AKM-15	15	8,1	36,5	6	48,7	908.482	8,259E-05	4,879E-04	2,02	5,91	-%15,75	-%17,98
AKM-16	15	12,2	12,2	9	16,2	585.805	8,262E-05	4,676E-04	1,95	5,66	-%18,88	-%21,43
AKM-17	15	12,2	12,2	9	32,5	686.184	8,280E-05	4,762E-04	1,97	5,75	-%17,72	-%20,16
AKM-18	15	12,2	12,2	9	48,7	772.225	8,267E-05	4,756E-04	1,98	5,75	-%17,69	-%20,13
AKM-19	25	4,1	36,5	9	16,2	725.288	8,281E-05	4,793E-04	1,99	5,79	-%17,26	-%19,65
AKM-20	25	4,1	36,5	9	32,5	824.842	8,265E-05	4,849E-04	2,01	5,87	-%16,27	-%18,55
AKM-21	25	4,1	36,5	9	48,7	936.584	8,276E-05	4,430E-04	1,85	5,35	-%22,76	-%25,68
AKM-22	25	8,1	12,2	12	16,2	586.453	8,288E-05	4,318E-04	1,81	5,21	-%24,60	-%27,67
AKM-23	25	8,1	12,2	12	32,5	695.357	8,273E-05	4,333E-04	1,82	5,24	-%24,25	-%27,28
AKM-24	25	8,1	12,2	12	48,7	786.027	8,274E-05	4,489E-04	1,88	5,42	-%21,85	-%24,69
AKM-25	25	12,2	24,4	6	16,2	685.144	8,271E-05	4,176E-04	1,76	5,05	-%26,68	-%29,90
AKM-26	25	12,2	24,4	6	32,5	741.147	8,264E-05	4,537E-04	1,9	5,49	-%21,02	-%23,79
AKM-27	25	12,2	24,4	6	48,7	787.191	8,277E-05	4,444E-04	1,89	5,37	-%22,56	-%25,46



Şekil 6.4. Tablo 6.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı grafikleri ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Tablo 6.3. Tablo 6.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Seviye	α_2 (°)	S/G	L_s (mm)	S/G	L_m (mm)	S/G	α_3 (°)	S/G	L_d (mm)	S/G
1	5	14,55	4,06	14,82	12,18	14,63	6	14,72	16,24	14,79
2	15	15,23	8,12	15,22	24,36	15,14	9	15,34	32,48	14,82
3	25	14,67	12,18	14,4	36,54	14,68	12	14,39	48,72	14,84

Parametrelerin etki derecelendirmesini gösteren ANOM sonuçları Tablo 6.4.’de verilmiş olup, Tablo 6.2.’de verilen HAD analiz sonuçlarına uygulanan regresyon analizi ile elde edilen GBO denklemi ise Denklem 6.1’de ve parametrelerin etki derecelerini (%) gösteren ANOVA analizi sonuçları da Tablo 6.5.’de verilmiştir. Tablo 6.4.’deki ANOM ve Tablo 6.5.’deki ANOVA sonuçlarına göre ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin önem sıralaması ve etki dereceleri; difüzör genişleme açısı (α_3 ; %32,09), emme odası uzunluğu (L_s ; %23,54), emme odası daralma açısı (α_2 ; %16,97), karışım odası uzunluğu (L_m ; %11,23) ve difüzör uzunluğu (L_d ; %0,10) şeklindedir.

Tablo 6.4. Tablo 6.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

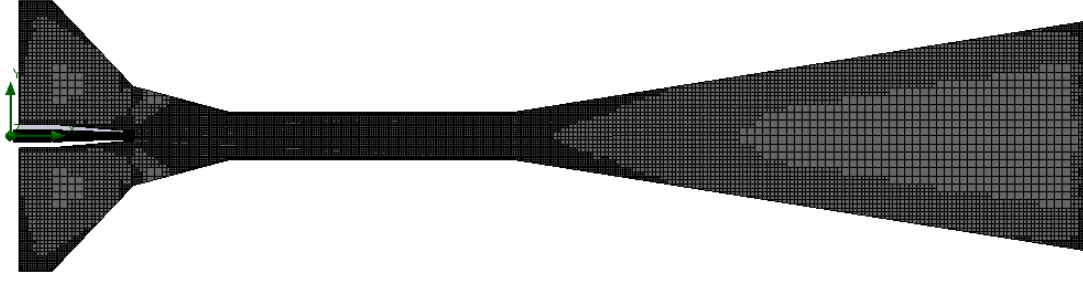
Seviye	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
1	14,55	14,82	14,63	14,72	14,79
2	15,23	15,22	15,14	15,34	14,82
3	14,67	14,4	14,68	14,39	14,84
Δ (mak - min)	0,68	0,82	0,51	0,95	0,06
Sıralama (Rank)	3	2	4	1	5

$$\begin{aligned} \text{GBO} = & 0,11592 \times \alpha_2 - 0,00378 \times \alpha_2^2 + 0,35421 \times L_s - 0,02373 \times L_s^2 + \\ & 0,10273 \times L_m - 0,00207 \times L_m^2 + 0,95585 \times \alpha_3 - 0,05494 \times \alpha_3^2 + 0,00330 \times \\ & L_d - 0,00004 \times L_d^2 - 1,12080 \quad (R^2 = 0,83938) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Tablo 6.5. Tablo 6.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Faktör	Serbestlik Derecesi	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Etki	Sıralama
Regresyon	10	4,30038	0,430038	8,36	0,0001	%0,00	
α_2	2	0,86959	0,434795	8,45	0,003	%16,97	3
L_s	2	1,20625	0,603123	11,73	0,001	%23,54	2
L_m	2	0,57511	0,287554	5,59	0,014	%11,23	4
α_3	2	1,64413	0,822063	15,98	0,000	%32,09	1
L_d	2	0,00531	0,002657	0,05	0,95	%0,10	5
Hata	16	0,82289	0,05143			%16,06	
Toplam	26	5,12327				%100,00	

Taguchi en büyük en iyi S/G oranları, ANOVA analizi sonuçları ve regresyon analizi sonuçları dikkate alınarak; en uygun akış kanalı parametre seviyeleriyle tasarlanan ejektörün (AKM-F1.7) ağ yapısı, Şekil 6.5.’de ve bu ejektör modeliyle yapılan HAD analizinin sonuçları da Tablo 6.6.’da verilmiştir. AKM-F1.7 modeliyle elde edilen GBO (5,73) KOYHnde istenen değerden (7,2) ~%20,5 daha düşüktür.



Şekil 6.5. En uygun parametre seviyeleri ile tasarlanan ejektörün (AKM-F1.7) ağ yapısı ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Tablo 6.6. En uygun ejektör akış kanalı geometrik parametre seviyeli AKM-F1.7 modeli ve HAD sonuçları ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

MODEL	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (---)
AKM-F1.7	15	8,1	24,4	9	48,7	842.712	8,275E-05	4,739E-04	1,97	5,73

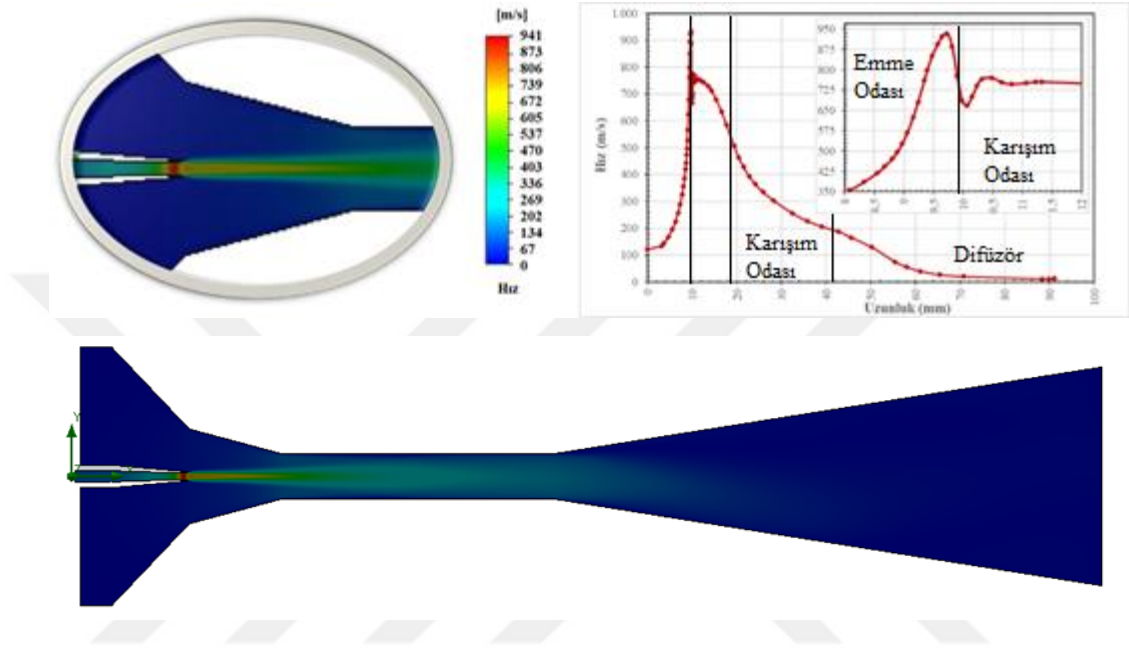
Denklem 6.1'den, $\alpha_2=15^\circ$; $L_s=8,1\text{mm}$; $L_m=24,4\text{mm}$; $\alpha_3=9$ ve $L_d=48,7\text{mm}$ için elde edilen $GBO=6,57$ 'dir. HAD çözümünün, HAD analiz sonuçlarından regresyon analiziyle geliştirilen Denklem 6.1'e göre $-14,66\%$ fark ile sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca HAD çözümünün, Taguchi tahmini sonuca göre de $-13,44\%$ fark ile doğru olduğu, Tablo 6.7.'den görülmektedir.

Tablo 6.7. AKM-F1.7 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 6.1) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=7$ ve $D_m=4,1\text{mm}$).

Çözüm Yöntemi	GBO
Sayısal Çözüm (HAD)	5,73
Regresyon Tahmini (Denklem 6.1)	6,57
Taguchi Tahmini	6,50
Karşılaştırılan Çözüm Yöntemi	Fark (%)
Sayısal Çözüm – Denklem 6.1	$-14,66\%$
Sayısal Çözüm - Taguchi Tahmini	$-13,44\%$

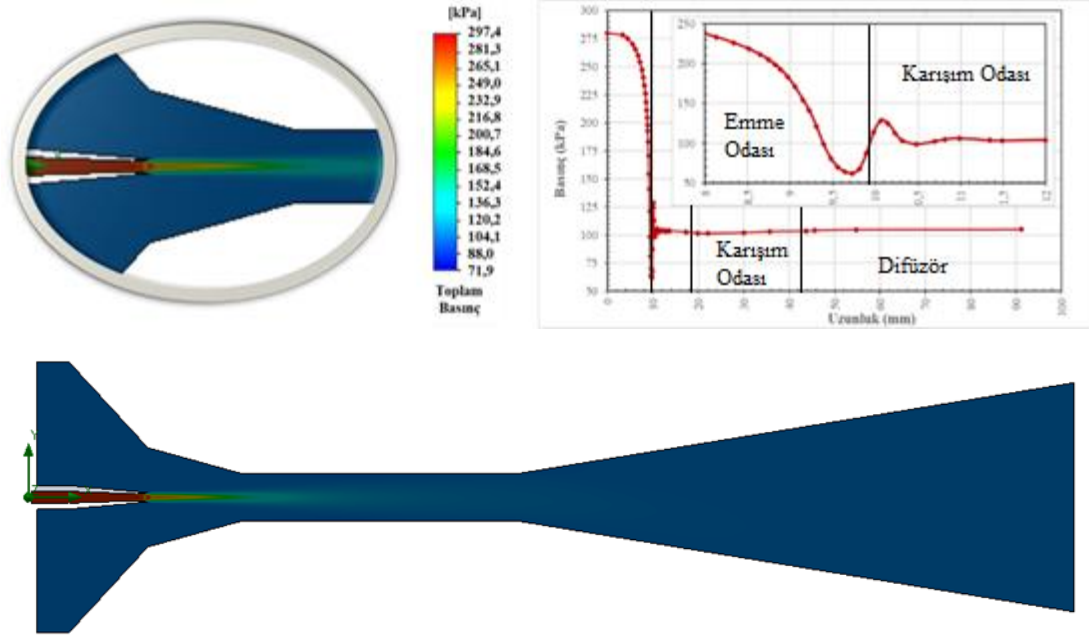
AKM-F1.7 ejektör modelinde, emme odası uzunluğu $L_s=8,1\text{mm}$, karışım odası uzunluğu $L_m=24,4\text{mm}$ ve difüzör uzunluğu $L_d=48,7\text{mm}$ ve toplam ejektör uzunluğu ise $L_{top}=91,1\text{ mm}$ 'dir. Ejektör performansına etkisi en düşük akış kanalı parametresi olan ejektör uzunluğunun minimum değeri ($L_d=16,2\text{mm}$) seçilseydi, toplam ejektör uzunluğu $L_{top}=58,6\text{mm}$ olacak ve böylece toplam uzunluk $\sim 36\%$ kısılacaktır.

AKM-F1.7 modelinin HAD analiz sonuçlarıyla elde edilen hız, basınç ve sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 6.6., Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de verilmiştir. AKM-F1.7 modelinde; emme odası başlangıcı $x \sim 10,2\text{mm}$, karışım odası başlangıcı $x \sim 18,3\text{mm}$ ve difüzör başlangıcı $x \sim 42,6\text{mm}$ 'dir.



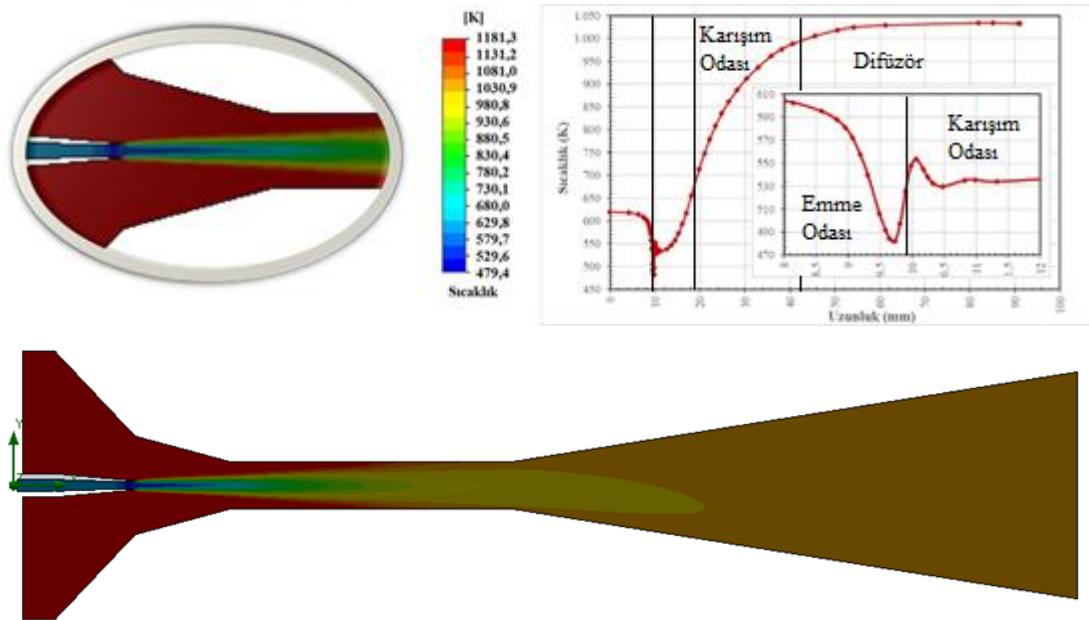
Şekil 6.6. AKM-F1.7 ejektör modelinde hız dağılımı.

Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.'den yakınsak-ıraksak lüle boğaz kesitine yaklaşıldıkça, basıncın hızla düştüğü ve hızın yükseldiği görülmektedir. Yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünde oluşan şok dalgaları bu sonuçları doğrulamaktadır. Emme odası giriş kesiti ve difüzör çıkış kesitlerinde basınç ve hız düzgün dağılmıştır. Emme odası girişinde ve difüzör çıkışında geri akış görülmemektedir.

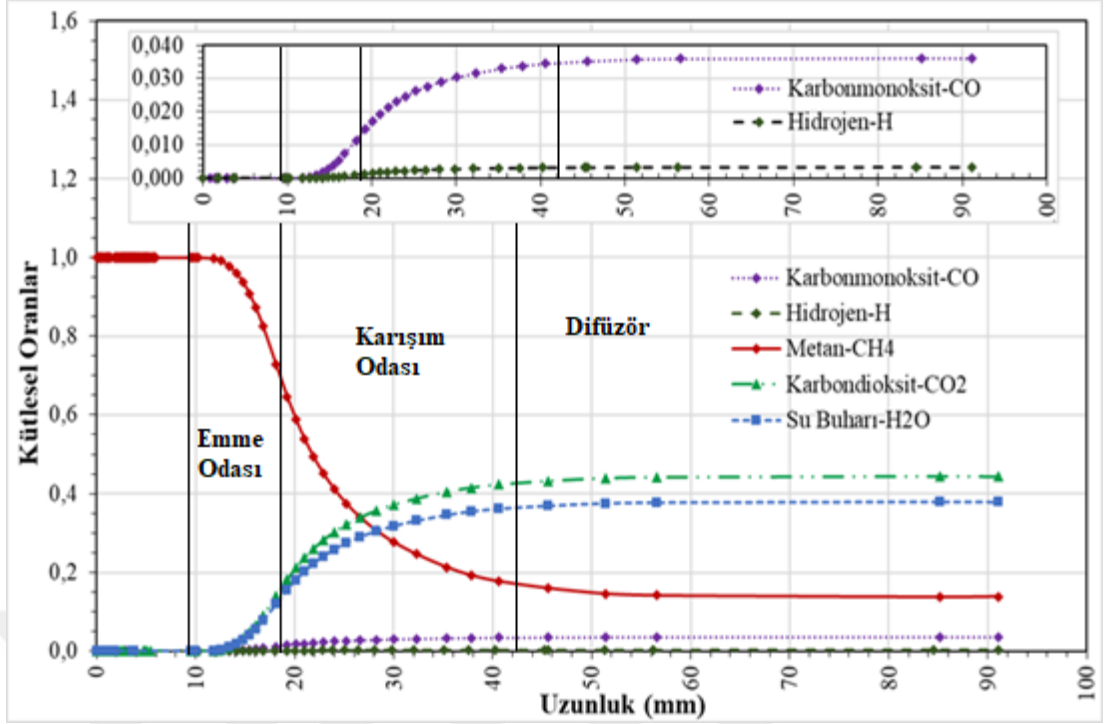


Şekil 6.7. AKM-F1.7 ejektör modelinde basınç dağılımı.

