



**KONVANSİYONEL YAKICILARDA BİYOGAZ YANMA  
KARAKTERİSTİKLERİNİN ANALİZİ**

**Murat ŞAHİN**

**DOKTORA TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2016**

Murat ŞAHİN tarafından hazırlanan “KONVANSİYONEL YAKICILARDA BİYOGAZ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Başkan :** Prof. Dr. Veli ÇELİK

Makine Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Prof. Dr. İlker YILMAZ

Uçak Gövde-Motor, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Doç. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 23/12/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat ŞAHİN  
23/12/2016

# KONVANSİYONEL YAKICILARDA BİYOGAZ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Murat ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2016

## ÖZET

Bu çalışmada, mevcut konvansiyonel bir doğal gaz brülöründe, farklı bileşenlere sahip biyogazların yanma davranışlarını araştırılmıştır. Bu çalışmanın sayısal bölümünde, biyogaz yanma analizleri için CFD programı kullanılmıştır. CFD modellemeleri gerçekleştirmek için PDF Karışım / Fraksiyon yanma modeli, Standard k-ε türbülans modeli ve P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır. Elde edilen sıcaklık ve emisyon dağılım değerleri yanma odası boyunca aksel ve radyal yönlerde birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, ön ısıtma yakma havasının, biyogaz yanma alev sıcaklıklarına olan etkisi mevcut çalışmada araştırılmıştır. Son olarak, SO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde biyogazların içeriğindeki H<sub>2</sub>S miktarının etkisi bu öngörüler çerçevesinde incelenmiştir. Bu çalışmanın deneysel kısmında, biyogazlar yanma sisteminde mevcut bir doğal gaz brülörü tarafından yakılmıştır. Bu yakma sisteminin, yanma duvarında emisyon ve sıcaklık verilerini alabilmek için ölçüm bağlantı noktaları vardır. Yanma odası boyunca bu ölçüm noktalarından bir baca gazı analizörü vasıtasıyla aksel ve radyal pozisyonlarda sıcaklık ve emisyon değerleri ölçülmüştür ve incelenmiştir. Tüm deneyler ve sayısal modellemeler gibi sayısal çalışmalarda 10 kW ısı güç  $\Phi = 0.83$  bir eşdeğerlik oranı olarak incelenmiştir. Tüm deneysel sıcaklık ölçümleri ile sayısal sonuçlar tatmin edici iyi bir uyum içindedir. Deneysel sonuçlarda, % 65 metan içeren biyogazın yanma alev sıcaklığı 1386 K olduğu tespit edilmiştir ve bu değer en yüksek yanma alev sıcaklık değeri olarak ölçülmüştür. Aynı yakma koşullarında metan alevi (1467 K) ile karşılaştırıldığında, bu değer kadar yüksek ve kabul edilebilir olduğu söylenebilir. Diğer biyogaz sıcaklık değerleri, içeriğindeki metan yüzdesi miktarı bağlı olarak, bu biyogazların yanma alev sıcaklık değerleri daha az ölçülmüştür. Biyogazların metana göre daha düşük alev sıcaklıklarına bağlı olarak NO<sub>x</sub> düzeyleri (25 ppm altında) olduğu ölçülmüştür ve bu metanın yanma sonucu NO<sub>x</sub> emisyon sonuçlarına göre daha az olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca, yakıt içinde CO<sub>2</sub> miktarına bağlı olarak (hacme göre en fazla % 43), yanma sonu ürünlerde CO<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek hacme neden olduğu kanıtlanmıştır.

Bilim Kodu : 91440  
Anahtar Kelimeler : Biyogaz, brülör, Yanma, Emisyon, CFD Modelleme  
Sayfa Adedi : 122  
Danışman : Prof.Dr. Mustafa İLBAŞ

# ANALYSIS OF BIOGAS COMBUSTION CHARACTERISTICS IN CONVENTIONAL BURNER

(Ph. D. Thesis)

Murat ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2016

## ABSTRACT

The combustion behaviours of biogases including different components have been experimentally and numerically investigated in an existing conventional natural gas burner in this study. In the numerical part of this study, combustions of biogases have been modelled by a CFD code. The PDF Mixture/Fraction combustion model, standard  $k-\epsilon$  turbulence model and P-1 Radiation model have been used in order to perform the modellings. Temperature and emission gradients have been obtained at axial and radial directions in the combustor and compared each other. In addition to these studies, the effect of the preheated air on the flame temperatures of the biogases has been investigated within the present study. Finally, the effect of  $H_2S$  amount in biogas on  $SO_2$  emissions has been investigated within these predictions. In the experimental part of this study, the biogases were burned by the existing natural gas burner in a combustion system. This combustion system has measuring ports on its combustor wall. Temperature and emission values have been measured and investigated on some axial and radial positions by using thermocouples and a flue gas analyzer throughout the combustion chamber via these measuring ports. All experiments have been studied for a thermal power of 10 kW and an equivalence ratio of  $\phi = 0.83$  as with numerical studies as with the numerical modellings. All experimental temperature measurements are in satisfactorily good agreement with the numerical results. The experimental results show that the maximum temperature value was measured and determined to be 1386 K for the biogas flame containing methane up to 65%. This value is high enough and acceptable when it is compared with the methane flame at the same combustion conditions (1467 K). The temperature values of the other biogases are less than that of this biogas temperature values due to including amount of methane percentage. It can be concluded that the  $NO_x$  levels (under 25 ppm) of the biogases are less than that of the methane flame because of their low flame temperatures. It can also be demonstrated that the presence of  $CO_2$  in the fuels (up to 43 % by volume) leads to a high volume of  $CO_2$  emissions in combustion products.

Science Code : 91440  
Key Words : Biogas, Burner, Combustion, Emission, CFD Modelling  
Page Number : 122  
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca yol gösteren, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve özellikle tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam, Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ' a, doktora çalışmam süresinde her zaman bana yardımcı olan Araştırma Görevlisi Serhat KARYEYEN'e çok teşekkür ederim.

Deneysel düzeneklerin hazırlanmasında 114M668 Proje Numarası ile TÜBİTAK tarafından verilen mali destek için teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında kullanacağım biyogaz ve metan tüplerinin tedarik edilmesinde 07 / 2016-01 Proje Numarası ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi(BAP) biriminin vermiş oldukları mali destekten dolayı teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan canım annem Neriman ŞAHİN'e, biricik eşim Zeynep ŞAHİN'e, değerli aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresinde vefat eden değerli babam Bekir ŞAHİN'i büyük bir özlemle anıyor ve bu doktora tez çalışmamı onun aziz hatırasına atfediyorum.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	5
3. BİYOGAZ VE YANMA .....	15
3.1. Biyogaz .....	15
3.2. Yanma .....	21
3.2.1. Emisyon .....	21
3.2.2. Yanmanın reaksiyon kinetiği ve termodinamiği .....	22
4. DENEYSEL SİSTEM VE ÇALIŞMA .....	25
4.1. Deneysel Yöntem .....	25
4.2. Tezin Deneysel Çalışmaların Yapılması için Biyogaz ve Metan Tüplerinin Alınması .....	31
4.3. Yanma Deneylelerinin Gerçekleştirilmesi .....	31
4.3.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi .....	33
5. YANMANIN SAYISAL MODELLEMESİ .....	37
5.1. Yanmanın Modellenmesi .....	37
5.1.1. Yanmanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesi .....	37