Şekil 6.8.'den yakınsak-ıraksak lüle çıkışından itibaren, birincil ve ikincil akışların karışmaya başlamasıyla, metan gazı sıcaklığının emme odasında çok hızlı yükseldiği, karışım odasında sıcaklık artışının yavaşladığı ve difüzörde ısı dengenin olduğu görülmektedir.



Şekil 6.8. AKM-F1.7 kodlu ejektör modelinde sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.9. AKM-F1.7 modelinde gaz bileşenlerin kütesel oranlarının akış doğrultusundaki değişimleri.

Şekil 6.9.'daki görülen AKM-F1.7 modelinde gaz bileşenlerin kütesel oranlarının akış doğrultusundaki değişimleri, Şekil 6.8.'deki sıcaklık değişimi ile uyumludur. Karışım odası çıkışına doğru, yakıt ve anot atık gazı büyük oranda karışmış ve difüzörde (KOYH girişinden önce) homojen bir karışım elde edilmiştir.

Sonuç olarak birinci kademe analizlerde KOYH ejektörünün akış kanalı geometrik parametreleri için elde edilen en uygun seviyelerle hazırlanan ejektör modeli (AKM-F1.7) ile yapılan HAD analizlerinin sonuçları, SolidWorks Flow Simulation yazılımının ve Taguchi yönteminin, sayısal deneylerle yapılacak benzer optimizasyon çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.



7. İKİNCİ KADEME ANALİZLER VE SONUÇLARI

Birinci kademe analizlerinden elde edilen sonuçlar ve literatür bilgileri dikkate alınarak, ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla, yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu (L_{nd}) da, etkileri incelenen geometrik parametrelere dahil edilmiştir. Böylece, etkili geometrik parametre sayısı altıya çıkarılmıştır.

Literatüre uygun seçilen üç farklı karışım odası çapında ve karışım odası çapına bağlı olarak ele alınan diğer parametrelerin literatüre uygun seviyeleriyle, birincil lüle çıkış kesitinin emme odası giriş kesitiyle çakışması ($NXP=0$) durumunda, tasarım basınç ve sıcaklık sınır şartlarında (Tablo 3.1.) ikinci kademe analizler yapılarak, sonuçlar tekrar gözlemlenmiştir.

Etkili parametrelerin sayısının beşden altıya çıkarılmasından dolayı Tablo 7.1.'de gösterilen ve ortogonal diziler arasında parametre sayısı ile seviyeleri bakımından en uygun Taguchi $L_{27}(3^6)$ ortogonal dizisi oluşturularak, 3'er seviyeli 6 parametrenin kullanıldığı 27 farklı ejektör modeliyle HAD analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizlerde literatüre uygun seçilen karışım odası çaplarının ($D_m=6D_t=3,48\text{mm}$, $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ ve $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$) her biri için 27 adet olmak üzere, toplamda 81 adet farklı ejektör modeli kullanılmıştır.

HAD analizlerinin sonuçlarına “en büyük en iyi” S/G oranı değerlendirme ölçütü kullanılarak, Taguchi analizleri uygulanmıştır. Ardından ANOM, regresyon ve ANOVA analizleri yapılarak, etkili parametreler ve parametrelerin en uygun seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 7.1. Taguchi L27(3⁶) Ortogonal dizisi.

	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	1	1	3	3
4	1	2	2	2	1	1
5	1	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3
7	1	3	3	3	1	1
8	1	3	3	3	2	2
9	1	3	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3
12	2	1	2	3	3	1
13	2	2	3	1	1	2
14	2	2	3	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1
16	2	3	1	2	1	2
17	2	3	1	2	2	3
18	2	3	1	2	3	1
19	3	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1
21	3	1	3	2	3	2
22	3	2	1	3	1	3
23	3	2	1	3	2	1
24	3	2	1	3	3	2
25	3	3	2	1	1	3
26	3	3	2	1	2	1
27	3	3	2	1	3	2

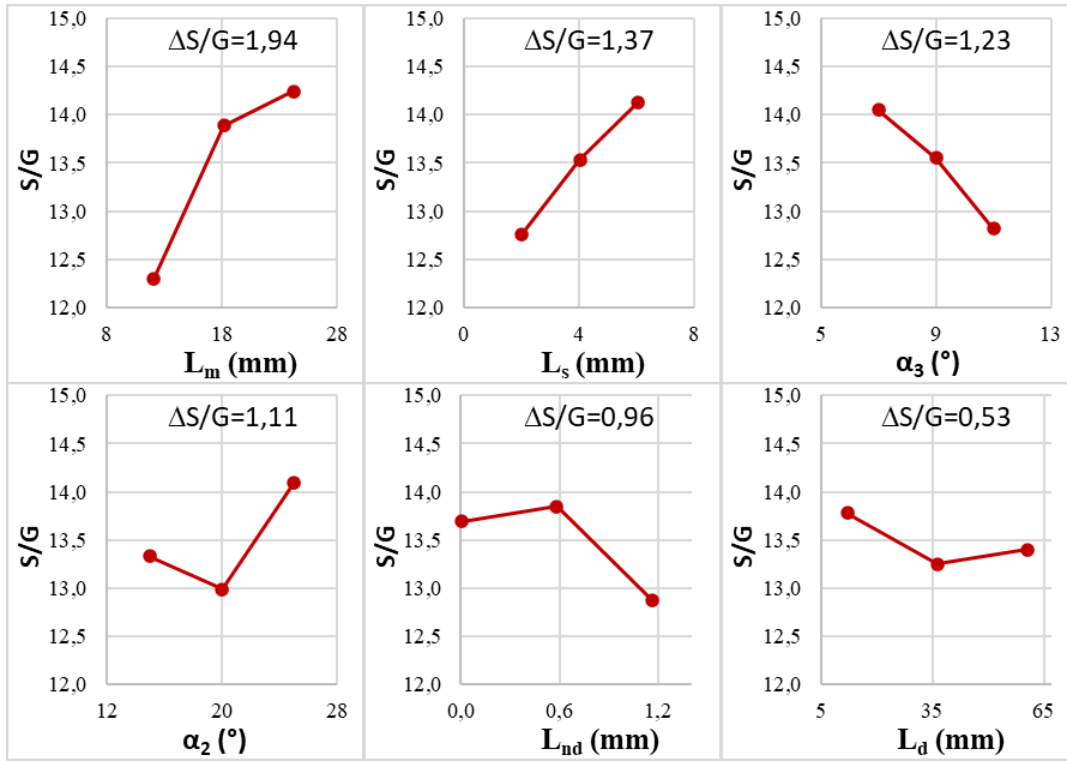
Bu parametrelerden oluşan en iyi modelin HAD analizleri yapılarak regresyon tahmini sonucu ve Taguchi tahmin sonucu, HAD analizi sonucuyla karşılaştırılmıştır. En nihayetinde yapılan karşılaştırmalarla, 3 farklı karışım odası çapının herbiri için en iyi geometrik parametre seviyelerinden oluşan ejektör modelleri tespit edilerek, bunlar arasından da istenen GBO değerine (7,2) en uygun model seçilmiştir. Ayrıca bu model için ağ yapısından ve eleman sayısından bağımsızlık analizleri yapılmıştır. Ana akış kanalı tasarlanmış bir ejektörde işletme sırasında değiştirilebilecek parametreler olan; birincil lüle konumuna (NXP), birincil akışkanın giriş basıncına ve sıcaklığına bağlı parametrik HAD analizleri de yapılmıştır.

7.1. $D_m=3,48\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları

$D_m=6D_t=3,48\text{mm}$ için oluşturulan 27 modelin HAD sonuçları Tablo 7.2.'de gösterilmiştir. Tablo 7.2.'deki tüm modellerin sonuçları, hedef değere ($GBO=7,2$) göre daha düşüktür. Mevcut 27 model arasında hedef değere en yakın sonucu $-\%13,86$ farkla AKFM6-26 modeli vermiştir. Bu verilere göre, yapılan Taguchi analizlerinden elde edilen en büyük en iyi S/G oranlarının grafikleri Şekil 7.1.'de ve sayısal sonuçlar da Tablo 7.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 7.2. $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.

MODEL	L_m (mm)	L_s (mm)	α_2 (°)	L_{nd} (mm)	L_d (mm)	α_3 (°)	Eleman Sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (—)	ΔBKO (%)	ΔGBO (%)
AKFM6-1	12,1	2	15	0	12,1	7	531.993	8,24E-05	3,52E-04	1,51	4,27	-%37,01	-%40,76
AKFM6-2	12,1	2	15	0	36,3	9	697.858	8,20E-05	3,05E-04	1,33	3,72	-%44,47	-%8,40
AKFM6-3	12,1	2	15	0	60,6	11	799.113	8,17E-05	2,89E-04	1,28	3,54	-%46,84	-%50,80
AKFM6-4	12,1	4	20	0,58	12,1	7	568.807	8,22E-05	3,52E-04	1,52	4,28	-%36,85	-%40,60
AKFM6-5	12,1	4	20	0,58	36,3	9	694.803	8,21E-05	3,51E-04	1,52	4,28	-%36,87	-%40,62
AKFM6-6	12,1	4	20	0,58	60,6	11	788.977	8,21E-05	3,08E-04	1,34	3,75	-%43,96	-%47,89
AKFM6-7	12,1	6,1	25	1,16	12,1	7	584.599	8,30E-05	4,28E-04	1,79	5,16	-%25,28	-%28,37
AKFM6-8	12,1	6,1	25	1,16	36,3	9	700.107	8,30E-05	3,15E-04	1,36	3,79	-%43,40	-%47,32
AKFM6-9	12,1	6,1	25	1,16	60,6	11	778.444	8,27E-05	3,76E-04	1,60	4,54	-%33,31	-%36,91
AKFM6-10	18,2	2	20	1,16	12,1	9	627.845	8,30E-05	4,24E-04	1,78	5,11	-%25,89	-%29,03
AKFM6-11	18,2	2	20	1,16	36,3	11	802.584	8,30E-05	2,71E-04	1,18	3,27	-%50,70	-%54,65
AKFM6-12	18,2	2	20	1,16	60,6	7	822.301	8,29E-05	3,24E-04	1,40	3,91	-%41,83	-%45,73
AKFM6-13	18,2	4	25	0	12,1	9	625.759	8,21E-05	4,57E-04	1,92	5,56	-%20,09	-%22,73
AKFM6-14	18,2	4	25	0	36,3	11	787.873	8,24E-05	4,32E-04	1,82	5,24	-%24,16	-%27,16
AKFM6-15	18,2	4	25	0	60,6	7	806.434	8,18E-05	4,65E-04	1,95	5,68	-%8,61	-%21,11
AKFM6-16	18,2	6,1	15	0,58	12,1	9	638.395	8,22E-05	4,44E-04	1,87	5,40	-%22,18	-%25,02
AKFM6-17	18,2	6,1	15	0,58	36,3	11	811.518	8,23E-05	4,26E-04	1,80	5,18	-%25,01	-%28,08
AKFM6-18	18,2	6,1	15	0,58	60,6	7	821.419	8,21E-05	4,84E-04	2,02	5,89	-%16,02	-%18,24
AKFM6-19	24,2	2	25	0,58	12,1	11	685.436	8,21E-05	4,19E-04	1,78	5,11	-%25,93	-%29,08
AKFM6-20	24,2	2	25	0,58	36,3	7	797.592	8,21E-05	4,60E-04	1,93	5,60	-%19,60	-%22,20
AKFM6-21	24,2	2	25	0,58	60,6	9	938.070	8,22E-05	4,33E-04	1,83	5,27	-%23,88	-%26,86
AKFM6-22	24,2	4	15	1,16	12,1	11	709.244	8,28E-05	3,71E-04	1,58	4,48	-%34,08	-%37,71
AKFM6-23	24,2	4	15	1,16	36,3	7	808.780	8,29E-05	4,08E-04	1,72	4,92	-%28,34	-%31,65
AKFM6-24	24,2	4	15	1,16	60,6	9	950.774	8,29E-05	4,07E-04	1,72	4,91	-%28,47	-%31,79
AKFM6-25	24,2	6,1	20	0	12,1	11	700.844	8,19E-05	3,93E-04	1,68	4,80	-%29,86	-%33,26
AKFM6-26	24,2	6,1	20	0	36,3	7	797.610	8,21E-05	5,09E-04	2,11	6,20	-%12,09	-%13,86
AKFM6-27	24,2	6,1	20	0	60,6	9	931.916	8,20E-05	4,30E-04	1,82	5,24	-%24,19	-%27,20



Şekil 7.1. Tablo 7.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı grafikleri ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).

En büyük en iyi S/G oranına göre yapılan değerlendirmede en uygun parametre seviyeleri ve önem dereceleri sırasıyla; karışım odası uzunluğu $L_m=24,2\text{mm}$ ($\Delta S/G=1,94$), emme odası uzunluğu $L_s=6,1\text{mm}$ ($\Delta S/G=1,37$), difüzör genişleme açısı $\alpha_3=7^\circ$ ($\Delta S/G=1,23$), emme odası daralma açısı $\alpha_2=25^\circ$ ($\Delta S/G=1,11$), yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün aksel uzunluğu $L_{nd}=0,58\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,97$) ve difüzör uzunluğu $L_d=12,1\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,53$)’dir.

Tablo 7.3. Tablo 7.2.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).

Seviye	L_{nd} (mm)	S/G	α_2 (°)	S/G	L_s (mm)	S/G	L_m (mm)	S/G	α_3 (°)	S/G	L_d (mm)	S/G
1	0,00	13,69	15	13,33	2,02	12,76	12,11	12,30	7	14,05	12,11	13,78
2	0,58	13,85	20	12,99	4,04	13,53	18,17	13,89	9	13,55	36,33	13,25
3	1,16	12,88	25	14,10	6,06	14,13	24,22	14,24	11	12,82	60,55	13,40

Parametrelerin etki derecelendirmesini gösteren ANOM sonuçları Tablo 7.4.’de verilmiş olup, regresyon analizi ile elde edilen GBO denklemi ise Denklem 7.1’de ve

parametrelerin etki derecelerini (%) gösteren ANOVA analiz sonuçları da Tablo 7.5.'de verilmiştir.

Tablo 7.4. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).

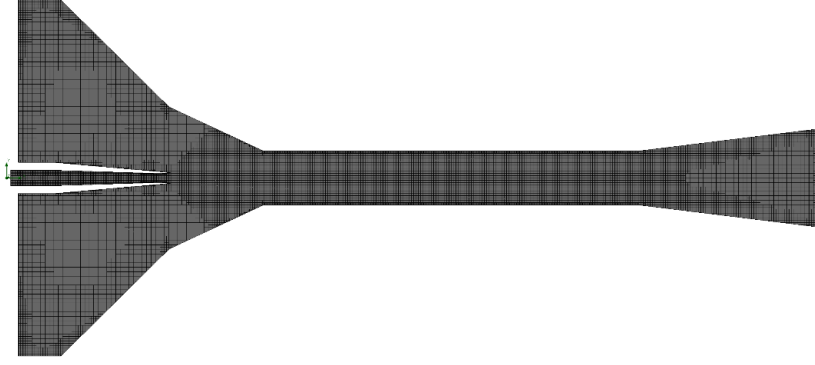
Seviye	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
1	13,69	13,33	12,76	12,3	14,05	13,78
2	13,85	12,99	13,53	13,89	13,55	13,25
3	12,88	14,1	14,13	14,24	12,82	13,4
Δ (mak - min)	0,97	1,11	1,37	1,94	1,23	0,53
Sıralama (Rank)	5	4	2	1	3	6

Tablo 7.4.'deki ANOM ve Tablo 7.5.'deki ANOVA sonuçlarına göre ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin önem sıralaması ve etki dereceleri; karışım odası uzunluğu $L_m=35,42\%$, emme odası uzunluğu $L_s=14,70\%$, difüzör genişleme açısı $\alpha_3=12,77\%$, emme odası daralma açısı $\alpha_2=9,88\%$, yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün aksel uzunluğu $L_{nd}=9,30\%$ ve difüzör uzunluğu $L_d=1,48\%$ şeklindedir.

Tablo 7.5. Tablo 7.2.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=6$ ve $D_m=3,48\text{mm}$).

Faktör	Serbestlik Derecesi	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Etki	Sıralama
Regresyon	12	13,0484	1,087370	5,93	0,0012		
L_m	2	5,5317	2,7659	15,08	0	35,42%	1
L_s	2	2,2948	1,1474	6,26	0,011	14,70%	2
α_2	2	1,5435	0,7718	4,21	0,037	9,88%	4
L_{nd}	2	1,4526	0,7263	3,96	0,043	9,30%	5
L_d	2	0,2311	0,1156	0,63	0,547	1,48%	6
α_3	2	1,9947	0,9973	5,44	0,018	12,77%	3
Hata	14	2,5673	0,1834			16,44%	
Toplam	26	15,6158				100,00%	

Taguchi S/G oranları, ANOVA analizi sonuçları ve regresyon analizi sonuçları dikkate alınarak; en uygun akış kanalı parametre seviyeleriyle tasarlanan ejektörün (AKM-F2.6) ağ yapısı, Şekil 7.2.'de, bu ejektör modeliyle yapılan HAD analizinin sonuçları da Tablo 7.6.'da verilmiştir. AKM-F2.6 modeliyle elde edilen GBO (5,51) KOYHnde istenen değerden (7,2) $\sim -23,5\%$ daha düşüktür.



Şekil 7.2. AKM-F2.6 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=3,48\text{mm}$).

Tablo 7.6. AKM-F2.6 modelinin HAD sonuçları ($D_m=3,48\text{mm}$).