5.1.2. Yanma odalarında türbülanslı akışın modellenmesi .....	39
5.1.3. Yanmanın modellenmesi .....	41
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>49</b>
6.1. Sayısal Sonuçlar .....	49
6.1.1. Yakıcılarda türbülanslı akışın modellenmesi .....	49
6.2. Deneysel Sonuçlar .....	68
6.3. Deneysel Ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması .....	91
6.3.1. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 10 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	95
6.3.2. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 30 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	99
6.3.3. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 50 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	102
6.3.4. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 70 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	105
6.3.5. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 90 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	108
6.3.6. SO <sub>2</sub> Emisyon dağılımı .....	111
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>113</b>
7.1. Sonuç .....	113
7.2. Öneriler .....	114
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>117</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>121</b>

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Biyogaz içerikleri (% oranlar hacimseldir) .....	4
Çizelge 3.1. Biyogazın genel özellikleri .....	15
Çizelge 3.2. Biyogazın karakteristik bileşenleri ve bulunabilecek safsızlıklar .....	16
Çizelge 3.3. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz ve biyogazdaki metan miktarları .....	20
Çizelge 5.1. $k$ - $\varepsilon$ modelde kullanılan sabitler .....	41
Çizelge 5.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler .....	43

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Anaerobik bozulma akım şeması .....	17
Şekil 3.2. Biyogazın sürdürülebilir döngüsü .....	19
Şekil 4.1. Ön karışimsız metan brülörü görünüşü .....	25
Şekil 4.2. Ön karışimsız metan brülörünün katı model görünüşü .....	25
Şekil 4.3. Yanma odası .....	26
Şekil 4.4. Kontrol panosu .....	27
Şekil 4.5. Gaz hattı ve bu hatlardaki armatürler .....	28
Şekil 4.6. Hava hattı ve bu hattaki armatürler .....	29
Şekil 4.7. Hava kompresörü .....	29
Şekil 4.8. Taşınabilir baca gazı analizörü .....	30
Şekil 4.9. Seramik uçlu gaz probu .....	30
Şekil 5.1. a) Hava ve yakıt girişi ,b) Radyal yakıt girişi .....	45
Şekil 5.2. Yakıcı kesit görünüşü .....	46
Şekil 5.3. Yakıcı grid ağ yapısı görünüşü .....	46
Şekil 5.4. Skewness verileri .....	46
Şekil 5.5. Orthogonal quality verileri .....	47
Şekil 6.1. Türbülans modellerinin karşılaştırılması .....	49
Şekil 6.2. Grid ağ sayılarının karşılaştırılması .....	50
Şekil 6.3. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) eksenel sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması ..	51
Şekil 6.4. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,1 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	52
Şekil 6.5. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,3 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.6. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,5 m’deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	54
Şekil 6.7. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,7 m’deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	55
Şekil 6.8. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,9 m’deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	56
Şekil 6.9. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO <sub>2</sub> (%) değerlerinin aksenal dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	57
Şekil 6.10. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO (ppm) değerlerinin aksenal dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	58
Şekil 6.11. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metan H <sub>2</sub> O (%) değerlerinin aksenal dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	59
Şekil 6.12. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metan O <sub>2</sub> (%) değerlerinin aksenal dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....	60
Şekil 6.13. SO <sub>2</sub> (ppm) değerleri(H <sub>2</sub> S ppm oranlarına göre değişimi) .....	61
Şekil 6.14. Biyogaz (1.Faz) gazın farklı H <sub>2</sub> S değerlerine göre aksenal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması .....	62
Şekil 6.15. Biyogaz (3.Faz) yakıtının hava fazlalık katsayısına göre sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması .....	63
Şekil 6.16. Biyogaz (1. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı .....	64
Şekil 6.17. Biyogaz (2. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı .....	64
Şekil 6.18. Biyogaz (3. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı .....	65
Şekil 6.19. Biyogaz (4. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı .....	66
Şekil 6.20. Metan yanma odası sıcaklık dağılımı .....	66

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.21. Biyogaz(1. Faz), biyogaz(2. Faz), biyogaz(3. Faz), biyogaz(4. Faz) ve metan yakıtlarının yanma alev sıcaklıklarının sayısal analizinin karşılaştırılması .....	67
Şekil 6.22. Ön ısıtmalı yakma havası sıcaklıklarına göre alev sıcaklıklarının değişimi	68
Şekil 6.23. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) eksenel sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	69
Şekil 6.24. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	70
Şekil 6.25. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	71
Şekil 6.26. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	72
Şekil 6.27. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	73
Şekil 6.28. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	74
Şekil 6.29. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	75
Şekil 6.30. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	76
Şekil 6.31. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	76
Şekil 6.32. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	77
Şekil 6.33. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	77
Şekil 6.34. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki CO <sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	79

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.35. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki CO <sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	79
Şekil 6.36. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki CO <sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	80
Şekil 6.37. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki CO <sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	80
Şekil 6.38. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki CO <sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	81
Şekil 6.39. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm deki NO <sub>x</sub> (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	82
Şekil 6.40. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm deki NO <sub>x</sub> (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	83
Şekil 6.41. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm deki NO <sub>x</sub> (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	83
Şekil 6.42. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm deki NO <sub>x</sub> (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	84
Şekil 6.43. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm deki NO <sub>x</sub> (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	84
Şekil 6.44. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm deki O <sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	85
Şekil 6.45. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm deki O <sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	86
Şekil 6.46. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm deki O <sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	86
Şekil 6.47. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm deki O <sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	87
Şekil 6.48. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm deki O <sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....	87
Şekil 6.49. Biyogaz (1. Faz) alev görünüşü .....	88

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.50. Biyogaz (2. Faz) alev görünüşü .....	89
Şekil 6.51. Biyogaz (3. Faz) alev görünüşü .....	90
Şekil 6.52. Biyogaz (4. Faz) alev görünüşü .....	90
Şekil 6.53. Biyogaz (1.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması	91
Şekil 6.54. Biyogaz (2.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması	92
Şekil 6.55. Biyogaz (3.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması	93
Şekil 6.56. Biyogaz (4.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması	94
Şekil 6.57. Biyogaz (1. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	96
Şekil 6.58. Biyogaz (2. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	97
Şekil 6.59. Biyogaz (3. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	98
Şekil 6.60. Biyogaz (4. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	99
Şekil 6.61. Biyogaz (1. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	100
Şekil 6.62. Biyogaz (2. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	101
Şekil 6.63. Biyogaz (3. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	101
Şekil 6.64. Biyogaz (4. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	102
Şekil 6.65. Biyogaz (1. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	103
Şekil 6.66. Biyogaz (2. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	104
Şekil 6.67. Biyogaz (3. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	104