MODEL	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (---)
AKM-F2.6	0,58	25	6,1	24,2	7	12,1	695.204	8,207E-05	4,522E-04	1,90	5,51

Denklem 7.1'den; $D_m=3,48\text{mm}$; $L_{nd}=0,58\text{mm}$; $\alpha_2=25^\circ$; $L_s=6,1\text{mm}$; $L_m=24,2\text{mm}$; $\alpha_3=7^\circ$ ve $L_d=12,1\text{mm}$ için $GBO=6,35$ olmaktadır. Buna göre HAD çözümü ile karşılaştırmak üzere Tablo 7.2 HAD sonuçlarıyla geliştirilen Denklem 7.1'e göre $+ \%15,25$ fark ile tahminin doğru yapıldığı görülmektedir. Taguchi yönteminin tahminini $GBO=6,48$ olup, HAD analizine göre $+ \%17,60$ fark ile tahminin doğru yapıldığı Tablo 7.7.'de görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 GBO = & 0,586 \times L_{nd} - 0,848 \times L_{nd}^2 - 24,809 \times \tan(\alpha_2) + 36,573 \times \tan^2(\alpha_2) \\
 & + 0,202 \times L_s - 0,003 \times L_s^2 + 0,448 \times L_m - 0,010 \times L_m^2 - 0,306 \times \tan(\alpha_3) - \\
 & 30,211 \times \tan^2(\alpha_3) - 0,021 \times L_d - 0,0002 \times L_d^2 + 4,582 \quad (R^2 = 0,8356)
 \end{aligned} \quad (7.1)$$

Tablo 7.7. AKM-F2.6 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.1.) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=6$ $D_m=3,48\text{mm}$).

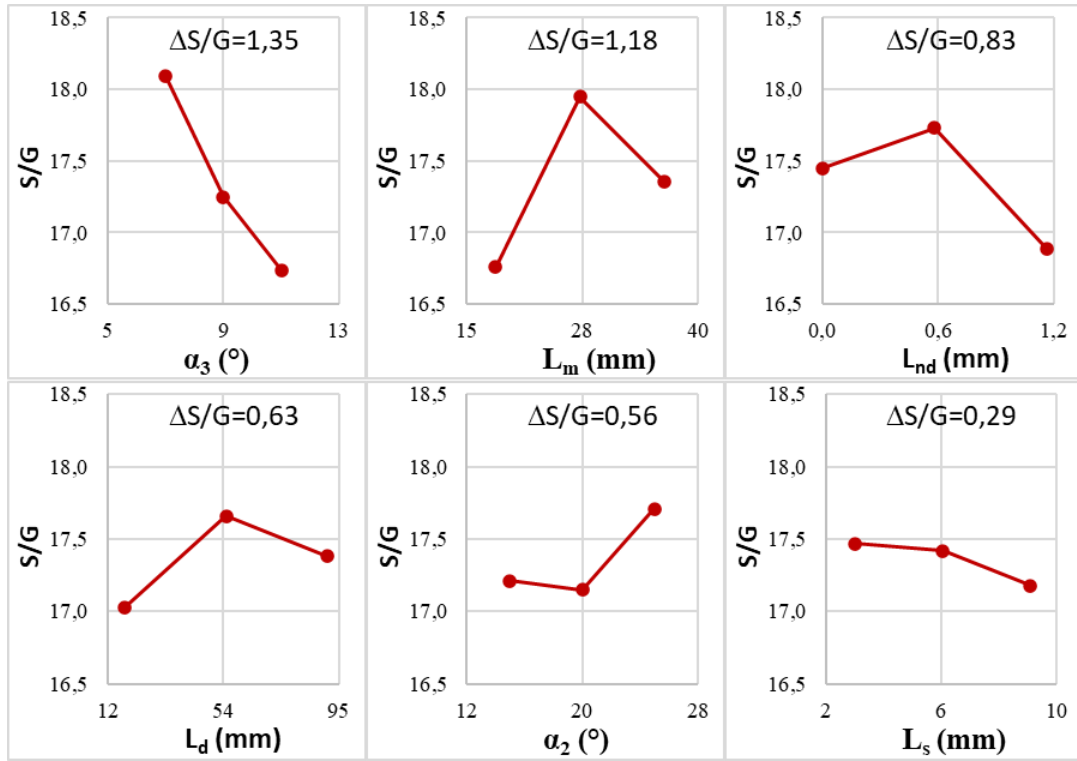
Çözüm Yöntemi	GBO
Sayısal Çözüm (HAD)	5,51
Regresyon Tahmini (Denklem 7.1)	6,35
Taguchi Tahmini	6,48
Karşılaştırılan Çözüm Yöntemi	Fark (%)
Sayısal Çözüm – Denklem 7.1	15,25%
Sayısal Çözüm - Taguchi Tahmini	17,60%

7.2. $D_m=5,22\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları

$D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ için oluşturulan 27 modelin HAD sonuçları Tablo 7.8.'de gösterilmiştir. Mevcut 27 model arasında hedef değere en yakın sonucu $-\%0,69$ farkla AKFM9-1 modeli vermiştir. Bu verilere göre yapılan Taguchi analizlerinden elde edilen en büyük en iyi S/G oranları grafikleri Şekil 7.3.'de, sayısal sonuçlar da Tablo 7.9.'da gösterilmiştir.

Tablo 7.8. $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.

MODEL	L_m (mm)	L_s (mm)	α_2 (°)	L_{nd} (mm)	L_d (mm)	α_3 (°)	Eleman Sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (—)	ΔBKO (%)	ΔGBO (%)
AKFM9-1	18,2	3	15	0	18,2	7	592.889	8,22E-05	5,88E-04	2,39	7,15	-%0,58	-%0,64
AKFM9-2	18,2	3	15	0	54,5	9	748.645	8,22E-05	5,51E-04	2,26	6,70	-%5,96	-%6,88
AKFM9-3	18,2	3	15	0	90,8	11	798.189	8,25E-05	5,73E-04	2,33	6,94	-%3,09	-%3,57
AKFM9-4	18,2	6,1	20	0,58	18,2	7	599.630	8,20E-05	6,05E-04	2,45	7,38	%2,06	%2,47
AKFM9-5	18,2	6,1	20	0,58	54,5	9	757.976	8,22E-05	6,07E-04	2,45	7,38	%2,07	%2,48
AKFM9-6	18,2	6,1	20	0,58	90,8	11	791.938	8,21E-05	5,34E-04	2,20	6,50	-%8,41	-%9,68
AKFM9-7	18,2	9,1	25	1,16	18,2	7	630.651	8,28E-05	5,55E-04	2,26	6,70	-%6,03	-%6,96
AKFM9-8	18,2	9,1	25	1,16	54,5	9	766.824	8,29E-05	5,69E-04	2,30	6,86	-%4,08	-%4,71
AKFM9-9	18,2	9,1	25	1,16	90,8	11	747.937	8,30E-05	5,36E-04	2,19	6,46	-%8,92	-%10,26
AKFM9-10	27,2	3	20	1,16	18,2	9	623.139	8,29E-05	5,90E-04	2,37	7,11	-%1,09	-%1,23
AKFM9-11	27,2	3	20	1,16	54,5	11	784.192	8,28E-05	6,06E-04	2,43	7,32	%1,38	%1,66
AKFM9-12	27,2	3	20	1,16	90,8	7	890.182	8,30E-05	6,47E-04	2,57	7,80	%6,94	%8,28
AKFM9-13	27,2	6,1	25	0	18,2	9	642.562	8,23E-05	6,80E-04	2,69	8,26	%12,27	%14,74
AKFM9-14	27,2	6,1	25	0	54,5	11	788.544	8,26E-05	6,43E-04	2,56	7,78	%6,76	%8,07
AKFM9-15	27,2	6,1	25	0	90,8	7	860.055	8,23E-05	7,52E-04	2,93	9,13	%21,97	%26,82
AKFM9-16	27,2	9,1	15	0,58	18,2	9	672.598	8,23E-05	6,51E-04	2,60	7,91	%8,22	%9,82
AKFM9-17	27,2	9,1	15	0,58	54,5	11	808.168	8,23E-05	5,99E-04	2,42	7,28	%0,88	%1,07
AKFM9-18	27,2	9,1	15	0,58	90,8	7	882.063	8,22E-05	7,15E-04	2,81	8,69	%17,12	%20,74
AKFM9-19	36,3	3	25	0,58	18,2	11	692.095	8,23E-05	6,07E-04	2,45	7,38	%2,11	%2,52
AKFM9-20	36,3	3	25	0,58	54,5	7	721.303	8,21E-05	7,38E-04	2,89	8,99	%20,37	%24,80
AKFM9-21	36,3	3	25	0,58	90,8	9	916.480	8,23E-05	6,65E-04	2,65	8,09	%10,31	%12,35
AKFM9-22	36,3	6,1	15	1,16	18,2	11	714.888	8,31E-05	5,00E-04	2,06	6,02	-%14,33	-%16,36
AKFM9-23	36,3	6,1	15	1,16	54,5	7	742.413	8,29E-05	7,00E-04	2,74	8,45	%14,36	%17,31
AKFM9-24	36,3	6,1	15	1,16	90,8	9	918.986	8,31E-05	5,43E-04	2,21	6,54	-%8,01	-%9,23
AKFM9-25	36,3	9,1	20	0	18,2	11	689.974	8,21E-05	5,20E-04	2,15	6,33	-%10,58	-%12,15
AKFM9-26	36,3	9,1	20	0	54,5	7	744.548	8,19E-05	6,80E-04	2,70	8,29	%12,64	%15,20
AKFM9-27	36,3	9,1	20	0	90,8	9	892.111	8,26E-05	5,71E-04	2,32	6,92	-%3,43	-%3,96



Şekil 7.3. Tablo 7.8.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).

En büyük en iyi S/G oranına göre yapılan değerlendirmede en uygun parametre seviyeleri ve önem dereceleri sırasıyla; difüzör genişleme açısı $\alpha_3=7^\circ$ ($\Delta S/G=1,35$), karışım odası uzunluğu $L_m=27,3\text{mm}$ ($\Delta S/G=1,19$), yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu $L_{nd}=0,58\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,84$), difüzör uzunluğu $L_d=54,5\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,63$), emme odası daralma açısı $\alpha_2=25^\circ$ ($\Delta S/G=0,56$) ve emme odası uzunluğu $L_s=3,0\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,29$)’dir.

Tablo 7.9. Tablo 7.8.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).

Seviye	L_{nd} (mm)	S/G	α_2 (°)	S/G	L_s (mm)	S/G	L_m (mm)	S/G	α_3 (°)	S/G	L_d (mm)	S/G
1	0,00	17,45	15	17,21	3,03	17,47	18,17	16,76	7	18,09	18,17	17,03
2	0,58	17,73	20	17,15	6,06	17,42	27,25	17,95	9	17,25	54,50	17,66
3	1,16	16,89	25	17,71	9,08	17,18	36,33	17,36	11	16,74	90,83	17,38

Parametrelerin etki derecelendirmesini gösteren ANOM sonuçları Tablo 7.10.’da verilmiş olup, Tablo 7.8’deki HAD analiz sonuçlarından regresyon analizi ile elde edilen GBO denklemi ise Denklem 7.2’de ve parametrelerin etki derecelerini (%) gösteren ANOVA analiz sonuçları da Tablo 7.11.’de verilmiştir.

Tablo 7.10. Tablo 7.8.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).

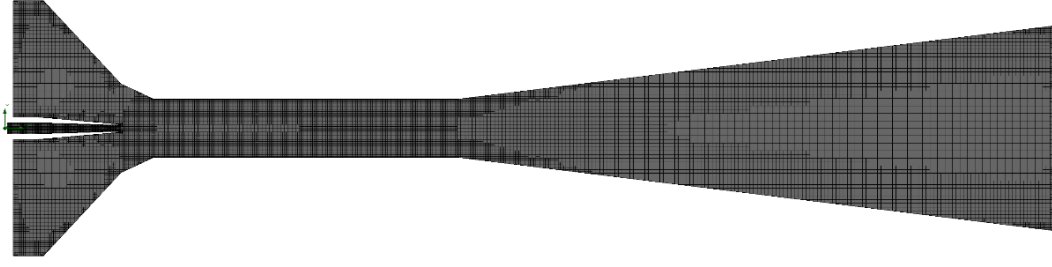
Seviye	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
1	17,45	17,21	17,47	16,76	18,09	17,03
2	17,73	17,15	17,42	17,95	17,25	17,66
3	16,89	17,71	17,18	17,36	16,74	17,38
Δ (mak - min)	0,84	0,56	0,29	1,19	1,35	0,63
Sıralama (Rank)	3	5	6	2	1	4

Tablo 7.10.’daki ANOM ve Tablo 7.11.’deki ANOVA sonuçlarına göre ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin önem sıralaması ve etki dereceleri; difüzör genişleme açısı $\alpha_3=35,01\%$, karışım odası uzunluğu $L_m=25,85\%$, yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu $L_{nd}=12,75\%$, difüzör uzunluğu $L_d=7,13\%$, emme odası daralma açısı $\alpha_2=7,65\%$ ve emme odası uzunluğu $L_s=1,67\%$ şeklindedir.

Tablo 7.11. Tablo 7.8.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=9$ ve $D_m=5,22\text{mm}$).

Faktör	Serbestlik Derecesi	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Etki	Sıralama
Regresyon	12	16,3946	1,366215	10,56	0,0000		
L_m	2	4,7054	2,3527	18,19	0	25,85%	2
L_s	2	0,3047	0,1523	1,18	0,337	1,67%	6
α_2	2	1,3929	0,6965	5,39	0,018	7,65%	4
L_{nd}	2	2,321	1,1605	8,97	0,003	12,75%	3
L_d	2	1,2979	0,6489	5,02	0,023	7,13%	5
α_3	2	6,3728	3,1864	24,64	0	35,01%	1
Hata	14	1,8106	0,1293			9,95%	
Toplam	26	18,2051				100,00%	

Taguchi S/G oranları, ANOVA analizi sonuçları ve Regresyon analizi sonuçları dikkate alınarak; en uygun akış kanalı parametre seviyeleriyle tasarlanan ejektörün (AKM-F2.9) ağ yapısı, Şekil 7.4.’de, bu ejektör modeliyle yapılan HAD analizinin sonuçları da Tablo 7.12.’de verilmiştir. AKM-F2.9 modeliyle elde edilen GBO=8,53 KOYHnde istenen değerden (7,2) $\sim +18,5\%$ daha yüksektir.



Şekil 7.4. AKM-F2.9 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=5,22\text{mm}$).

Tablo 7.12. AKM-F2.9 ejektör modelinin HAD sonuçları ($D_m=5,22\text{mm}$).

MODEL	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (---)
AKM-FINAL	0,58	25	3,0	27,3	7	54,5	731.494	8,228E-05	7,020E-04	2,77	8,53

Regresyon denkleminde $D_m=5,22\text{mm}$; $L_{nd}=0,58\text{mm}$; $\alpha_2=25^\circ$; $L_s=3,0\text{mm}$; $L_m=27,3\text{mm}$; $\alpha_3=7$ ve $L_d=54,5\text{mm}$ için $GBO=9,52$ olmaktadır. Buna göre HAD çözümü ile karşılaştırmak üzere HAD analiz sonuçlarından regresyon analiziyle geliştirilen Denklem 7.2'ye göre %11,61 fark ile tahminin doğru yapıldığı görülmektedir. Taguchi yönteminin tahmini ise $GBO=9,52$ olup HAD analizine göre %11,61 fark ile tahminin doğru yapıldığı Tablo 7.13.'de görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 GBO = & 1,209 \times L_{nd} - 1,393 \times L_{nd}^2 - 19,209 \times \tan(\alpha_2) + 29,189 \times \tan^2(\alpha_2) \\
 & + 0,106 \times L_s - 0,012 \times L_s^2 + 0,525 \times L_m - 0,009 \times L_m^2 - 59,355 \times \tan(\alpha_3) \quad (7.2) \\
 & + 135,457 \times \tan^2(\alpha_3) + 0,035 \times L_d - 0,0003 \times L_d^2 + 8,293 \quad (R^2 = 0,9005)
 \end{aligned}$$

Tablo 7.13. AKM-F2.9 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.2) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=9$ $D_m=5,22\text{mm}$).

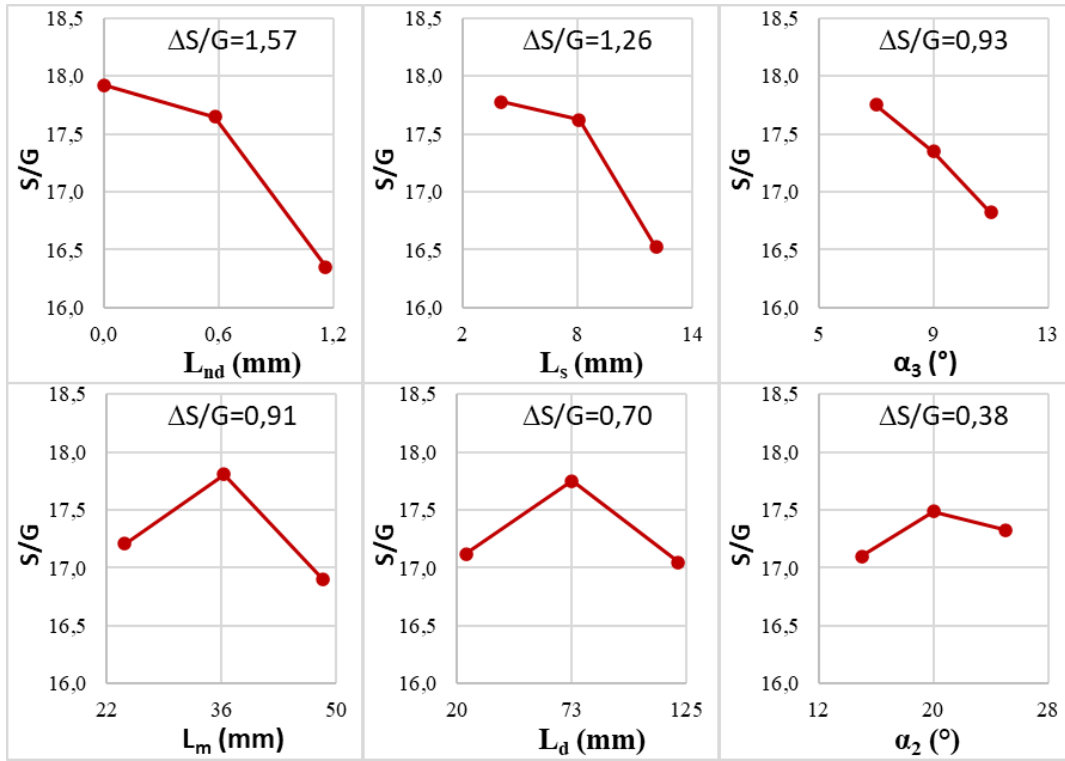
Çözüm Yöntemi	GBO
Sayısal Çözüm (HAD)	8,53
Regresyon Tahmini (Denklem 7.2)	9,52
Taguchi Tahmini	9,52
Karşılaştırılan Çözüm Yöntemi	Fark (%)
Sayısal Çözüm – Denklem 7.2	11,61%
Sayısal Çözüm - Taguchi Tahmini	11,61%

7.3. $D_m=6,96\text{mm}$ İçin HAD, Taguchi, ANOM ve ANOVA Sonuçları

$D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ için oluşturulan 27 modelin HAD sonuçları Tablo 7.14.'de gösterilmiştir. Mevcut 27 model arasında hedef değere en yakın sonucu $-\%0,69$ farkla AKFM12-3 modeli vermiştir. Bu verilere göre yapılan Taguchi analizlerinden elde edilen en büyük en iyi S/G oranları grafikleri Şekil 7.5.'de, sayısal sonuçlar da Tablo 7.15.'de gösterilmiştir.