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.68. Biyogaz (4. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	105
Şekil 6.69. Biyogaz (1. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	106
Şekil 6.70. Biyogaz (2. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	107
Şekil 6.71. Biyogaz (3. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	107
Şekil 6.72. Biyogaz (4. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	108
Şekil 6.73. Biyogaz (1. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	109
Şekil 6.74. Biyogaz (2. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	110
Şekil 6.75. Biyogaz (3. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	110
Şekil 6.76. Biyogaz (4. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması .....	111



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Arrhenius faktörü
<b>A</b>	Taşıyım ile ısı transferi yüzey alanı
<b>bar</b>	Bar
<b>C</b>	Deney sel sabit
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metan
<b>CO</b>	Karbon monoksit
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksit
<b>c<sub>p</sub></b>	Özgül ısı
<b>E</b>	Aktivasyon enerjisi
<b>f</b>	Karışım oranı
<b>G</b>	Türbülans kinetik enerjisi üretimi
<b>I</b>	Toplam yarı küresel şiddet
<b>J</b>	Akı
<b>h</b>	Isı taşıyım katsayısı
<b>H</b>	Entalpi
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrojen
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Su buharı
<b>k</b>	Oran sabiti
<b>k</b>	Isı iletim katsayısı
<b>k</b>	Debimetre kalibrasyonu dönüşüm faktörü
<b>K</b>	Kelvin
<b>kcal</b>	Kilokalori
<b>kg</b>	Kilogram
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>kWh</b>	Kilowatt-saat
<b>m</b>	metre
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$m$	Kütleli oran
$m_j$	Kütle oranı
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>MPa</b>	Megapaskal
<b>MW</b>	Megawatt
$N_2$	Azot
$Nm^3$	Normal metreküp
$NH_3$	Amonyak
$NO_x$	Azot oksit
$NO$	Azot monoksit
$O_2$	Oksijen
<b>OH</b>	Hidroksil
<b>p</b>	Basınç
<b>Q</b>	Isı transferi
<b>Q</b>	Yakıt debisi
<b>R</b>	Universal gaz sabiti
<b>R</b>	Dönüşüm oranı
$SO_x$	Kükürt oksit
$SO_2$	Kükürt dioksit
$S_j$	Oluşmanın kütle oranı
<b>t</b>	ton
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>u</b>	Hız
<b>v</b>	Hız
<b>VOCs</b>	Uçucu organik bileşenler
<b>w</b>	Hız
<b>ppm</b>	Parts per million
$^{\circ}C$	Celcius
$\rho$	Yoğunluk
$\tau$	Vizkoz kayma gerilimi
$\Gamma$	Laminer değişim katsayısı
$\mu$	Vizkozite

**Simgeler****Açıklamalar**

$\delta$	Kroneker delta tensörü
$\epsilon$	Yayıma oranı
$Pr$	Prandtl sayısı
$\overline{f'}^2$	Karışım oranı değişimi
$\sigma$	Stefan-Boltzman sabiti
$\alpha$	Emme ve saçılma katsayısı
$\emptyset$	Eşdeğerlilik oranı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>CFD</b>	Computational fluid Dynamics
<b>DNS</b>	Direct numerical simulation
<b>DRM</b>	Diffusion reaction model
<b>EDC</b>	Eddy dissipation concept
<b>FGMs</b>	Flamelet generated manifolds
<b>GRI</b>	Gas Research Institute
<b>HAD</b>	Hesaplmalı akışkanlar dinamiği
<b>LES</b>	Large eddy simulation
<b>LHV</b>	Lower heating value
<b>LIF</b>	Laser-induced fluorescence
<b>LPG</b>	Liquefied petroluem gas
<b>PIV</b>	Particle imaginary velocimetry

## 1. GİRİŞ

Günlük yaşantımızda her alanda ihtiyaçlarımızı karşılamak için enerjinin kullanımı ve üretimi gerekmektedir. Ayrıca, enerji endüstrinin bütün faaliyet alanlarında çalışan işletmeler için en kritik üretim faktörlerinden biridir. Enerji elde edilmesinde günümüzde en yaygın fosil kökenli yakıtlar (kömür, petrol ve doğalgaz) kullanılmaktadır. Fosil yakıtların günden güne azalması ve çevre kirliliğine olan etkileri bilim adamlarını alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir.

Dünya ülkelerini karşılaştırma yaptığımızda, enerji, nüfus ve ileri teknoloji alt yapısına sahip olanlar, GSMH (Gayri Safi Millî Hasıla) olarak karşılaştırıldığında dünya ortalamasının üzerinde ve dünyada gelişmiş ülkeler sırlamasında listenin önlerinde olduğu gözlenmiştir. Bu durum özellikle gelişmekte olan ülkeler için enerjinin önemini bir kat daha arttırmıştır. Yaşamımızda ki ve endüstrideki teknolojik gelişmeler, inovasyon ve Ar-Ge alışmaları sonucu hayatımıza giren yeni ürünlerin sayısının son günlerde ciddi bir şekilde artması, mevcut doğal kaynakların verimli kullanılamaması, aşırı enerji tüketimini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Bu durum, özellikle ülkelerin stratejik planlarına ve teknolojik yol haritası belirlemelerindeki kriterlerinin oluşmasında önemli faktörler olmaktadır.

Türkiye'nin enerji ihtiyacı, özellikle son yıllarda demografik ve ekonomik büyüme nedeniyle hızla artmaktadır [1-3]. Türkiye, ağırlıklı olarak ithal edilmiş, pahalı enerji kaynaklarına bağımlı bir enerji piyasasına sahiptir [1]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin genel tartişmalar, YEK 'in Türkiye'nin enerji ihtiyacını ekonomik olarak pozitif yönden karşılayıp karşılamayacağı ve fosil yakıt kullanımından kaynaklı çevre kirliliğinin (örn. hava kirliliği) çözümüne ne derece katkı sağlayabileceği üzerinedir. Bu tartişmalara istinaden açıkça söylenebilir ki, YEK uygulamaları, Türkiye için verimli, temiz ve sürdürülebilir enerji kalkınması için en güçlü anahtardır [1]. Sanayi kuruluşları ve düzenleme kurulları arasındaki ana tartişma konularını hava kirliliği ve enerji tüketimi oluşturmaktadır (EPDK ve bakanlıklar) [1]. Dahası, özellikle Avrupa Birliğı'nden gelen uluslararası politik baskı, Türkiye'yi çevre ve enerji politikalarını geliştirme konusunda zorlamaktadır [1].

Türkiye şu an yüksek YEK potansiyeline sahiptir [1]. Dünya ile Türkiye'yi kıyasladığımızda son yıllarda YEK kullanımı artmış olmasına karşın, kullanım oranı hala düşük seviyelerdedir. Farklı çalışmalar, Türkiye'deki mevcut potansiyel durum incelendiğinde en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarının rüzgâr, güneş ve jeotermal olduğuna dikkati çekmektedir. Buna karşın Türkiye'nin hiç de göz ardı edilmemesi gereken yüksek bir biyokütle yani biyogaz potansiyeli de vardır ve bu potansiyel şu an için değerlendirilmemektedir.

Türkiye'nin özellikle son yıllarda enerji tüketimi, enerji üretiminden daha hızlı olarak, giderek artmaktadır ve bu durum ülkeyi üzerinde dikkatle durulması gereken, enerji ithaline bağımlı duruma getirmiştir. Enerji, sosyal ve ekonomik kalkınma, dahası, yüksek yaşam kalitesi için oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir [4].