Tablo 7.14. $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ 'ye göre tasarlanan ejektör modelleri ve HAD sonuçları.

MODEL	L_m (mm)	L_s (mm)	α_2 (°)	L_{nd} (mm)	L_d (mm)	α_3 (°)	Eleman Sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (—)	ΔBKO (%)	ΔGBO (%)
AKFM12-1	24,2	4	15	0	24,2	7	623.013	8,22E-05	7,01E-04	2,77	8,52	%15,22	%18,37
AKFM12-2	24,2	4	15	0	72,7	9	801.676	8,24E-05	6,97E-04	2,75	8,46	14,55%	17,54%
AKFM12-3	24,2	4	15	0	121,1	11	805.622	8,23E-05	5,88E-04	2,39	7,15	-0,61%	-0,68%
AKFM12-4	24,2	8,1	20	0,58	24,2	7	673.206	8,22E-05	6,84E-04	2,71	8,32	12,89%	15,51%
AKFM12-5	24,2	8,1	20	0,58	72,7	9	798.764	8,22E-05	6,90E-04	2,73	8,39	13,70%	16,50%
AKFM12-6	24,2	8,1	20	0,58	121,1	11	779.987	8,22E-05	6,01E-04	2,43	7,31	1,22%	1,48%
AKFM12-7	24,2	12,1	25	1,16	24,2	7	748.017	8,30E-05	4,31E-04	1,80	5,19	-24,84%	-27,90%
AKFM12-8	24,2	12,1	25	1,16	72,7	9	724.683	8,29E-05	5,62E-04	2,28	6,78	-5,05%	-5,84%
AKFM12-9	24,2	12,1	25	1,16	121,1	11	713.356	8,32E-05	4,97E-04	2,04	5,97	-14,97%	-17,08%
AKFM12-10	36,3	4	20	1,16	24,2	9	721.573	8,28E-05	6,30E-04	2,51	7,61	4,76%	5,67%
AKFM12-11	36,3	4	20	1,16	72,7	11	748.363	8,31E-05	5,81E-04	2,34	7,00	-2,45%	-2,82%
AKFM12-12	36,3	4	20	1,16	121,1	7	844.291	8,30E-05	6,59E-04	2,61	7,94	8,56%	10,24%
AKFM12-13	36,3	8,1	25	0	24,2	9	722.513	8,19E-05	7,04E-04	2,78	8,60	16,03%	19,38%
AKFM12-14	36,3	8,1	25	0	72,7	11	713.344	8,21E-05	7,03E-04	2,78	8,56	15,66%	18,91%
AKFM12-15	36,3	8,1	25	0	121,1	7	801.271	8,23E-05	7,30E-04	2,86	8,87	19,09%	23,20%
AKFM12-16	36,3	12,1	15	0,58	24,2	9	791.647	8,22E-05	5,97E-04	2,42	7,26	0,73%	0,89%
AKFM12-17	36,3	12,1	15	0,58	72,7	11	734.149	8,23E-05	5,62E-04	2,29	6,83	-4,47%	-5,17%
AKFM12-18	36,3	12,1	15	0,58	121,1	7	824.723	8,22E-05	6,23E-04	2,51	7,58	4,42%	5,26%
AKFM12-19	48,4	4	25	0,58	24,2	11	758.480	8,22E-05	6,11E-04	2,46	7,42	2,62%	3,12%
AKFM12-20	48,4	4	25	0,58	72,7	7	838.942	8,21E-05	7,21E-04	2,84	8,78	18,13%	21,99%
AKFM12-21	48,4	4	25	0,58	121,1	9	915.841	8,22E-05	5,79E-04	2,36	7,05	-1,87%	-2,14%
AKFM12-22	48,4	8,1	15	1,16	24,2	11	800.886	8,29E-05	4,97E-04	2,05	5,99	-14,73%	-16,80%
AKFM12-23	48,4	8,1	15	1,16	72,7	7	868.159	8,28E-05	6,17E-04	2,47	7,45	2,92%	3,48%
AKFM12-24	48,4	8,1	15	1,16	121,1	9	929.994	8,33E-05	4,77E-04	1,97	5,73	-17,95%	-20,38%
AKFM12-25	48,4	12,1	20	0	24,2	11	828.275	8,20E-05	5,35E-04	2,20	6,52	-8,17%	-9,42%
AKFM12-26	48,4	12,1	20	0	72,7	7	866.140	8,19E-05	6,18E-04	2,50	7,54	3,98%	4,74%
AKFM12-27	48,4	12,1	20	0	121,1	9	867.356	8,31E-05	5,79E-04	2,33	6,97	-2,75%	-3,17%



Şekil 7.5. Tablo 7.14.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranı garfikleri ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).

En büyük en iyi S/G oranına göre yapılan değerlendirmede en uygun parametre seviyeleri ve önem dereceleri sırasıyla; yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu $L_{nd}=0,00\text{mm}$ ($\Delta S/G=1,57$), emme odası uzunluğu $L_s=4,0\text{mm}$ ($\Delta S/G=1,26$), difüzör genişleme açısı $\alpha_3=7^\circ$ ($\Delta S/G=0,93$), karışım odası uzunluğu $L_m=36,3\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,91$), difüzör uzunluğu $L_d=72,7\text{mm}$ ($\Delta S/G=0,70$) ve emme odası daralma açısı $\alpha_2=20^\circ$ ($\Delta S/G=0,39$)’dir.

Tablo 7.15. Tablo 7.14.’deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).

Seviye	L_{nd} (mm)	S/G	α_2 (°)	S/G	L_s (mm)	S/G	L_m (mm)	S/G	α_3 (°)	S/G	L_d (mm)	S/G
1	0,00	17,92	15	17,10	4,04	17,78	24,22	17,21	7	17,75	24,22	17,12
2	0,58	17,65	20	17,49	8,07	17,62	36,33	17,81	9	17,35	72,66	17,75
3	1,16	16,35	25	17,33	12,11	16,52	48,44	16,90	11	16,82	121,10	17,05

Parametrelerin etki derecelendirmesini gösteren ANOM sonuçları Tablo 7.16.'da verilmiş olup, Regresyon denklemi ise Denklem 7.3'de ve parametrelerin yüzde etki derecelerini gösteren ANOVA analiz sonuçları da Tablo 7.17.'de verilmiştir.

Tablo 7.16. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametre seviyelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOM sonuçları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).

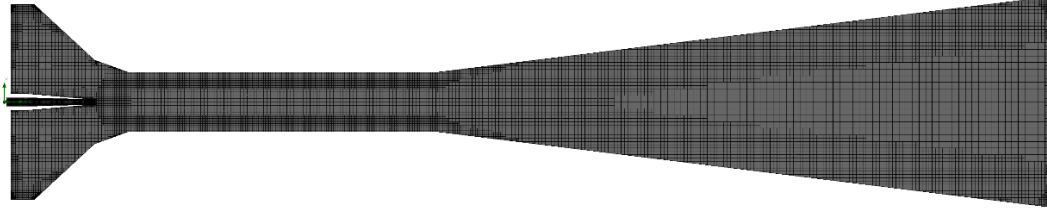
Seviye	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)
1	17,92	17,1	17,78	17,21	17,75	17,12
2	17,65	17,49	17,62	17,81	17,35	17,75
3	16,35	17,33	16,52	16,9	16,82	17,05
Δ (mak - min)	1,57	0,39	1,26	0,91	0,93	0,7
Sıralama (Rank)	1	6	2	4	3	5

Tablo 7.16.'daki ANOM ve Tablo 7.17.'deki ANOVA sonuçlarına göre ejektör akış kanalı geometrik parametrelerinin önem sıralaması ve etki dereceleri; yakınsak-ıraksak lülenin ıraksak bölümünün eksenel uzunluğu $L_{nd}=\%33,02$, emme odası uzunluğu $L_s=\%23,54$, difüzör genişleme açısı $\alpha_3=\%12,26$, karışım odası uzunluğu $L_m=\%10,30$, difüzör uzunluğu $L_d=\%6,93$ ve emme odası daralma açısı $\alpha_2=\%1,76$ şeklindedir.

Tablo 7.17. Tablo 7.14.'deki GBO sonuçlarına göre ejektör akış kanalı parametrelerinin “en büyük en iyi” S/G oranlarına göre ANOVA sonuçları ($D_m/D_t=12$ ve $D_m=6,96\text{mm}$).

Faktör	Serbestlik Derecesi	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Etki	Sıralama
Regresyon	12	22,1097	1,842473	8,40	0,0002		
L_m	2	2,5947	1,2974	5,92	0,014	10,30%	4
L_s	2	5,9279	2,964	13,52	0,001	23,54%	2
α_2	2	0,4428	0,2214	1,01	0,389	1,76%	5
L_{nd}	2	8,3135	4,1567	18,96	0	33,02%	1
L_d	2	1,7442	0,8721	3,98	0,043	6,93%	4
α_3	2	3,0865	1,5432	7,04	0,008	12,26%	3
Hata	14	3,0701	0,2193			12,19%	
Toplam	26	25,1798				100,00%	

Taguchi S/G oranları, ANOVA analizi sonuçları ve Regresyon analizi sonuçları dikkate alınarak; en uygun akış kanalı parametre seviyeleriyle tasarlanan ejektörün (AKM-F2.12) ağ yapısı, Şekil 7.6.'da, bu ejektör modeliyle yapılan HAD analizinin sonuçları da Tablo 7.18.'de verilmiştir. AKM-F2.12 modeliyle elde edilen GBO=10,04 KOYHnde istenen değerden (7,2) $\sim +\%39,4$ daha yüksektir.



Şekil 7.6. AKM-F2.12 ejektör modelinin ağ yapısı ($D_m=6,96\text{mm}$).

Tablo 7.18. AKM-F2.12 ejektör modelinin HAD sonuçları ($D_m=6,96\text{mm}$).

MODEL	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s)	BKO (---)	GBO (---)
AKM-FINAL	0,00	20	4,0	36,3	7	72,7	843.365	8,253E-05	8,287E-04	3,16	10,04

Regresyon denkleminde $D_m=6,96\text{mm}$; $L_{nd}=0,00\text{mm}$; $\alpha_2=20^\circ$; $L_s=4,0\text{mm}$; $L_m=36,3\text{mm}$; $\alpha_3=7$ ve $L_d=72,7\text{mm}$ için $GBO=9,88$ olmaktadır. Buna göre HAD çözümü ile karşılaştırmak üzere taguchi sonuçlarından alınan regresyon denklemine göre %1,59 fark ile tahminin doğru yapıldığı görülmektedir. Taguchi yönteminin tahmini ise $GBO=9,55$ olup HAD analizine göre %4,88 fark ile tahminin doğru yapıldığı Tablo 7.19.'da görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 GBO = & 0,239 \times L_{nd} - 1,159 \times L_{nd}^2 + 13,889 \times \tan(\alpha_2) - 17,205 \times \tan^2(\alpha_2) \\
 & + 0,304 \times L_s - 0,027 \times L_s^2 + 0,289 \times L_m - 0,004 \times L_m^2 - 1,757 \times \tan(\alpha_3) - \\
 & 30,871 \times \tan^2(\alpha_3) + 0,032 \times L_d - 0,0002 \times L_d^2 + 0,513 \quad (R^2 = 0,8781)
 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Tablo 7.19. AKM-F2.12 modelinin GBO için HAD analizi, regresyon denklemi (Denklem 7.3.) ve Taguchi tahmini sonuçlarının karşılaştırılması ($D_m/D_t=12$ $D_m=6,96\text{mm}$).

Çözüm Yöntemi	GBO
Sayısal Çözüm (HAD)	10,04
Regresyon Tahmini (Denklem 7.3)	9,88
Taguchi Tahmini	9,55
Karşılaştırılan Çözüm Yöntemi	Fark (%)
Sayısal Çözüm – Denklem 7.3	1,59%
Sayısal Çözüm - Taguchi Tahmini	4,88%

7.4. En Uygun Akış Kanalı Geometrilerinin Karşılaştırılması

Karışım odası çapı öncelikle $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$, $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ ve $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ olacak şekilde, her bir karışım odası çapı için 27 adet ve toplamda 81 adet HAD analizi yapılmıştır.

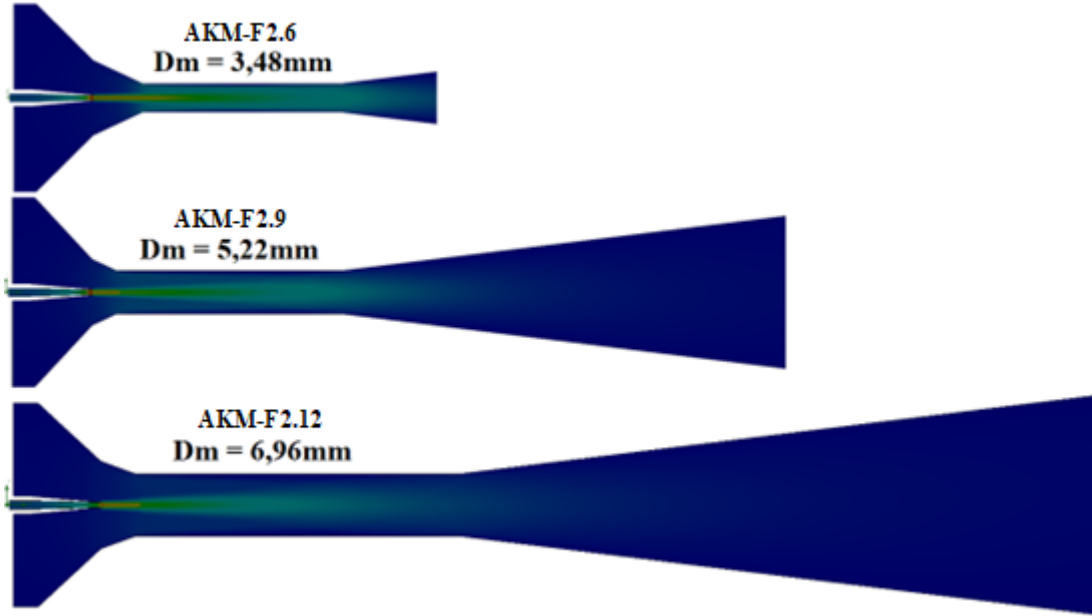
Üç farklı karışım odası çapı için üç farklı en uygun parametre seviyeli ejektör modeli türetilmiş ve bu modellerle de HAD analizleri yapılmıştır. HAD analizlerinin sonuçları Tablo 7.6., Tablo 7.12. ve Tablo 7.18.'de verilmiştir. Her bir karışım karışım odası çapı için en uygun parametre seviyeli ejektör modellerinin HAD sonuçları Tablo 7.20.'de özetlenmiştir.

Tablo 7.20. $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$, $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ ve $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$ ve GBO na göre belirlenen en uygun parametrelili modeller ve HAD sonuçları.

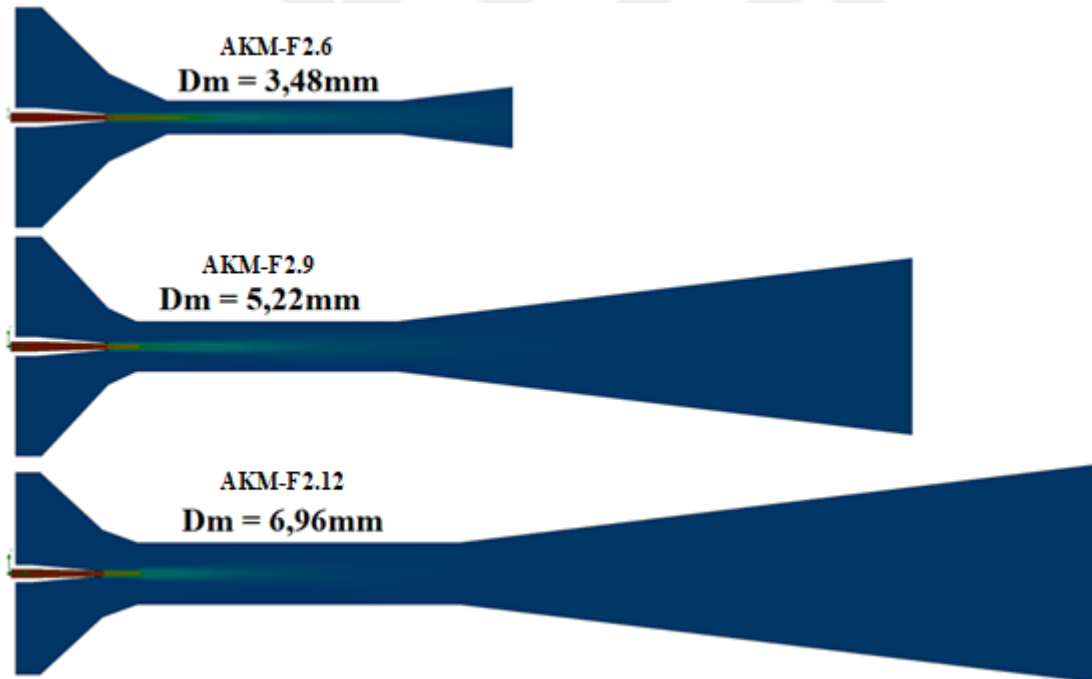
Model	D_m (mm)	L_{nd} (mm)	α_2 (°)	L_s (mm)	L_m (mm)	α_3 (°)	L_d (mm)	Eleman sayısı	$\dot{m}_{p,HAD}$ (kg/s) $\times 10^{-5}$	$\dot{m}_{s,HAD}$ (kg/s) $\times 10^{-4}$	BKO (---)	GBO (---)
AKM-F2.6	3,48	0,58	25	6,1	24,2	7	12,1	695204	8,21	4,52	1,90	5,51
AKM-F2.9	5,22	0,58	25	3	27,3	7	54,5	731494	8,23	7,02	2,77	8,53
AKM-F2.12	6,96	0	20	4	36,3	7	72,7	843365	8,25	8,29	3,16	10,04

Karışım odası çapı $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ olan AKM-F2.9 ejektör modeli ile birincil lüle konumu (NXP), birincil akışkan basıncı ve sıcaklığı için parametrik analizler ile modelin ağ sayısından bağımsızlık analizleri yapılmıştır.

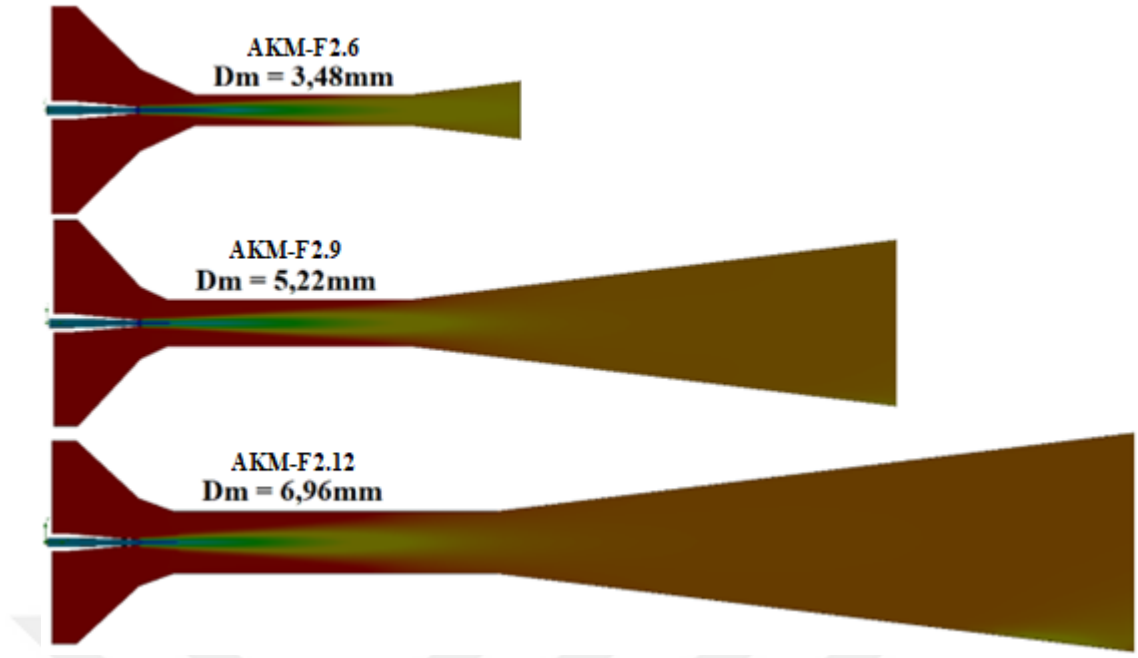
İkinci kademe analizlerden elde edilen 3 adet en uygun akış kanalı geometrili modellerin HAD sonuçlarına göre hazırlanan; hız konturları Şekil 7.7.'de, basınç konturları Şekil 7.8.'de ve sıcaklık konturları ise Şekil 7.9.'da verilmiştir.



Şekil 7.7. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin hız konturları.



Şekil 7.8. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin basınç konturları.



Şekil 7.9. En uygun akış kanalı geometrili ejektörlerin sıcaklık konturları.



8. EN UYGUN GEOMETRİLİ MODELİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İkinci kademe analizlerin sonucunda, karışım odası çapı $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ olan AKM-F2.9 ejektör modelinde GBO'nun hedef değer olan 7,20 ye en yakın sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Öncelikle, çalışmanın ilk aşamasında yapılan ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasının, karışım odası çapı $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ olan AKM-F2.9 modeli için yenilenerek, sayısal modelde kullanılan ağ yapısı parametrelerinin geçerliliği ve HAD sonuçlarının kararlılığı kontrol edilmiştir.

Daha sonra, GBO üzerinde önemli etkisi olduğu bilinen ve işletme sırasında değiştirilebilecek yegane geometrik parametre olan birincil lüle konumu (NXP) için AKM-F2.9 moldeliyle HAD analizleri yapılmıştır. Ayrıca, AKM-F2.9 ejektör modeli ile ejektörün işletilmesi sırasında değiştirilebilecek sınır şartları (işletme parametreleri) olan birincil akışkanın ejektöre giriş basıncı ve giriş sıcaklığı için parametrik analizler yapılmıştır.

8.1. Ağ Yapısı ve Eleman Sayısından Bağımsızlık Kontrolü

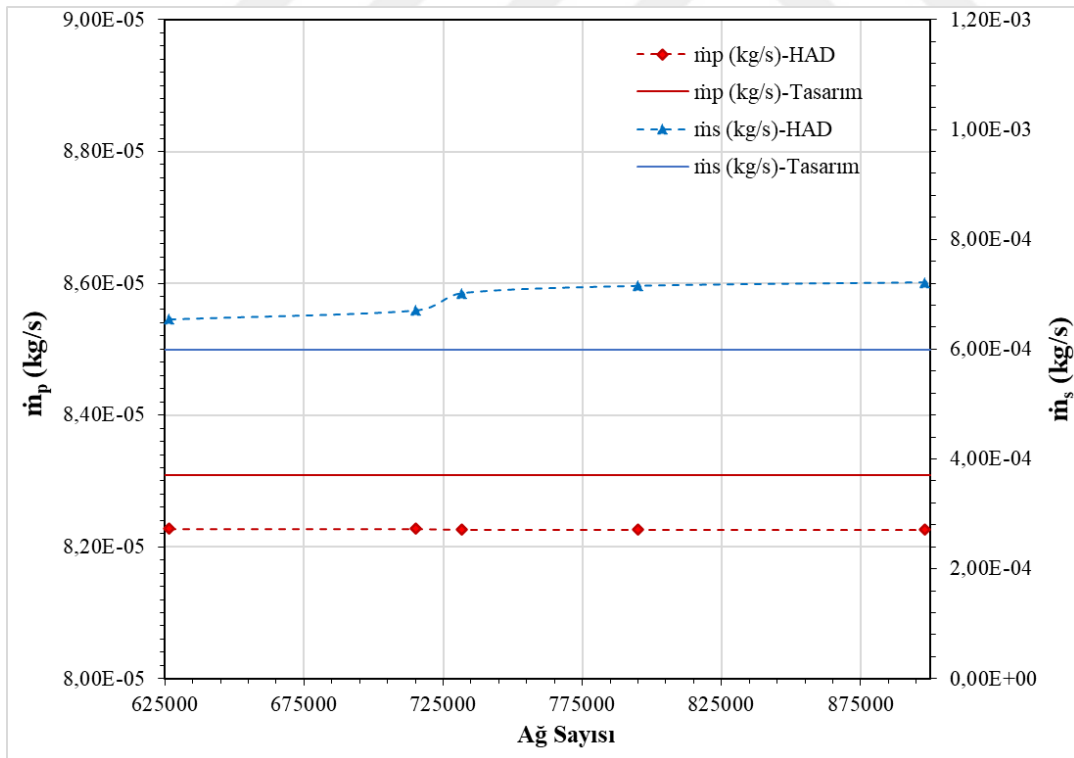
İlk kademe analizlerde yapılan ağ sayısından bağımsızlık çalışmasında kullanılan ejektör modeli (Tablo 3.2. ve Şekil 3.2.) ile ikinci kademe analizlerde elde edilen en uygun geometrili ejektör modeli olan AKM-F2.9 arasındaki boyut farklılıkları, ağ yapısını ve eleman sayısını belirleyen parametrelerin geçerliliğinin kontrolünü gerektirmektedir.

Bu nedenle ağ yapısı ve eleman sayısını belirleyen parametrelerin geçerliliği ve sonuçların tutarlılığı bakımından; ilk kademe analizlerde ağ yapısından ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında seçilen (Tablo 6.1.'deki) MBA-24 numaralı modelin iki altındaki (MBA-20 ve MBA-22) ve iki üstündeki (MBA-25 ve MBA-29) ağ sayılı modellere ait parametreler, en uygun geometrili ejektör modeli seçilen AKM-F2.9 modeline uygulanarak, ağ sayısı ve yapısından bağımsızlık çalışması

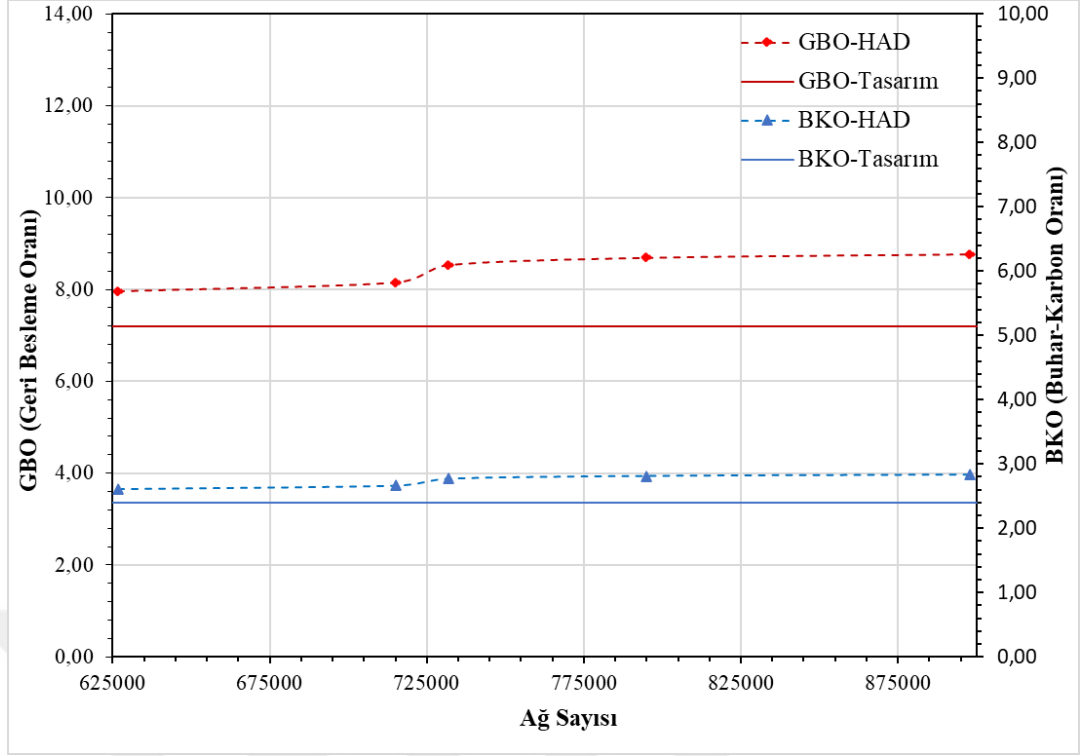
tekrarlanmıştır. Tablo 8.1.'de verilen, ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık kontrol çalışması sonuçları ile Tablo 6.1.'deki sonuçların benzer olduğu görülmüştür. Bu aşamada 5 farklı sayısal model ile yapılan ağ sayısı ve yapısından bağımsızlık çalışmasında, ağ sayısının kütleli debiler üzerindeki etkisi Şekil 8.1.'de görülmekte olup, ağ sayısının GBO ve BKO üzerindeki etkisi de Şekil 8.2.'de görülmektedir.

Tablo 8.1. İkinci kademe analizler sonrasında AKM-F2.9 ejektör modeli ile yapılan ağ sayısı ve yapısından bağımsızlık kontrol çalışması sonuçları.

MODEL	Eleman Sayısı	$\dot{m}_{p,giriş,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,giriş,HAD}$ (kg/s)	GBO _{HAD} (---)	BKO _{HAD} (---)	$\Delta\dot{m}_{p,giriş}$ (%)	$\Delta\dot{m}_{s,giriş}$ (%)	ΔGBO (%)	ΔBKO (%)
MBFA-20	626.591	8,23E-05	6,55E-04	7,96	2,61	-%1,0	%9,4	%10,6	%8,8
MBFA-22	715.049	8,23E-05	6,71E-04	8,16	2,67	-%1,0	%12,1	%13,3	%11,1
MBFA-24	731.827	8,23E-05	7,02E-04	8,54	2,77	-%1,0	%17,3	%18,6	%15,4
MBFA-25	795.025	8,23E-05	7,15E-04	8,70	2,81	-%1,0	%19,5	%20,8	%17,2
MBFA-29	897.978	8,23E-05	7,22E-04	8,77	2,83	-%1,0	%20,6	%21,8	%18,0

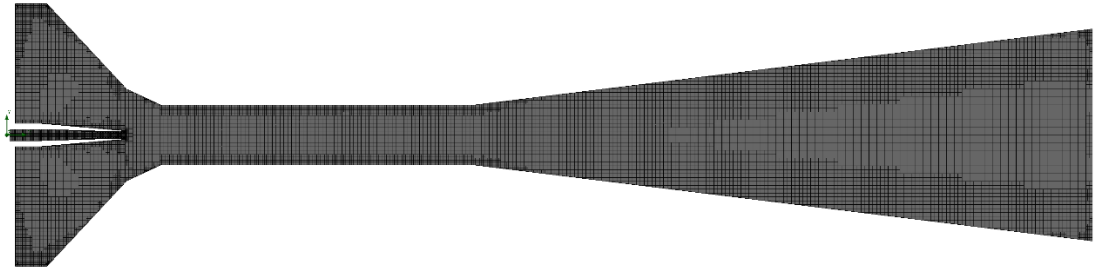


Şekil 8.1. AKM-F2.9 ejektör modelinde kütleli debilerin ağ yapısı eleman sayısı ile değişimi.



Şekil 8.2. AKM-F2.9 ejektör modelinde GBO ve BKO'nun ağ yapısı eleman sayısı ile değişimi.

Bu sonuçlara göre, ikinci kademe analizler sonrasında akış kanalı geometrisinde yapılan değişikliklere rağmen, birinci kademe analizlerde yapılan ağ sayısından ve yapısından bağımsızlık çalışmasının geçerliliğini koruduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla Tablo 6.1.'deki sonuçları verilen ağ sayısı ve yapısından bağımsızlık çalışmasının geçerliliği bir kez daha doğrulanmıştır. Sonuç olarak, birinci kademe analizlerde kullanılan ağ yapısı ve eleman sayısı parametreleri, en uygun geometrili AKM-F2.9 ejektör modeli için de geçerlidir ve ağ yapısı modeli Şekil 8.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 8.3. AKM-F2.9 ejektör modelinin, en uygun ağ yapılı ve eleman sayılı MBA-24 modeline uygulanan ağ yapısı parametreleri ile oluşturulan ağ yapısı.

8.2. En Uygun Geometrilili Modelde NXPnin Etkisi

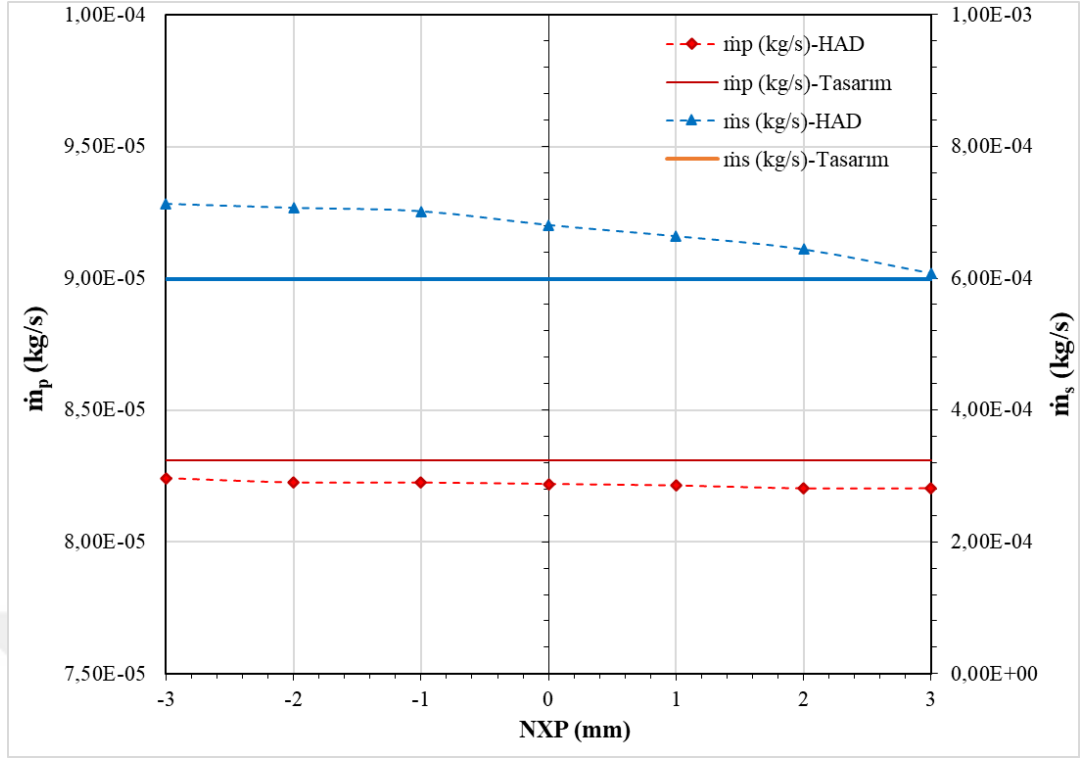
Literatürde verilen bilgilerden, birincil lüle çıkış kesitinin emme odası giriş kesitine göre konumunun GBO üzerinde önemli etkisi olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda NXP, ejektör işletme koşullarına göre değiştirilebilecek yegane geometrik parametredir. NXPnin etkisini gözlemlemek, GBO'nı gerekli seviyeye ayarlamak amacıyla faydalı olacaktır. Bu çalışmada Şekil 3.1.'de verilen NXP tanımına göre, en uygun geometrilili AKM-F2.9 ejektör modeliyle, NXPnin -3mm, -2mm, -1mm, 0mm, +1mm, +2mm ve +3mm konumlarında parametrik HAD analizleri yapılarak, NXPnin ejektör performansına etkisi incelenmiştir.