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları üzerine olan ulusal politikalar şekillendirilirken, rüzgâr, güneş ve hidroelektrik gibi biyokütlesel olmayan kaynaklara, biyokütlesel kaynaklardan daha büyük önem verilmektedir [5]. Türkiye'nin yenilenebilir enerji ve teknolojileri üzerine yapılan politik çalışmalarda temel araştırma konusunu genellikle, hidroelektrik enerji ve jeotermal ısı oluşturmaktadır. Biyokütle kullanım ve uygulamalarının enerji üretimine sağlayabileceği katkılar üzerine yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Türkiye, sadece hayvan atıkları ile çalışabilecek, 2 000 adet biyogaz tesisi kapasitesine sahiptir. Fakat şu anda ülkede 36'sı çalışmakta olan toplam 85 biyogaz tesisi bulunmaktadır [6].

### Tezin amacı

Bu tezin amacı, biyogaz yakıtların yanma karakteristiklerinin nümerik ve deneysel analizini yapmaktır. Biyogaz yanmasının nümerik modellemesi için Ansys Fluent CFD programı kullanılmıştır. Modelleme çalışmaları ile farklı fazlarda biyogazın yanma ve emisyon davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar ise gaz yakıtlar için bir TÜBİTAK Projesi kapsamında tasarlanmış olan yanma sistemi kullanılarak (bilinen yanma sistemleri bu biyogazları yakmak için yeterli olmayabilir) yapılmıştır. Bu tez çalışması ile yanma

karakteristikleri bakımından, yanma odasının eksenel ve radyal bölgelerinden yanma ve emisyon değerlerine göre, biyogaz ve doğalgaz yanması karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması ile farklı oranlarda gaz ihtiva eden biyogazları yakabilecek bir yakma sistemi sayesinde ülkemiz için yerli ve yenilenebilir bir kaynağın kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, bu gazların, dışa bağımlı olduğumuz doğalgaza ne kadar alternatif olabilecekleri gerçekleştirilecek olan deneysel ve nümerik çalışma verilerine göre, eksenel ve radyal yönde belirlenen yanma karakteristikleri bakımından belirlenmiştir.

### Tezin kapsamı

Bu tez genel hatlarıyla, biyogaz yakabilen bir yakma sisteminde biyogazların yanma karakteristiklerinin belirlenmesi için, özellikle alev bölgesinden olmak üzere, yanma odası içerisinden eksenel ve radyal yönlerden elde edilecek olan yanma parametrelerinin belirlenmesi neticesinde elde edilen deneysel çıktılarının yapılacak nümerik modelleme çalışmaları ile birlikte yorumlanarak tezin sonuçlandırılmasını içermektedir.

Bu çerçevede tez kapsamı şöyle sıralanabilir;

- Detaylı literatür araştırması,
- Sayısal analiz (CFD Modelleme) çalışması,
- Geliştirilen bir yakma sisteminde farklı oranlardaki biyogazların yakılması (deneysel çalışma)
- Mevcut bir doğalgaz brülöründe yakılan metan sonuçları ile elde edilen biyogaz yanma sonuçlarının karşılaştırılarak değerlendirilmesi,
- Sonuçların bilimsel verilere göre yorumlanması.

### Çalışmada kullanılacak olan biyogazların içeriği

Bilindiği gibi, farklı yöntemler kullanılarak elde edilen biyogazlar, farklı oranlarda gaz karışımlarından meydana gelmektedir. Ancak, biyogaz, yüksek oranda metan ( $\text{CH}_4$ ) ve karbondioksitten ( $\text{CO}_2$ ) oluşmaktadır [7]. Bu bağlamda, literatürde belirlenmiş bazı biyogaz oranları Çizelge 1.1'de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 1.1'de metan da ( $\text{CH}_4$ ) gösterilmiştir. Çünkü doğalgaz çok yüksek oranda metandan oluşmakta olup, biyogazların,

doğalgaza ne derece alternatif olabileceklerini ortaya koyabilmek için, mevcut bir doğalgaz brülöründe kullanılmak üzere metan yakıtı da bu tez kapsamında yakılacaktır.

Çizelge 1.1. Biyogaz içerikleri (% oranlar hacimseldir)

Biyogaz İçeriği	Doğalgaz	1.Faz(%)	2.Faz(%)	3.Faz(%)	4.Faz(%)
Metan (CH <sub>4</sub> )	100	55	60	65	55
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	-	43,1	38	33	43,1
Azot (N <sub>2</sub> )	-	1,53	1,5	1,3	1,53
Hidrojen sülfür (H <sub>2</sub> S)	-	10 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm
Oksijen (O <sub>2</sub> )	-	0,3	0,5	0,7	0,37
Hidrojen (H <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-
Toplam	100	100	100	100	100

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hosseini ve diğeri yaptıkları çalışmada, temiz teknoloji geliştirme stratejilerine dayalı biyogaz alevsiz modu yanma özelliklerini analiz etmektedir. Üç boyutlu (3D) bilgisayarlı akışkan dinamik (CFD) Eğitim konvansiyonel moduna kıyasla biyogaz alevsiz yanma çeşidinde öncelikleri göstermek için yapılmıştır. Önceden ısıtılmış duvar sıcaklığının, reaksiyon bölgesi ve kirletici oluşumu üzerindeki etkileri gözlenmiştir ve sayısal sonuçlar üzerindeki etkileri yanma ve türbülans modellerine bakılarak tartışılmıştır. Ön ısıtma, geleneksel yanma yakıt tüketimi azaltmasına rağmen, NO<sub>x</sub> oluşumu arttığı gözlenmiştir. Bu biyogazın sahip olduğu düşük kalorilik değer (LCV) fırını gerekli ısıtma yapmak için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu fırın ön ısıtma için yüksek kalorilik değer yakıt kullanılması gerekli olduğu gözlenmiştir. Biyogaz kendiliğinden tutuşma sıcaklığı için gerekli entalpi önceden ısıtılmış oksitleyicinin entalpisi tarafından temin edilir. Biyogazın alevsiz olarak yanmasında, fırının ortalama sıcaklığı hazne boyunca, geleneksel yanma sıcaklığından daha düşüktür. Biyogaz alevsiz yanma çok yüksek üniforma sıcaklıklarda genel olarak yanma dalgalı sıcaklıklar olarak kaydedilir. Yüksek entropi üretimi tersinmezlik yönünde yan etkisi gözlenmiştir, ekserji kaybından dolayı biyogaz alevsiz yanma rejimine kıyasla, biyogaz geleneksel yanma verimi yüksektir. Alevsiz modun minimum entropi üretim değeri, haznenin içindeki ideal sıcaklığa bağlanıyor [8].