AKM-F2.9 ejektör modeliyle ($D_m=5,22\text{mm}$), farklı NXP konumlarında (birincil lüle çıkışının 7 farklı konumunda: -3mm, -2mm, -1mm, 0mm, +1mm, +2mm ve +3mm) sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modellerle yapılan HAD analizlerinin sonuçları, Tablo 8.2.'de gösterilmiştir. Ayrıca, NXPnin kütleli debilere etkisi Şekil 8.4.'de ve GBO ve BKOna etkisi de Şekil 8.5.'de gösterilmiştir.

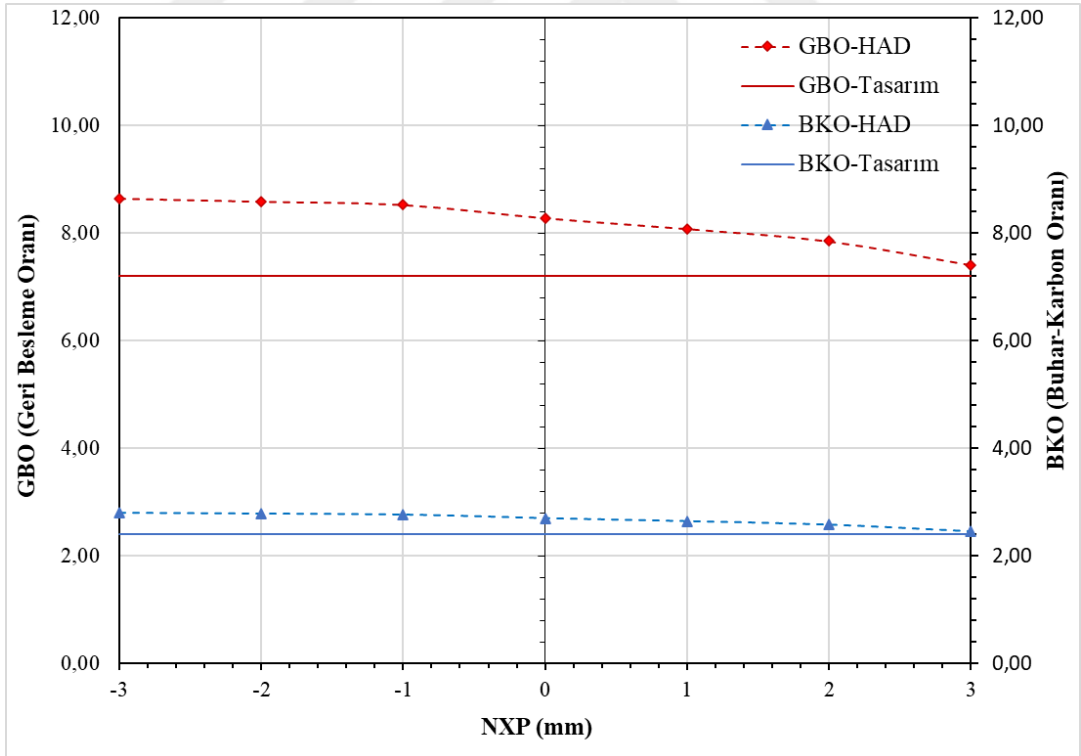
Tablo 8.2.'den görüleceği gibi NXPnin GBO'na etkisi önemlidir. İstenilen GBO elde edilemeyen ejektörlerde, NXP konumu değiştirilerek istenilen sonucun alınabileceği anlaşılmaktadır. Özellikle bu model için $NXP=-3\text{mm}$ 'de, 8,65 olan GBO hedef değerden (7,20) %20,14 daha yüksektir. Ancak $NXP=+3\text{mm}$ 'de, yaklaşık %17,22 düşürülerek $GBO=7,41$ elde edilmiş ve +%2,92 farkla hedef değere (7,20) yaklaşmıştır. Birincil lülenin bu konumunda, birincil ve ikincil akışkan debileri de tasarım değerleriyle sırasıyla -%1,3 ve +%7,6 uyumludur. $NXP=+3\text{mm}$ konumundaki HAD analiz sonuçlarına göre hız konturları Şekil 8.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 8.2. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı NXPlerde yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($T_{p,0}=620\text{K}$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).

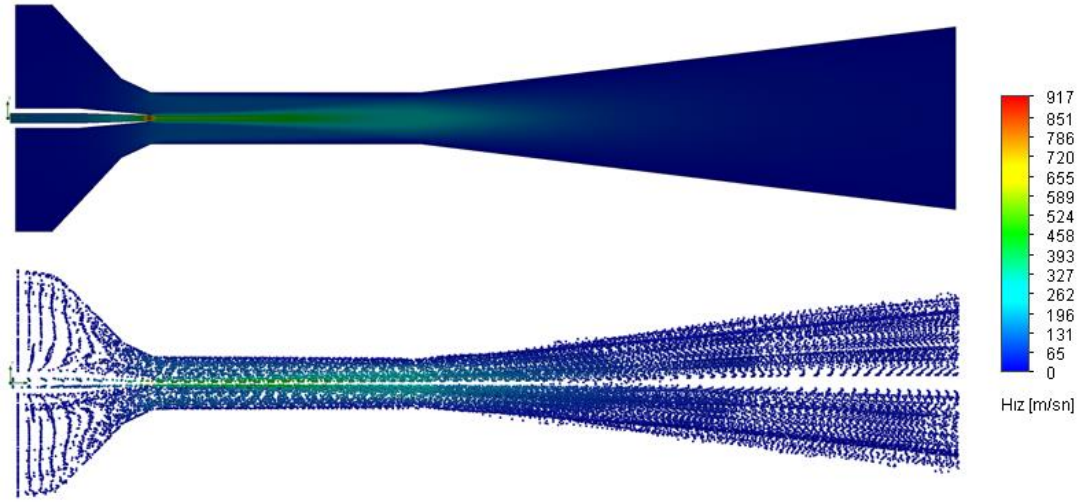
NXP (mm)	Mesh Sayısı	$\dot{m}_{p,giriş,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,giriş,HAD}$ (kg/s)	ω_{HAD} (---)	BKO_{HAD} (---)	$\Delta\dot{m}_{p,giriş}$ (%)	$\Delta\dot{m}_{s,giriş}$ (%)	ΔGBO (%)	ΔBKO (%)
-3	633.608	8,24E-05	7,13E-04	8,65	2,80	-%0,8	%19,1	%20,1	%16,6
-2	634.552	8,22E-05	7,07E-04	8,59	2,78	-%1,0	%18,1	%19,3	%16,0
-1	637.910	8,22E-05	7,02E-04	8,53	2,77	-%1,0	%17,2	%18,5	%15,3
0	645.593	8,22E-05	6,81E-04	8,28	2,70	-%1,1	%13,8	%15,0	%12,5
1	656.295	8,21E-05	6,64E-04	8,08	2,65	-%1,1	%10,9	%12,3	%10,2
2	669.932	8,20E-05	6,44E-04	7,85	2,58	-%1,3	%7,6	%9,0	%7,6
3	684.734	8,20E-05	6,08E-04	7,41	2,46	-%1,3	%1,6	%2,9	%2,4



Şekil 8.4. NXP'nin kütleli debilere etkisi ($T_{p,0}=620K$ ve $p_{p,0}=280kPa$).



Şekil 8.5. NXP'nin GBO'ya ve BKO'ya etkisi ($T_{p,0}=620K$ ve $p_{p,0}=280kPa$).



Şekil 8.6. NXP +3mm konumunda hız konturları/vektörleri ($T_{p,0}=620K$, $p_{p,0}=280kPa$).

8.3. En Uygun Geometrilili Modelde Birincil Akışkan Giriş Basıncının Etkisi

Birincil akışkan giriş basıncının GBO'na etkisini incelemek ve ejektör işletme koşullarının performansa etkisini daha iyi görebilmek amacıyla, farklı birincil akışkan giriş basınçlarında ($p_{p,0}$) HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Karışım odası çapı $D_m=5,22mm$ olan en uygun geometrilili ejektör modeli olan AKM-F2.9 ile 5 farklı birincil akışkan giriş basıncında (200kPa, 250kPa, 300kPa, 350kPa ve 400kPa) parametrik HAD analizleri yapılarak, sonuçlar Tablo 8.3.'de verilmiştir. Birincil akışkan giriş basıncının 200kPa olduğu HAD analizinin basınç konturları Şekil 8.7'de verilmiş olup, birincil akışkan giriş basıncının kütleli debilere etkisi Şekil 8.8.'de, GBO ve BK'na etkisi ise Şekil 8.9.'da gösterilmiştir.

Tablo 8.3.'den görüldüğü gibi ejektöre asıl enerji girişini sağlayan birincil akışkan basıncının 200-400kPa arasındaki değiştirilmesi, birincil akışkan debisini tasarım değerine ($8,31 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$) göre $-30,2\%$ 'den $+43,1\%$ 'e çıkarmıştır. Bu etkiyle de ikincil akışkan debisi de tasarım değerine ($5,99 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$) göre $-33,2\%$ 'den $+67,6\%$ 'ya çıkmıştır.

Tablo 8.3. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı birincil akışkan giriş basınçlarında ($p_{p,0}$) yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($NXP=0$ ve $T_{p,0}=620K$).

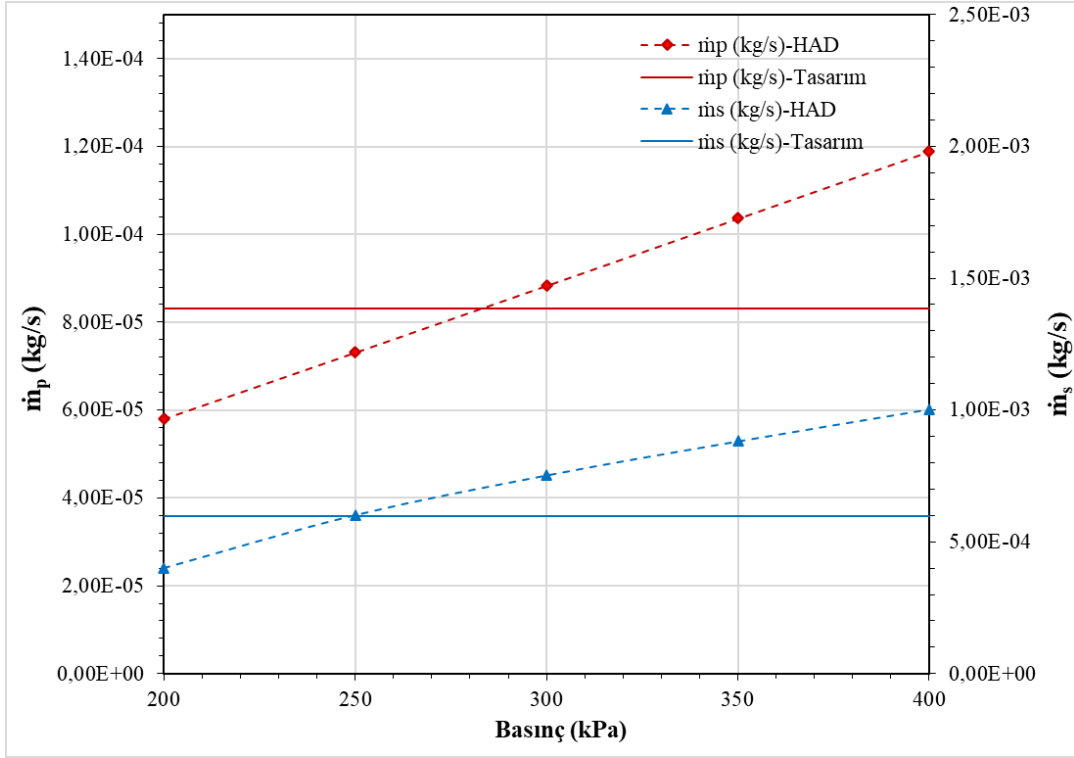
P (kPa)	Mesh Sayısı	$\dot{m}_{p,giriş,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,giriş,HAD}$ (kg/s)	GBO_{HAD} (---)	BKO_{HAD} (---)	$\Delta\dot{m}_{p,giriş}$ (%)	$\Delta\dot{m}_{s,giriş}$ (%)	ΔGBO (%)	ΔBKO (%)
200	731.827	5,80E-05	4,00E-04	6,89	2,31	-%30,	-%33,2	-%4,3	-%3,7
250	731.827	7,31E-05	6,01E-04	8,22	2,68	-%12,0	%0,5	%14,2	%11,8
300	731.827	8,83E-05	7,52E-04	8,51	2,76	%6,3	%25,7	%18,2	%15,1
350	731.827	1,04E-04	8,82E-04	8,51	2,76	%24,7	%47,3	%18,2	%15,1
400	731.827	1,19E-04	1,00E-03	8,44	2,74	%43,1	%67,6	%17,2	%14,3

Bu sonuçlar, birincil akışkan giriş basıncının ikincil akışkan debisine etkisinin, oransal olarak birincil akışkan debisine etkisinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Çalışılan birincil akışkan giriş basıncı aralığında GBO, tasarım değerine (7,2) göre -%4,3'den +%17,2'ye çıkmıştır. Dolayısıyla 200-250kPa aralığında GBO'nun lineer değiştiği kabul edilerek, ~212kPa giriş basıncında hedeflenen GBO'na ulaşılabileceği anlaşılmaktadır.

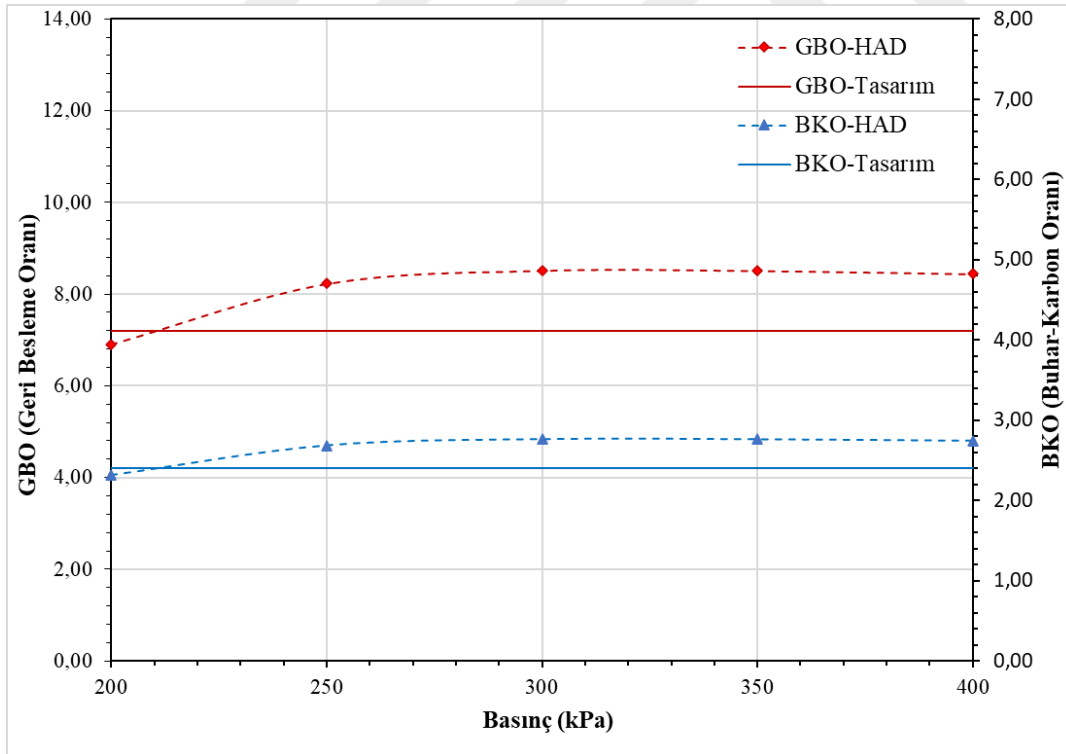
Ayrıca, literatürden alınan tasarım koşulu olan 280kPa birincil akışkan giriş basıncı civarında (250-400kPa), GBO'nun %4 farkla sabit kalması, GBO dikkate alınarak el edilen en uygun ana akış kanalı geometrili AKM-F2.9 ejektör modelinin uygunluğunu bir kez daha göstermektedir.



Şekil 8.7. $p_{p,0}=200kPa$ giriş basıncında basınç konturları ($NXP=0$, $T_{p,0}=620K$).



Şekil 8.8. Birincil akışkan giriş basıncının kütesel debilere etkisi (NXP=0 ve $T_{p,0}=620K$).



Şekil 8.9. Birincil akışkan giriş basıncının GBO'ya ve BKO'ya etkisi (NXP=0 ve $T_{p,0}=620K$).

8.4. En Uygun Geometrilik Modelde Birincil Akışkan Giriş Sıcaklığının Etkisi

Birincil akışkan giriş sıcaklığının GBO'na etkisini incelemek ve ejektör işletme koşullarının performansa etkisini daha iyi görebilmek amacıyla farklı birincil akışkan giriş sıcaklıklarında ($T_{p,0}$) HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

En uygun geometrilik ejektör modeli olan AKM-F2.9 ile 6 farklı birincil akışkan giriş sıcaklığında (450K, 500K, 550K, 600K, 650K ve 700K) HAD analizleri yapılarak, sonuçlar Tablo 8.4.'de verilmiştir. Ayrıca birincil akışkan giriş sıcaklığının kütleli debilere etkisi Şekil 8.10.'da, GBO ve BKO'na etkisi ise Şekil 8.11.'de gösterilmiştir. 500K birincil akışkan giriş sıcaklığında HAD analizi sıcaklık konturları Şekil 8.12.'de gösterilmiştir.

Tablo 8.4.'den görüldüğü gibi ejektöre asıl enerji girişini sağlayan birincil akışkan giriş sıcaklığının 450-700K arasında değiştirilmesi, beklendiği gibi birincil akışkan debisini tasarım değerine ($8,31 \times 10^{-5}$ kg/s) göre +%19,6'dan -%7,9'a düşürmüştür. Birincil akışkan debisindeki düşüşe rağmen, ikincil akışkan debisi tasarım değerine göre ($5,99 \times 10^{-4}$ kg/s) +%14,63,2'dan +%17,4'e çıkarak az da olsa artmıştır.

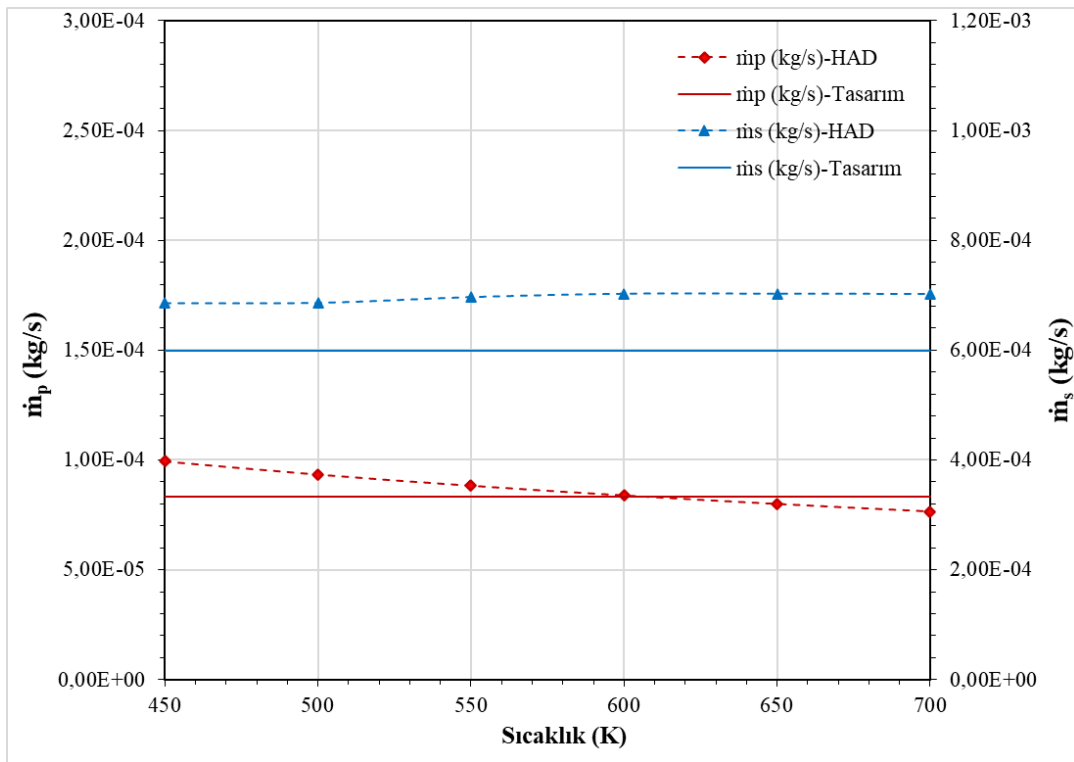
Tablo 8.4. AKM-F2.9 ejektör modeliyle farklı birincil akışkan giriş sıcaklıklarında ($T_{p,0}$) yapılan HAD analizlerinin sonuçları ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280$ kPa).

T (K)	Mesh Sayısı	$\dot{m}_{p,giriş,HAD}$ (kg/s)	$\dot{m}_{s,giriş,HAD}$ (kg/s)	GBO _{HAD} (---)	BKO _{HAD} (---)	$\Delta \dot{m}_{p,giriş}$ (%)	$\Delta \dot{m}_{s,giriş}$ (%)	ΔGBO (%)	ΔBKO (%)
450	731.827	9,94E-05	6,86E-04	6,90	2,31	%19,6	%14,6	-%4,1	-%3,6
500	731.827	9,34E-05	6,86E-04	7,35	2,44	%12,4	%14,7	%2,1	%1,7
550	731.827	8,83E-05	6,97E-04	7,89	2,59	%6,3	%16,4	%9,6	%8,0
600	731.827	8,39E-05	7,03E-04	8,38	2,73	%0,9	%17,4	%16,3	%13,6
650	731.827	8,00E-05	7,02E-04	8,78	2,83	-%3,7	%17,4	%22,0	%18,1
700	731.827	7,65E-05	7,02E-04	9,17	2,94	-%7,9	%17,3	%27,4	%22,4

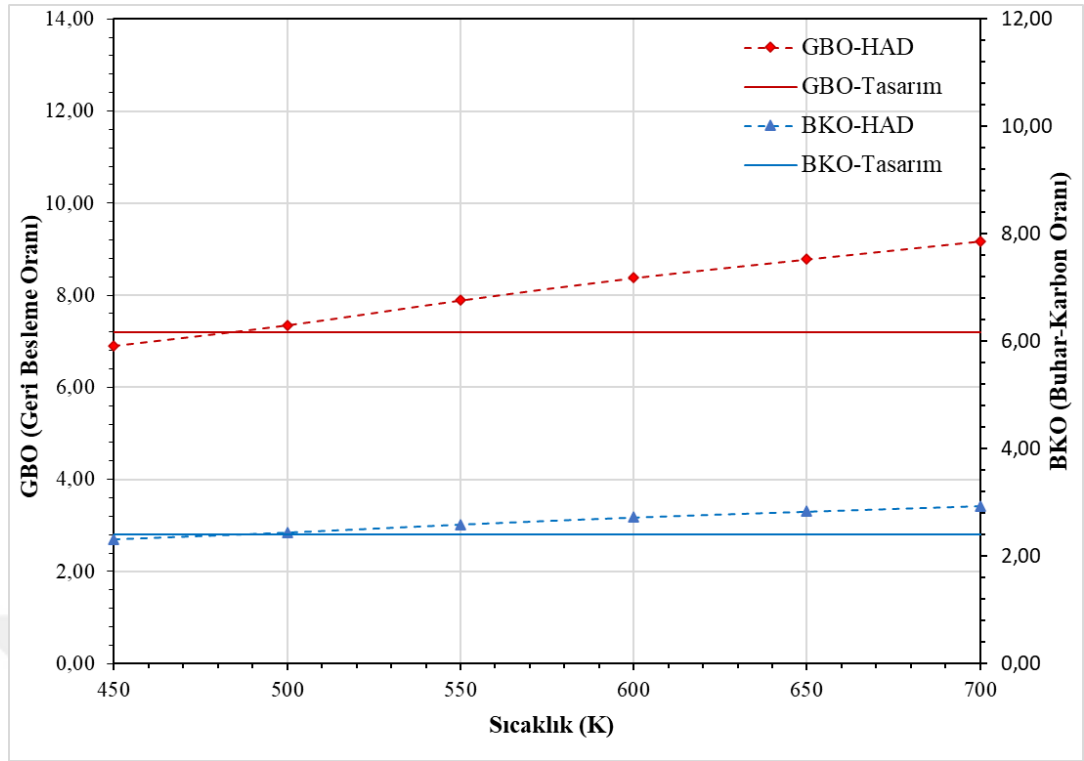
Bu sonuçlar, birincil akışkan giriş basıncının tersine, birincil akışkan giriş sıcaklığındaki artışın, birincil akışkan debisini düşürürken ikincil akışkan debisini çok fazla değiştirmedikçe göstermektedir. Dolayısıyla çalışılan birincil akışkan giriş sıcaklıkları aralığında GBO, tasarım değerine (7,2) göre -%4,1'den +%27,4'ye

çıkmıştır. 450-500K aralığında GBO'nun lineer değiştiği kabul edilirse, hedeflenen GBO'na ~483K giriş sıcaklığında ulaşılabacaktır.

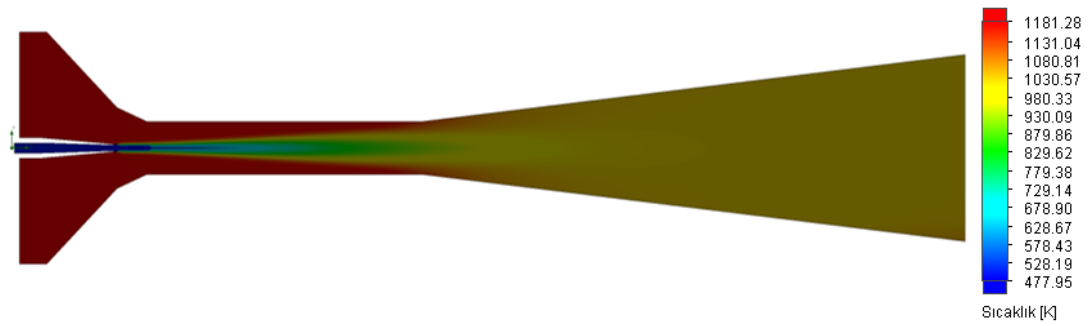
Ayrıca, 450-700K sıcaklık aralığında GBO'nun %31,5 artması, birincil akışkan giriş sıcaklığının GBO'na etkisinin, giriş basınca göre çok daha fazla olduğunu göstermektedir. En uygun geometrili ejektör modeli AKM-F2.9 ile tasarım değeri olan 620K'nin altındaki birincil akışkan giriş sıcaklıklarında, hem birincil akışkan debisi hedef değeri ($8,31 \times 10^{-5}$ kg/s) hem de GBO hedef değeri (7,2) sağlanmaktadır. Bu da en uygun geometrili ana akış kanalı tasarımının başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.10. Birincil akışkan giriş sıcaklığının kütleli debilere etkisi (NXP=0 ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).



Şekil 8.11. Birincil akışkan giriş sıcaklığının GBO'na ve BKO'na etkisi ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).



Şekil 8.12. $T_{p,0}=500\text{K}$ giriş sıcaklığında sıcaklık konturları ($NXP=0$ ve $p_{p,0}=280\text{kPa}$).



9. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sunulan çalışmada, tasarım ve işletme koşulları literatürden alınan (Tablo 3.1.) KOYHnde egzoz (anot atık) gazlarının geri beslenmesinde kullanılmak üzere, yine literatüre uygun hesaplanmış ve seçilmiş geometrik parametrelerle (Tablo 3.2. ve Tablo 3.4) sıcak gaz ejektörünün ana akış kanalı geometrisi, HAD analizleri ve Taguchi yöntemiyle belirlenmiştir. HAD analizlerinde bilgisayar kapasitesi ve hesaplama zamanı avantajı nedeniyle, SolidWorks Flow Simulation yazılımı kullanılmıştır.

Öncelikle, 29 farklı ağ yapısı parametre kombinasyonu ile oluşturulan ve ağ sayıları ~14.000 ila 1.250.000 arasında değişen sayısal modellerle, ejektör sayısal modelinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Yapılan HAD analizlerinin sonuçlarına göre (Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.), ~720.000 eleman sayılı MBA-24 modelinin ağ yapısı parametreleriyle elde edilen sayısal sonuçların, ağ sayısından bağımsız ve kararlı olduğu elde edilmiştir (Tablo 6.1., Şekil 6.1 ve Şekil 6.2.). Çalışma kapsamında yapılan bütün HAD analizlerinde kullanılan ejektör sayısal modelleri, MBA-24 modelinin ağ yapısı parametreleri uygulanarak oluşturulmuştur.

Genel olarak buhar ejektörleri ve özel olarak KOYH ejektörleri ile ilgili literatür incelenerek, birincil lüle, emme odası, karışım odası ve difüzörden oluşan ejektörün tasarımında etkili 16 bağımsız geometrik parametre (Şekil 3.1.) ile akışkanların ejektöre giriş ve çıkış kesitlerinde tanımlı altı (basınç ve sıcaklık) sınır şartı belirlenmiştir. Ayrıca, KOYHnin gücü, başka bir ifadeyle, birincil ve ikincil akışkanın kütleli debileri ve kütleli oranları da ejektörün geometrik tasarımında etkilidir.

En uygun ejektör ana akış kanalı geometrisi belirlenirken, akışkanların ejektöre giriş ve çıkış kesitlerindeki basınç ve sıcaklık sınır şartları ($T_{p,0}$, $p_{p,0}$, $T_{s,0}$, $p_{s,0}$, T_5 ve p_5) ile akışkanların kütleli oranları ($\dot{m}_p$ -CH₄; $\dot{m}_s$ -CO, CO₂, H₂, H₂O) sabit kabul edilmiştir.

Ana akış kanalı tasarımını şekillendiren sekiz bağımsız geometrik parametre ($\varnothing D$, L_{s2} , α_2 , L_{s1} , D_m , L_m , α_3 ve L_d) ve ejektöre enerji sağlayan birincil akışkan lülesi ve ana akış kanalındaki konumuyla ilgili sekiz bağımsız geometrik parametreden ($\varnothing d$, s , α_4 ,

α_5 , D_t , α_1 , L_{nd} ve NXP), öncelikle literatüre göre GBO'na etkisi en önemli altı ana akış kanalı parametresi (D_m , α_2 , L_{s2} , L_m , α_3 ve L_d) belirlenmiştir. Ancak bunlardan karışım odası çapı D_m , birincil akışkan kütsel debisine ve dolayısıyla birincil akışkanın giriş şartlarına (basınç ve sıcaklık) bağlı olarak 1-b tasarım hesaplarıyla belirlenen, birincil akışkan lülesi (yakınsak-ıraksak lüle) boğaz çapına (D_t) bağlı tanımlanmaktadır. Bu nedenle literatür örneklerine uygun olarak karışım odası çapı D_m ; ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasında $D_m=3,9\text{mm}$ ($D_m/D_t=6,6$, Tablo 3.4.) ve birinci kademe analizlerde ise $D_m=4,1\text{mm}$ ($D_m/D_t=7$, Tablo 3.5.) sabit tutulmuştur.

Birinci kademe analizlerde ejektör performansına etkileri araştırılan beş ana akış kanalı geometrik parametresi ve bunların her biri için literatüre uygun seçilen üçer seviye (Tablo 3.5.) kullanılarak, Taguchi $L27(3^5)$ ortogonal dizisine uygun parametre seviye kombinasyonlarıyla, 27 farklı ejektör modeli oluşturulmuştur. Birinci kademe HAD analizlerinde kullanılan tüm modellerin GBO'ları, tasarım değerinin (7,2) $-\%12,7$ ila $-33,5$ altında (Tablo 7.2.) elde edilmiştir. Hesaplanan GBO'ları kullanılarak, “en büyük en iyi” S/G değerlendirme ölçütü ile yapılan Taguchi analizi, ANOM ve ANOVA analizlerine göre, etkileri incelenen ana akış kanalı geometrik parametrelerinin önem sıralaması, en uygun seviyeleri ve GBO'na % etkileri aşağıda verilmiştir.

1. Difüzör genişleme açısı ($\alpha_3=9^\circ$; $\%32,09$)
2. Emme odası uzunluğu ($L_s\cong 8,1\text{mm}$; $\%23,54$)
3. Emme odası daralma açısı ($\alpha_2=15^\circ$; $\%16,97$)
4. Karışım odası uzunluğu ($L_m\cong 24,4\text{mm}$; $\%11,23$)
5. Difüzör uzunluğu ($L_d\cong 48,7\text{mm}$; $\%0,10$)

Birinci kademe analizlerde incelenen 27 modelin arasında, en uygun akış kanalı geometrik parametre seviyelerinin kombinasyonu ile tasarlanmış herhangi bir ejektör modeli bulunmamaktadır. Birinci kademe analizlerde elde edilen en uygun parametre seviyeleri ile ana akış kanalı oluşturulan ejektör modeli (AKM-F1.7) ile yapılan HAD çözümünün sonuçları ile hesaplanan GBO=5,73; tasarım değerine (7,2) göre $-\%20,42$, HAD sonuçlarından regresyon analiziyle ($R^2=0,84$) geliştirilen Denklem 6.1'e (6,57) göre $-\%12,79$ ve Taguchi tahminine (6,50) göre de $-\%11,85$ daha düşüktür (Tablo

6.7). Bu sonuçlar regresyonla oluşturulan denklemin geçerliliğini, Taguchi tahmininin etkili olduğunu ve en önemlisi de ana akış kanalı geometrisini belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Ancak birinci kademe analizlerde GBO sonuçlarının hedef değerin (7,20) altında kalması nedeniyle, GBO'na etkisinin önemli olduğu bilinen karışım odası çapı için literatüre uygun (Tablo 3.3.) üç farklı seviye ($D_m=6D_t=3,48\text{mm}$; $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ ve $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$) belirlenerek, ikinci kademe analizler yapılmıştır. Bu analizlerde; birincil akışkanın akış kanalındaki hızını (momentumunu) ve GBO'nu etkileyen birincil (yakınsak-ıraksak) lülenin ıraksak bölümünün uzunluğu (L_{nd}) da etkisi incelenen geometrik parametrelere eklenmiştir. Başka bir ifadeyle ikinci kademe analizlerde, hem karışım odası çapının, hem ana akış kanalının beş geometrik parametresinin hem de birincil lülenin ıraksak bölümü uzunluğunun GBO'na etkileri incelenmiştir.