Hamedi ve diğeri çalışmalarında reformasyon yakıt ile hidrojen üretimi IC (içten yanmalı) motor yanma özelliklerinin geliştirilmesi için ve araç emisyonlarını azaltmak için kullanılabilir. Çalışmada, ayrıntılı bir kinetik mekanizmasına dayalı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli sentetik gaz olan biyogaz (H<sub>2</sub> ve CO) reform egzoz gazı için geliştirilmiştir. Deneysel verilerle uyum içinde, reaktörün fiziksel ve kimyasal performansı çeşitli O<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> oranları ile gaz saatlik uzay hızlarını (GHSV) araştırılmıştır. Sayısal sonuçlar metan reform reaksiyonlar O<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> oranı ve motor egzoz gazı sıcaklığı kuvvetle duyarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca bulunmuştur ki, düşük hidrojen verimle GHSV sonuçlar artırılması; Kuru ve buhar reformasyon reaksiyonlar nispeten akış ikamet süresine bağlıdır. Ayrıca, oksidasyon reform reaksiyonlar ilişkili sıcak nokta etkisi, katalizör aktivitesi dayanıklılık için araştırılmıştır [9].

Birth ve diğeri yaptıkları çalışmalarında, biyogazdan elektrik üretmek için yeni bir kavram olarak Elektrik üretimde gerekli dönüşümler çıkarmaya çalışılmıştır. Gaz sağlama,



gaz arıtma, gaz reform, gaz kullanımı ve ileri yanma olarak beş parçadan oluşur. Proje CFD simülasyonları ile birlikte buhar reformu ve su-gaz kaydırma reaksiyonu için denge hesaplamalara dayalı çalışılmıştır.  $1\text{m}^3/\text{saat}$  biyogaz kapasitenin elektriğe dönüşümü için bir prototip tasarım çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonuçları bu yüksek sıcaklıktaki sistemin, polimer elektrolit membran (HT-PEM) yakıt hücresini uygun hale getirmek için çalışmalar yapılmıştır. Sistem tamamen metan ve karbon monoksit dönüştürülerek, düşük konsantrasyonlu bir hidrojenin daha fazla verim sağladığını ortaya konulmuştur. Yeni süreçte hesaplanan elektrik veriminin yaklaşık olarak %40 olduğu tespit edilmiştir. Prototipteki bileşenler tek tek değiştirilebilir. Bu çalışmanın diğer önemli bir sonucu modüler prototip tasarımı yapılmıştır. Bu örnek de olduğu gibi biyogaz içindeki Hidrojen dönüştürülerek, alternatif reaktörler ve hidrojen kullanan diğer teknolojilerde dâhil edilebilir [10].

Teng ve diğerleri çalışmalarında, bir kimya mühendisliği açısından biyogaz reaktörlerinin geliştirilmesi, biyogaz reaktörü tasarımı ve optimizasyonunun sayısal modellemesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Biyogaz yaklaşık% 40-60  $\text{CH}_4$ ,% 30-50  $\text{CO}_2$  ve az miktarda  $\text{SO}_2$  ve  $\text{NH}_3$  karışımını içeren bir gazdır. Biyogaz, 100 yılı aşkın bir süredir bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Biyogazda fonksiyonel bileşen metan olduğu için, biyogazda metan içeriğinin % 97 yükseltilecek biyometan elde edilmiştir. En gelişmiş biyometan sanayi ülkelerinden biri olan İsveç'teki şehirlerin bazı alanlarında, neredeyse o bölgenin gas talebinin çoğunluğunda, fosil yakıtların yerini almıştır. Gelecek vaat eden yenilenebilir enerji ve fosil yakıtların mükemmel ikamesi olarak biyogaz, gaz emisyon azaltmada büyük ölçüde katkıda bulunabilir [11].

Chen ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında, biyogazlar yaygın bulunan yenilenebilir yakıtlardandır. Biyogazların düşük kalorilik değerleri ve kalorilik değerlerini yükseltmenin maliyetleri pahalı olduğu için ekonomik olarak kullanılması zordur. Son zamanlarda akademisyenler tarafından önerilen HAFİF oksî-yakıt çalışma kapsamında biyogazlardan yararlanmak için yukarıdaki eksikliklerin üstesinden gelmek üzere çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar karşı akışlı yapılandırılmış prototip olarak adlandırılabilir. Kafes Boltzmann yönteminin (LBM) yardımıyla, Oksitleyici karışımı ile formül (1) önceden ısıtılmış sıcaklığının etkisi, (2) yakıt oksitleyici akışı ve (3) yeni hidrojen konsantrasyonunda, oksijen konsantrasyonu yakma koşulları altında biyogaz reaksiyon yapısına ve bunların karışımları ile birlikte karşılaştırılarak incelenmiştir. Sayısal simülasyon sayesinde,

biyogaz tarafından hafif oksî-yakıtlı yakma sağlayan yakıt karışımının, küçük bir hidrojen ek olarak oksitleyici akışı, daha da az oksitleyici nispeten düşük ısıtılmış ısı ile son derece yüksek ölçüde seyreltilmiş oksijen konsantrasyonu ile sürekli olabileceği bulunmuştur. CO<sub>2</sub> emisyonlarının neden olduğu olumsuz etkilere yanıt vermek için yeni bir şema geliştirme üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu yeni yanma stratejisi için yeni yanma modelleri geliştirmek üzere çalışmalar yapılmıştır [12].

Xuan ve diğerleri çalışmalarında, ototermal yoluyla hidrojen üretimi için biyogaz kullanma potansiyelini artırmak üzere çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte enerji verimliliği artırmak ve bunun yanında olumsuz çevresel etkilerini azaltmak amaçlanmıştır. Bu çalışmada, biyogaz ATR performansı ve özelliklerini incelenmiştir. İki boyutlu sayısal model hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve kimyasal kinetik entegrasyonuna dayalı sistem geliştirilmiştir. Gözenekli alanlarda kütle taşımacılığı, kimyasal reaksiyonlar ve ısı transferi eş zamanlı olarak analizler elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmalarda biyogaz içeriğindeki CO<sub>2</sub> varlığı biyogaz ATR performansını azaltacak yönde etki yaptığı gözlenmiştir. Çalışma ve besleme koşullarının etkisi incelenmiştir ve en iyi şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. CH<sub>4</sub> oranı (S / CH<sub>4</sub>) oranı için 0,5 ve CH<sub>4</sub> oranında (A / CH<sub>4</sub>) için 2'ye eşit olduğu ve hava buharı eklenmesi ile yeniden sistem çalıştırılması, sırasıyla, birlikte S / CH<sub>4</sub> ve A / CH<sub>4</sub> ile birlikte işlemi, eşit, yüksek H<sub>2</sub> elde edebildiği 4,5 ve 2, sırasıyla, yüksek enerji verimliliği elde edebildiği çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Sonuç olarak yenilik olarak H<sub>2</sub> veya O<sub>2</sub> membran biyogaz içeriğinde kullanarak H<sub>2</sub> yüksek konsantrasyon (% 40-65) üretimi sağlanmış ve zararlı sıcak nokta problemlerini çözerek biyogazın performans değerlerinin niteliğinin artırabilir olduğu üzerinde çalışmalar yapılmıştır [13].