İkinci kademe analizlerde, üç farklı karışım odası çapının her biri için etkileri incelenen altı parametrenin üçer alt seviyesi kullanılarak, Taguchi'nin önerdiği $L_{27}(3^6)$ ortogonal dizisine uygun kombinasyonlarla 27şer adet, toplamda ise 81 adet farklı ejektör modeli oluşturulmuştur. Bu modellerle yapılan HAD analizlerinin sonuçlarına göre her bir karışım odası çapı için elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

I. $D_m=6D_t=3,48\text{mm}$

1. Tüm modellerin GBO sonuçları, hedef değerden (7,2) daha düşüktür (Tablo 7.2.; $-\%13,86$ – $-\%54,65$).
2. Taguchi, ANOM ve ANOVA analizlerine göre parametrelerin önem sıralaması, en uygun seviyeleri ve % etki dereceleri:
 - Karışım odası uzunluğu ($L_m=24,4\text{mm}$, $\%35,42$)
 - Emme odası uzunluğu ($L_s=6,1\text{mm}$, $\%14,70$)
 - Difüzör genişleme açısı ($\alpha_3=7^\circ$, $\%12,77$)
 - Emme odası daralma açısı ($\alpha_2=25^\circ$, $\%9,88$)
 - ıraksak bölüm uzunluğu ($L_{nd}=0,58\text{mm}$, $\%9,30$)
 - Difüzör uzunluğu ($L_d=12,1\text{mm}$, $\%1,48$)
3. En uygun geometrili model (AKM-F2.6) -tasarım GBO farkı ($5,51-7,2=-1,69$; $-\%23,47$)

4. En uygun geometrili model (AKM-F2.6) –Denklem 7.1 GBO farkı (5,51–6,35=–0,84; –%13,23)
5. En uygun geometrili model (AKM-F2.6) –Taguchi tahmini GBO farkı (5,51–6,48=–0,97; –%14,97)

II. $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$

1. Tüm modellerin GBO sonuçları, hedef değerden (7,2) daha düşüktür (Tablo 7.8.; –%0,64–%26,82).
2. Taguchi, ANOM ve ANOVA analizlerine göre parametrelerin önem sıralaması, en uygun seviyeleri ve % etki dereceleri:
 - Difüzör genişleme açısı ($\alpha_3=7^\circ$, %35,01)
 - Karışım odası uzunluğu ($L_m=27,3\text{mm}$, %25,85)
 - Iraksak bölüm uzunluğu ($L_{nd}=0,58\text{mm}$, %12,75)
 - Emme odası daralma açısı ($\alpha_2=25^\circ$, %7,65)
 - Difüzör uzunluğu ($L_d=54,5\text{mm}$, %7,13)
 - Emme odası uzunluğu ($L_s=3,0\text{mm}$, %1,67)
3. En uygun geometrili model (AKM-F2.9)-tasarım GBO farkı (8,53–7,2=1,33; +%18,47)
4. En uygun geometrili model (AKM-F2.9)–Denklem 7.2 GBO farkı (8,53–9,52=–0,99; –%10,40)
5. En uygun geometrili model (AKM-F2.9)–Taguchi tahmini GBO farkı (8,53–9,52=–0,99; –%10,40)

III. $D_m=12D_t=6,96\text{mm}$

1. Tüm modellerin GBO sonuçları, hedef değerden (7,2) daha düşüktür (Tablo 7.14.; –%0,68–%27,90).
2. Taguchi, ANOM ve ANOVA analizlerine göre parametrelerin önem sıralaması, en uygun seviyeleri ve % etki dereceleri:
 - Iraksak bölüm uzunluğu ($L_{nd}=0,00\text{mm}$, %33,02)
 - Emme odası uzunluğu ($L_s=4,0\text{mm}$, %23,54)
 - Difüzör genişleme açısı ($\alpha_3=7^\circ$, %12,26)
 - Karışım odası uzunluğu ($L_m=36,3\text{mm}$, %10,30)
 - Difüzör uzunluğu ($L_d=72,7\text{mm}$, %6,93)

- Emme odası daralma açısı ($\alpha_2=20^\circ$, %1,76)
3. En uygun geometrili model (AKM-F2.12)-tasarım GBO farkı
(10,04–7,2=2,84; +%39,44)
 4. En uygun geometrili model (AKM-F2.12)–Denklem 7.1 GBO farkı
(10,04–9,88=0,56; +%1,62)
 5. En uygun geometrili model (AKM-F2.12)–Taguchi tahmini GBO farkı (10,04–9,55=0,49; +%5,13)

Bu sonuçlardan hareketle, ejektör GBO üzerinde en belirleyici ana akış kanalı bölümünün karışım odası olduğu ve karışım odasının uzunluğunun (L_m) karışım odası çapı (D_m) ile ters orantılı (karışım odası çapı büyüdükçe karışım odasının kısaldığı) değiştiği görülmektedir. En uygun geometrili ejektör modellerinde, karışım odası uzunluğunun karışım odası çapına oranı (L_m/D_m) 5-7 aralığındadır. Bu sonuçlar Zhu ark. (L_m/D_m , 5-8) [11] ve ASHRAE Handbook 1983 (L_m/D_m , 3-5) [35] ile uyumludur.

Dinamik basıncın statik basınca dönüştüğü ses altı difüzörün genişleme açısı (α_3) da GBO bakımından önemli geometrik parametreler arasındadır. En uygun geometrili ejektör modellerinde difüzör genişleme açıları, literatürle (5° - 12°) [11, 25 ve 35] uyumlu olarak, 7° ve 9° dir. Difüzör genişleme açısı için ortalama bir değer 8° alınabilir.

Difüzör uzunluğu (L_d), ele alınan ejektör akış kanalı geometrik parametreleri arasından, GBO na etkisi en önemsiz sayılabilecek parametredir. Dolayısıyla difüzör uzunluğu kısaltılarak ejektör boyutları küçültülebilir. Ayrıca en uygun geometrili ejektör modellerinde difüzör uzunluğunun karışım odası çapına oranı (L_d/D_m), literatürle (3-23) [25, 27 ve 35] uyumlu olarak 3,5-12 elde edilmiştir.

Emme odası daralma açısının (α_2) GBO na etkisi, difüzör uzunluğundan daha fazla olmakla birlikte, diğer ana akış kanalı geometrik parametrelerinden düşüktür. Ancak en uygun geometrili ejektörlerde, emme odası daralma açısının 20° ve üzerinde olması gerektiği belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen en uygun geometrili ejektörlerin emme odası daralma açıları (15° - 25°), literatürde önerilen emme odası daralma açılarından ($3,5^\circ$ - 10°) bir miktar daha büyüktür [11, 25 ve 35].

Emme odasının uzunluğu ve birincil lülenin ıraksak bölümünün uzunluğu da GBOna etkisi önemli ana akış kanalı geometrik parametrelerindendir.

En uygun geometrili ejektör modellerinde emme odası uzunluğunun karışım odası çapına oranı (L_s/D_m) 0,6-2 olarak elde edilmiştir ve literatürde verilen aralığın (1,5-10) alt sınırındadır [11, 27 ve 35].

Birincil lülenin ıraksak bölümü uzunluğunun birincil lüle boğaz çapına oranı (L_{nd}/D_t) litertürle (0-2) [11 ve 27] uyumlu olarak 0 ve 1 elde edilmiştir.

İkinci kademe analizlerin sonuçlarına göre GBO hedef değerine (7,20) en yakın sonuçlar $D_m=9D_t=5,22\text{mm}$ çaplı karışım odası için yapılan analizlerden elde edilmiştir. Bu karışım odası çapı için elde edilen en uygun geometrili ejektör modeli olan AKM-F2.9 ile öncelikle birinci kademe analizlerden önce yapılan ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık çalışmasının geçerliliği kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Daha sonra da işletme sırasında değiştirilebilen yegane ejektör geometrik parametresi olan birincil lüle konumu (NXP) ile birincil akışkanın ejektöre giriş basıncı ve sıcaklığı için parametrik analizler yapılmıştır.

En uygun geometrili ejektör modeli AKM-F2.9 ile tasarım sınır şartlarında yapılan parametrik analizlerde; birincil lüle konumunun GBOna etkisinin önemli olduğu ve $NXP=+3\text{mm}$ 'de hedef GBOna (7,2) +%3 farkla ulaşılacağı belirlenmiştir. $NXP=0$ ve tasarım sınır şartlarında yapılan parametrik analizlerde, artan birincil akışkan basıncının akışkan debilerini de artırdığı, ancak birincil akışkan basıncının GBOna etkisinin çok az olduğu belirlenmiştir. ~212kPa birincil akışkan giriş basıncında hedeflenen GBOna ulaşılacağı, ancak birincil ve ikincil akışkan debilerinin de tasarım değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir.

$NXP=0$ ve tasarım sınır şartlarında yapılan parametrik analizlerde, artan birincil akışkan giriş sıcaklığının birincil ve ikincil akışkan debilerini düşürdüğü, ancak birincil akışkan giriş sıcaklığının GBOna etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. ~483K birincil akışkan giriş sıcaklığında hedeflenen GBOna ulaşılacağı, birincil ve ikincil akışkan debilerinin de tasarım değerlerinin üzerinde olacağı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, birincil akışkan giriş sıcaklığının, GBOnın hedef değere ayarlanması bakımından en uygun işletme parametresi olduğu anlaşılmaktadır.

Ejektör akış kanalı tasarımında parametrelerin GBOna etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan sayısal deneylerin tasarımında, etkili parametrelerin eşleştirilmesi için klasik tam faktöriyel yaklaşımı yerine Taguchi deney tasarım yöntemini (ortogonal dizileri) kullanmak sayısal çözüm zamanını ve maliyetini oldukça azaltmaktadır.

Tam faktöriyel deney tasarım yöntemi kullanılsaydı: ağ yapısı ve sayısından bağımsızlık için 29 adet, birinci kademe analizlerde $3^5=243$ adet, ikinci kademe analizlerde $3*3^6=2187$ adet, ikinci kademe ağ sayısından ve yapısından bağımsızlık analizlerinde 5 adet, NXP analizlerinde 7 adet, birincil akışkan giriş basıncı analizlerinde 5 adet ve birincil akışkan giriş sıcaklığı analizlerinde 6 adet olmak üzere toplamda 2482 adet HAD analizi yapılması gerekecekti. Ancak Taguchi'nin deney tasarım yönteminde önerdiği ortogonal diziler, sonuçların değerlendirilmesinde önerdiği S/G, ANOM ve ANOVA istatistik analiz yöntemleri kullanılarak, gerekli analizlerin toplam sayısı 164'e düşürülmüştür. Dolayısıyla ejektör tasarımında klasik tam faktöriyel yönteminin kullanıldığı çalışmalara [9, 17] kıyasla, Taguchi deney tasarım yöntemi kullanıldığında çok daha az sayıda analizle daha kararlı sonuçlar elde edilmektedir.

Sonuç olarak, en uygun ana akış kanalı geometrili ejektörlerin tasarımında, Taguchi yönteminin ve HAD analizlerinin, tam faktöriyel deney tasarımına göre daha avantajlıdır. Ayrıca SolidWorks Flow Simulation yazılımının ejektör akış kanalındaki sıkıştırılabilir akışın HAD analizlerinde ve ejektörlerin ön tasarım süreçlerinde kullanılabileceği anlaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] Singh, M., Zappa, D., & Comini, E. (2021). Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (54), 27643-27674.
- [2] Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3 (1), 1167990.
- [3] Saadabadi, S. A., Thattai, A. T., Fan, L., Lindeboom, R. E., Spanjers, H., & Aravind, P. V. (2019). Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints. *Renewable Energy*, 134, 194-214.
- [4] Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.
- [5] Roy, D., Samanta, S., & Ghosh, S. (2019). Techno-economic and environmental analyses of a biomass based system employing solid oxide fuel cell, externally fired gas turbine and organic Rankine cycle. *Journal of Cleaner Production*, 225, 36-57.
- [6] Karimi, M. H., Chitgar, N., Emadi, M. A., Ahmadi, P., & Rosen, M. A. (2020). Performance assessment and optimization of a biomass-based solid oxide fuel cell and micro gas turbine system integrated with an organic Rankine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (11), 6262-6277.
- [7] Cinti, G., Bidini, G., & Hemmes, K. (2019). Comparison of the solid oxide fuel cell system for micro CHP using natural gas with a system using a mixture of natural gas and hydrogen. *Applied energy*, 238, 69-77.
- [8] Xu, Q., Guo, Z., Xia, L., He, Q., Li, Z., Bello, I. T., ...& Ni, M. (2022). A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 253, 115175.
- [9] Genc, O., Toros, S., & Timurkutluk, B. (2018). Geometric optimization of an ejector for a 4 kW SOFC system with anode off-gas recycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (19), 9413-9422.
- [10] Takeguchi, T., Kani, Y., Yano, T., Kikuchi, R., Eguchi, K., Tsujimoto, K., ... & Aizawa, M. (2002). Study on steam reforming of CH₄ and C₂ hydrocarbons and carbon deposition on Ni-YSZ cermets. *Journal of Power Sources*, 112 (2), 588-595.
- [11] Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., & Li, Y. (2007). Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system. *Journal of Power Sources*, 173 (1), 437-449.

- [12] Anghilante, R., Colomar, D., Brisse, A., & Marrony, M. (2018). Bottom-up cost evaluation of SOEC systems in the range of 10–100 MW. *International journal of hydrogen energy*, 43 (45), 20309-20322.
- [13] Kang, J. L., Wang, C. C., Wong, D. S. H., Jang, S. S., & Wang, C. H. (2021). Digital twin model and dynamic operation for a plant-scale solid oxide fuel cell system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 118, 60-67.
- [14] Chen, Z., Guo, S., & Qin, C. (2020). Experimental research on porous media combustion of SOFC exhaust gas. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100796.
- [15] Li, W., Wang, Y., & Liu, W. (2020, December). A review of solid oxide fuel cell application. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 619, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [16] Choudhury, A., Chandra, H., & Arora, A. (2013). Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 430-442.
- [17] Genc, O., Toros, S., & Timurkutluk, B. (2017). Determination of optimum ejector operating pressures for anodic recirculation in SOFC systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (31), 20249-20259.
- [18] Vincenzo, L., Pagh, N. M., & Knudsen, K. S. (2013). Ejector design and performance evaluation for recirculation of anode gas in a micro combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell. *Applied Thermal Engineering*, 54 (1), 26-34.
- [19] Elbel, S., & Lawrence, N. (2016). Review of recent developments in advanced ejector technology. *International journal of refrigeration*, 62, 1-18.
- [20] Dietrich, R. U., Oelze, J., Lindermeir, A., Spitta, C., Steffen, M., Küster, T., ... & Leithner, R. (2011). 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 (17), 7152-7160.
- [21] Powell, M., Meinhardt, K., Sprenkle, V., Chick, L., & McVay, G. (2012). Demonstration of a highly efficient solid oxide fuel cell power system using adiabatic steam reforming and anode gas recirculation. *Journal of Power Sources*, 205, 377-384.
- [22] Lanzini, A., Santarelli, M., & Orsello, G. (2010). Residential solid oxide fuel cell generator fuelled by ethanol: Cell, stack and system modelling with a preliminary experiment. *Fuel Cells*, 10 (4), 654-675.
- [23] Kazempoor, P., Dorer, V., & Ommi, F. (2009). Evaluation of hydrogen and methane-fuelled solid oxide fuel cell systems for residential applications: system design alternative and parameter study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (20), 8630-8644.
- [24] Riensche, E., Stimming, U., & Unverzagt, G. (1998). Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant: Part I: Variation of process parameters. *Journal of Power Sources*, 73 (2), 251-256.

- [25] Rusly, E., Aye, L., Charters, W. W. S., & Ooi, A. (2005). CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 28 (7), 1092-1101.
- [26] Zhu, Y., & Li, Y. (2009). New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 191 (2), 510-519.
- [27] Zhu, Y., & Jiang, P. (2011, June). Geometry optimization study of ejector in anode recirculation solid oxygen fuel cell system. In 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 51-55). IEEE.
- [28] Zhu, Y., Li, Y., & Cai, W. (2011). Control oriented modeling of ejector in anode gas recirculation solid oxygen fuel cell systems. *Energy Conversion and Management*, 52 (4), 1881-1889.
- [29] Huang, B. J., & Chang, J. M. (1999). Empirical correlation for ejector design. *International journal of Refrigeration*, 22(5), 379-388.
- [30] Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., & Petrenko, V. A. (1999). A 1-D analysis of ejector performance. *International journal of refrigeration*, 22(5), 354-364.
- [31] Zhu, Y., Cai, W., Li, Y., & Wen, C. (2008). 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(2), 1122-1130.
- [32] Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., & Li, Y. (2008). Simplified ejector model for control and optimization. *Energy Conversion and Management*, 49 (6), 1424-1432.
- [33] Braun, R. J., Vincent, T. L., Zhu, H., & Kee, R. J. (2012). Analysis, optimization, and control of solid-oxide fuel cell systems. In *Advances in Chemical Engineering* (Vol. 41, pp. 383-446). Academic Press.
- [34] Taşdelen, G., & Küçük, H. (2017). Katı Oksit Yakıt Hücresi Ejektörünün Sayısal İncelemesinde Türbülans Modellerinin Etkinliği. 13.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 19-22 Nisan 2017-071
- [35] Handbook, A. S. H. R. A. E. (1983). Equipment Volume. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
- [36] Montgomery, D. C. (1993). Design and Analysis of Experiments 5th Edition, Arizona State University.
- [37] UNVERDI, M., & KUCUK, H. (2021). Yerel Havalandırma Sistemleri İçin Isıl Etkenliği Yüksek Çapraz Akışlı Levhalı Isı Değiştirici Tasarımı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 182, 22-34.
- [38] Şirvancı, M. (1997). Kalite için deney tasarımı" Taguchi yaklaşımı". Literatür Yayıncılık.
- [39] Šibalija, T. V., & Majstorović, V. D. (2016). Advanced Multiresponse Process. Optimisation. Springer, New York, 10, 978-3.
- [40] Mori, T. (2011). Taguchi methods: benefits, impacts, mathematics, statistics, and applications. ASME Press.
- [41] Mitra, A. (2016). Fundamentals of quality control and improvement. John Wiley & Sons.

- [42] Lam, C. K. G., & Bremhorst, K. (1981). A modified form of the k - ε model for predicting wall turbulence.
- [43] Ünverdi, M. (2022). Prediction of heat transfer coefficient and friction factor of mini channel shell and tube heat exchanger using numerical analysis and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107182.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yasin AKALAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2018-2021 yılları arasında anahtar teslim projelerde; Basınçlı-basınçsız ekipman dizaynı, imalatı, montajı/demontajı, otomasyonu, devreye alımı, çelik konstruksiyon dizaynı, imalatı-montajı, stok tankları dizayn-imatları, Borulama hatları dizayn ve imatları, kollektör, drum ve karmaşık kollektör setleri, utility ve proses sistemleri kurulumu gibi projelerde proje & dizayn mühendisi ve şantiye şefi olarak görevler aldı.
- 2021-2023 yılında bir akışın farklı kesitlerde gösterdiği fiziksel özelliklerini ölçmek, bu özelliklerden akışın bilinmeyen özelliklerinin tespiti için; ventürimetre, akışmetre, fark basınç akışmetresi, orifismetre gibi özel akış durumları yöntemlerini mikro ve makro ölçekte kullanarak sistemin ihtiyaç duyduğu geliştirmeler ve üretim üzerine çalıştı. Mikro reaktör konularında çalışarak, endüstriyel özel amaçlı kullanılan emülsiyonların nano boyutlara indirgenmesi üzerine ar-ge çalışmaları yürüttü.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- AKALAN Yasin, KUCUK Hasan,. Sayısal analiz ve taguchi deney tasarım yöntemi ile katı oksit yakıt hücresi (KOYH) ejektörü akış kanalının geliştirilmesi., *11. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, Rize, Türkiye. 17-18 Aralık 2022.