Ramirez-Minguela ve diğerleri çalışmalarında, katı oksit yakıt pili iki farklı tipte (SOFC) geometrileri CFD sayısal simülasyonları ile incelenmektedir: hava tarafında gözenekli bir gömme borusu geometri ile bir mono-blok-katmanlı yapı tipini (MOLB-tipi) ve basit bir düzlemsel geometri yerel çamur elde edilen biyogaz besleme modellenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Sayısal simülasyonlar entegre anot tarafında metan bulunmakta, SOFC içinde meydana gelen birçok farklı olaylar ise şu şekilde sıralanabilir: kütle transferi, ısı transferi, türlerin taşınması, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar. Elde edilen sonuçların detaylı karşılaştırılması: yoğunluğu, tür konsantrasyonu ve yakıt hücreleri boyunca sıcaklık dağılımları ile tanımlanmaktadır. Sonuçlar CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu mevcut

yoğunluk dağılımları, gözenekli boru geometrisi ve basit bir düzlemsel geometri gömme MOLB tipi için benzer eğilimler sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, daha yüksek bir  $H_2$  konsantrasyonu ve düşük ortalama sıcaklık değeri, daha yüksek akım yoğunlukları işlemek için yardımcı ısı ihtiyacının azaldığı bilgisi elde edilmektedir [14].

Lindmark ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında, anaerobik çürütücü karıştırmada katılar ayrıştırılarak tutulur ve çürütme içeriği aktif mikrobiyal topluluğu ile gelen yem homojenleştirilmesi üzerine hem deneysel, hem de CFD yardımıyla numerik çalışmalar yapılmıştır. Karıştırıcı tasarımı ile ilgili çelişkili görüşler olmasına rağmen, deneysel araştırmalar karıştırma modu ve karıştırma şiddetinin biyogazı doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bir çürütücü (kimyasal ve radyoaktif izleyiciler ve laboratuvar analizi) karıştırmasını değerlendirmek için farklı yöntemler sunar ve analiz eder, anaerobik sindirim sürecinin çürütme üzerine etkileri karıştırma tasarımı (hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve kinetik modelleme) ve güncel araştırma araçları ile yorumlanabilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Farklı karıştırma rejimlerinde yapılan deneylere ait veriler tam ölçekli çürütücülerin ve laboratuvar ölçekli çürütücülerde değerlendirmelerde hem teknik odaklı, hem de mikrobiyal olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Anaerobik sindirim sürecinde alt karıştırma şiddeti veya düzensiz karıştırma metanojenik biyokütle büyümesi için izin ve süreç belirsizliklerini hafifletmek için başlangıç aşamasında yararlı olabileceği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmada sürekli karışım yerine aralıklı karıştırma yapılarak, sürecin bakım ve enerji tüketimini azaltma imkânı olduğunu gösterilmiştir [15].

Sun ve diğerleri çalışmalarında, şelatlı demir süreci metodu ile hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) kaldırılması, atık minimizasyonu ve kaynak kurtarma gibi avantajlarıyla umut verici teknikler arasında yer alıyor. Ancak bu teknoloji güvenilir ve ekonomik çalışmasını sağlamak için yapılan şelat bozulması sorununun çözülmesi gerektiği noktasında karar verilmiştir. Bu çalışma bir hava katot yakıt hücresi içindeki o katalizör ile yenilemede kullanan bir yakıt hücreli uygulamalı şelat demir sürecini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Biyogaz akışı içerisinde bir  $H_2S$  tutulmasında, yakıt hücre destekli şelatlı demir süreci ile  $H_2S$  giderme verimi % 99, sülfür geri kazanım verimliliği % 78 ve enerji geri kazanım verimliliği 78,6 % olarak olumlu sonuçlara ulaşılmıştır [16].

Coughtrie ve diğeri yaptıkları çalışmada, gaz-lift çürütücü akışlı merkezi bir taslak tüp, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programından kullanılarak farklı türbülans modelleri araştırılmıştır. Sonuç olarak reaktör içinde akış tahminleri üzerinde yapılan sayısal analizlerde The  $k-\omega$  Shear-Stress-Transport (SST), Renormalization-Group (RNG)  $k-\epsilon$ , Linear Reynolds-Stress-Model (RSM) and Transition-SST models, uygulanan modellerinin daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Transition-SST models modeli karıştırma davranışı yakalama ve güvenilir tahminine en uygun metod olduğu tespit edilmiştir. Fluent-13.0sp2 ve OpenFOAM-2.0.1 iki bağımsız sonlu hacimli çözümleri karşılaştırılarak en uygun metod seçimi üzerine çalışmalar yapılmıştır [17].

Wu yaptığı çalışmasında, anaerobik çürütücü gaz karıştırma sisteminin karakteristik özelliklerinin bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli ile geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışılan dört farklı gaz karıştırma tasarımları birbiri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Her tasarım için akış alanlarının sıvı olduğunu varsayarak bir newton kuvvet yasası, bir fazlı akış modeli kullanılarak elde edilmiştir. Yaygın olarak kullanılan Fluent 14.5 CFD yazılımı, çürütücünün gaz-sıvı ve iki-fazlı akışını simüle etmek için uygulanmıştır. Dört farklı karıştırıcı tasarımının, her tasarım için akışkan hareketinin bir niteliksel açıklamalarını yapabilmek için ortalama hız ve her ortalama hız için bir tekdüzelik indeksinin performans karıştırmasını değerlendirmek için kullanılan gaz kabarcıkları, sıvı fazın akım alanlarının sayısal kimliklerin tespit edilmesi, her tasarım için performans karşılaştırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Buna ek olarak, bir topak dağılmasının sayısının hesaplanması için teorik uygulama ile birlikte karşılaştırılması ve gaz için hız seçiminin araştırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, biyolojik süreçler ve simülasyon sonuçları dikkate alınarak karıştırma şiddetinin tespiti üzerinde çalışmalar yapılmıştır [18].

Wu çalışmasında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanılarak ve yapılan literatür taraması elde edilen bilgiler ile biyometan üretmek ve biyokimyasal dönüşüm teknolojisinde yararlanılarak biyohidrojen ve biyoreaktörleri araştırmak için çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak, biyomalzeme tanımlanmıştır. İkincisi, altı majör biyoreaktörlerde CFD kullanımı belgelenmiştir. Çalışılan biyoreaktörle şunlardır: anaerobik lagün, fişli-akış çürütücü, tam-karışım çürütücü, anaerobik biyohidrojen, anaerobik biyofilm reaktörü ve foto-biyo olarak söylenebilir. Üçüncü olarak, ön-işleme ve çözümlü yanı sıra son işlemlerinin yapılmasını içeren CFD simülasyonu stratejisi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Dördüncü, CFD uygulamaları biyo-enerjide karşılaşılan zorlukların analizleri için sunmuş olduğu fırsatlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak ısı transferi, kütle transferi, ışık transferi, türbülans ve çok fazlı akış ile ilgili belirli görüş ve öneriler yapılmıştır. Biyo-yenilenebilir enerji alanında yapılan CFD araştırmanın en temel amacı fiziksel ve biyolojik süreçlerinin önemli hususlarını içeren kapsamlı bir model geliştirmektir [19].

Fanelli ve diğerleri yaptıkları çalışmada, hem kirletici emisyonları azaltılması ve hem petrolden bağımlılığı azaltılması için yapılan sıkı kamusal düzenlemeler alternatif enerji kaynaklarına yönelik ilgiyi artırmıştır. Bu durumda, yeni çözümler belirlemek için birçok çabalar yapılmaktadır. Son iki yılda, otomotiv endüstrisinde, içten yanmalı motor uygulamaları için birçok alternatif yakıtların kullanılması incelenmiştir. Özellikle, bu çalışmada sentez gazının buji ateşlemeli (SI) motorlarda kullanımı üzerinde durulmuştur. Birincisi, sentetik gazların yanma sürecinin kapsamlı bir analizi yapılmıştır. Doğru laminer alev hızı ve korelasyon yakıt oksidasyonunu karakterize etmek üzerine çalışmalar yapılmıştır. Sonra, bu korelasyon CFR motoru yanma sürecini simüle etmek için bir CFD modeli uygulanmıştır. Farklı motor çalışma şartlarında (sıkıştırma oranı 6: 1-10: 1 ile ve 0,6-0,8 yakıt ekivalan oranı ile) farklı  $H_2 / CO$  oranları ile hava karışımlarına (50:50 ile arasında 100:0  $CO: H_2$  yakıt mol oranı) sahip kabul edilmiştir ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yanma esnasında, ateşleme süresi ve hızının yanık açısını, her koşulda ısı salınımı ve benzinli motorlarda yanma işlemini karakterize etmek için çalışmalar yapılmıştır [20].

Ariyaratne ve diğerleri çalışmalarında, çevresel etkiler ve enerji maliyetleri yüksek olduğu için birçok çimento fabrikaları fosil yakıtların yerine atık kaynaklı yakıtları kullanımı eğilimindedir. Bununla birlikte, bu atık yakıtların kullanılmasının işletme ekonomisini geliştirmede kullanılması ciddi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bir çimento döner ocağında üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modelleme çalışması yapılmıştır. Simülasyonlar CFD yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kömür yanı sıra et ve kemik unu (MBM) gibi yakıtların yanmalarının simülasyonları yapılmıştır. Besleme pozisyonu ve yakıt partikül büyüklüğünün yakıtların yanma karakteristiklerine olan etkileri araştırılmıştır. Halka yakıt besleme modeli merkezi tüp yakıt beslemeli modeline göre daha hızlı gaz çıkartma ve karakteristik yanma özellikleri verir. Bunun etkisi daha büyük partiküller için önemlidir. Bu nedenle gaz çıkartma, küçük parçacıklar için çok daha hızlıdır. Belirli bir yakıt için karakter parçacık negatif etkisi yüksek sabit karbon içeriğine

sahip yakıtlar için daha önemli olduğunu çalışmalar sonucu elde edilmiştir. Belirli bir yakıt için karakter tükenmişlik alt kitle ağırlıklı ortalama parçacık çapı daha büyük olması negatif bir özelliktir. Aynı zamanda, büyük bir kitle ağırlıklı ortalama parçacık çapı negatif etkisi, yüksek sabit karbon içeriğine sahip yakıtlar için daha önemlidir. Ancak, zayıf karakter tükenmişlik gaz sıcaklığı üzerindeki etkisi yakıtın sabit karbon içeriğine bağlıdır [21].

Galletti ve diğerleri çalışmalarında, H<sub>2</sub> bakımından zenginleştirilmiş yakıtların yanmasında emisyonlarının termal, N<sub>2</sub>O, NNH yanı sıra HNO/NO<sub>2</sub> kinetik modelleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak yapılan simülasyonu ile değerlendirilmeler ve karşılaştırmalar yapılmaya çalışılmıştır. Üretim Analizi sonucunda iki farklı detaylı kinetik şemaları ile yürütülen modellerin bir oranı türetilmiştir. Modelleri, üç değişik O<sub>2</sub> içeriği ile CH<sub>4</sub> / H<sub>2</sub> karışımı ile beslenir ve işletilen sıcak Coflow brülör Adelaide Jet verileri kullanılarak test edilmiştir. Hafif yanma koşulları karşısında NO ölçümlerin iyi bir model uygulanabilirliğini gösteren çok tatmin edici tahminler ile üç olgu elde edilmiştir. NNH önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir [22].

Kim ve diğerleri çalışmalarında, PEMFC uygulamaları için 20 kWe 'lık biyogaz tesisini destekleyici çalışmalar yapılmıştır. Biyogazda ham malzeme içinde bir reformasyon madde olarak işlev olması, üründe karbon monoksit (CO) konsantrasyonunu artırır olabilir ve buda karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) yüksek konsantrasyonda içermesi sonuçlarını meydana getirebilir. Hammadde bileşimi ve harici ısı temini ile ürün içerisinde hem CO konsantrasyonu, hem de metan (CH<sub>4</sub>) konsantrasyonu üzerine olan etkilerini araştırmak için bir sayısal model geliştirilmiştir. Hem CH<sub>4</sub> dönüşüm ve hem CO konsantrasyonunun ürün içerisinde artan harici ısı temini ve CO<sub>2</sub> miktarının artması ile artacağı gözlenmiştir. Yüksek CO<sub>2</sub> konsantrasyonu veya yüksek çalışma sıcaklığı reaksiyonları olumlu olarak uyarır ama aynı zamanda CO üretim lehine dengeyi kaydırır. Performanslı ısı sağlama yöntemi kontrol edilmesiyle bu yöntem daha da geliştirilebilir. Yaklaşık 650 °C üniform sıcaklık dağılımı kullanılarak, CH<sub>4</sub> dönüşümü artarken, CO konsantrasyonu düşer. Bu sonuç, buhar sıcaklığının kontrolünün biyogaz tesislerindeki önemini göstermektedir [23].

Nikpeya ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında, biyogaz ile çalışırken, daha önce yayınlanmış çalışmaların düşük ısıtma değerine sahip yakıtın motor değişiklikleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu çalışmada, herhangi bir motor modifikasyonu

olmadan mikro kombine ısı ve güç (CHP) tesisatlarında biyogaz ve doğal gaz yakıt karışımının mümkün olması durumunda, biyogaz payı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu, mevcut CHP kurulumlarında CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur ve biyogazın, pahalı doğalgaz kalitesine yükseltmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, 100 kW mikro gaz türbinde (MGT) tam gün ve yarım yüklerde besleme miktarları değişen doğal gaz ve biyogaz karışımlarını performansları ve emisyonları deneysel çalışmalar ile değerlendirilmiştir. CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır [24].

Şarapatka ve diğerleri çalışmasında, çiftlik gübresi, yaklaşık 30 gün boyunca hava geçirmez bir çürütücülerde anaerobik fermantasyon işlemine tabi tutulmuştur. Yıllık biyogaz üretimi üç farklı üretim seviyelerine belirgin günde büyük baş hayvan birimi başına 0,9 m<sup>3</sup>: biyogaz üretimi olan bir yaz dönemi, bir geçiş dönemi ve kış dönemi, 1,1, 0,75 ve 0,55 m<sup>3</sup> sırasıyla günde hayvan birim başına biyogaz üretilmektedir. Araştırma çiftlik gübresi anaerobik fermantasyon ve biyogaz üretimini etkileyen faktörler üzerinde duruldu. Bu yazıda tartışılan faktörler üç farklı gruba ayrılabilir: (1) ana bağımsız faktörler (doğal koşullar, yaz ve / veya kış beslenmeye geçişi); (2) işletme koşulları (yem kompozisyonu, aerobik aşama) etkilenen başlıca faktörler; ve (3) optimum çalışma koşulları (yem kalitesi, miktarı ve yatak kalitesi, çiftlik gübresi kaldırma teknolojisi) altında fermantasyonu etkileyen faktörler olabilir [25].

Selim ve diğerleri çalışmalarında, H<sub>2</sub>S asit gazı akımı içinde, azot ve karbon dioksit varlığının etkisi incelenmiştir. H<sub>2</sub>S akımı içinde N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> oranlarının % 30'a kadar konsantrasyonları incelenmiştir. Tüm olgular, %100 H<sub>2</sub>S gaz akımının başlangıçtaki durumlarıyla karşılaştırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. CO<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub> enjeksiyonunun, sıcaklık ölçümlerinde H<sub>2</sub>S akışındaki alev sıcaklığını düşürdüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte, asit gazı akımı içindeki karbon dioksit artışı SO<sub>2</sub> mol parçacıklarının artırmış olduğu gözlenmiştir. Bunun yanısıra, H<sub>2</sub>S gaz akımı içinde azot bulunmasının önemli ölçüde tepkime sürecini etkilemediği sonucuna varılmıştır. H<sub>2</sub>S yanması esnasında Oksijen artışı, yüksek miktarda SO<sub>2</sub> oluşturduğu tespit edilmiştir [26].

Jatana ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında, 1000W 'dan az küçük biyogaz yakıtlı motorların performansını değerlendirme üzerine çalışılmıştır. Enerji üretimi için yüksek enerji verimliliği stratejileri araştırılmıştır. Biyogaz ile çalışan tek silindirli, dört zamanlı buji-ateşlemeli motorlar üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Silindir basıncı, krank açısı, fren

gücü, hava ve yakıt akış oranları ve egzoz emisyonları ölçümleri yapılmıştır. Motor silindir içi basınç ve güç döngüsü varyasyonları ve çeşitli yükleme koşulları için değerlendirilmeler yapılmıştır [27].

Hur ve diğerleri çalışmalarında, enerji talebi arttıkça, enerji arzı gelişmekte olan ülkelerin fosil yakıtlara dayalı olacak CO<sub>2</sub> emisyonu da en azından aynı miktarda artması muhtemeldir. Toplam küresel enerji, çevre ve iç ve dış talebin hızla artması ile birlikte, yenilenebilir enerji gelecek için kaçınılmaz bir enerji kaynağıdır. Bu bağlamda, biyogaz yakıtı ile çalışan mikro gaz türbinleri (MGT) umut verici bir çözüm olarak kabul ediliyor. 60 kW mikro gaz türbininde MGT sistemi yakıtlı bir biyokütle için optimal tasarım üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Biyogaz tesislerinde kükürt giderme kulesi ve kükürt emme filtresi ile üreticinin teknik özelliklerini ve performans simülasyonu kullanarak temel modelleme saha testi üzerine araştırmalar yapılmıştır [28].

Adouane ve diğerleri bu çalışmada, biyokütleden elde edilen düşük kalorili gazların yanmasına ilişkin bir çalışma yürütmüşlerdir. Bahsi geçen düşük kalorili yakıtlar, bünyesinde NH<sub>3</sub> bulundurmakta olup, ilgili çalışmada, bu nedenle açığa çıkan yakıt kaynaklı NO<sub>x</sub> üzerinde durulmuş, NH<sub>3</sub>'ün NO<sub>x</sub>'a dönüşümü üzerine çalışılmalar yürütülmüştür [29].

Huynh ve diğerleri yaptıkları çalışmada, üç farklı biyokütle hammaddesini kullanarak gazlaştırma yapmışlar ve elde edilen biyogazları yakarak yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonlarını incelemişlerdir. Kullandıkları gazlaştırıcının ve yakıcının güçleri sırasıyla 800 kW ve 879 kW olup, sistem birbirine entegre çalışmaktadır. Yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonları, farklı güç ve eşdeğerlik oranları için ölçülmüştür [30].

Bhoi ve diğerleri yaptıkları çalışmada, üretici gaz (producer gas) yakan ön karışımli bir brülörün aksenel alev sıcaklığını ve emisyon karakteristiklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada kullanılan brülör 150 kW'tır. Yapılan çalışma neticesinde, döngü açısının (swirl angle) NO<sub>x</sub> ve CO emisyonlarını doğrudan etkilediği ortaya konulmuştur [31].

Leung ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında, farklı bileşimlerde biyogazları yakmışlardır. Yapılan yakma işleminde, biyogaza belli oranlarda hidrojen ilavesi yapılarak, hidrojen ilavesinin, biyogaz yakıt hızına ve kararlılık sınırlarına olan etkilerini araştırmışlardır [32].



Hosseini ve diğeri yapmış olduğu çalışmada, temiz teknoloji stratejileri ışığında biyogazın alevsiz yanmasının yanma karakteristiklerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada 3-boyutlu bir yanma odası tasarlanmış ve bu yanma odasında biyogaz alevsiz olarak yakılmıştır [33].

Watson ve diğeri yaptıkları çalışmalarında, sentetik yakıt ve biyogaz yakıt karışımlarının emisyon bakımından bir karşılaştırmasını hem deneysel hem de kinetik modellerle gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan deneysel düzenek, atmosferik şartlardaki jet-duvar durgun alev sistemidir [34].

Somehsaraei ve diğeri yapmış oldukları çalışmada, doğrulanmış termodinamik bir model kullanan biyogaz yakabilen bir mikro gaz türbinin performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada bir mikro gaz türbinini kullanılmakta, kullanılan bu mikro gaz türbininde de biyogaz yakıtı yakılmaktadır. Yapılan çalışmada, kompresör çıkış sıcaklıklarına farklı güç durumlarına göre, geliştirilen termodinamik modelin doğruluğu ortaya koyulmaktadır [35].

Sethuraman ve diğeri yapmış oldukları çalışmada, azot miktarı kontrol edilebilen pilot bir biyokütle gazlaştırma tesisini ve bu tesisten elde edilen üretici gazın yanma sonu  $NO_x$  emisyonlarını araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan gazlaştırıcı tip akışkan yataklı bir gazlaştırıcı olup hammaddesi biyokütledir. Gazlaştırma sonucu elde edilen üretici gazın içeriği birbirinden farklı olup, elde edilenlerden hiç birisi yüksek oranda  $CH_4$  içermemektedir [36].

### 3. BİYOGAZ VE YANMA

Bu bölümde biyogaz içeriği ve yanma ile ilgili teorik bilgiler sunulmuştur. Biyogaz elde etmekte kullanılan atık ve gübrelerin sahip oldukları potansiyeller ve içeriğindeki gazların etkileri anlatılmıştır.

#### 3.1. Biyogaz

Biyogaz, organik maddenin oksijensiz ortamda bozulması sonucunda oluşan üründür. Doğada da yaygın olarak görülen bu mekanizmaya bazı örnekler; bataklıklarda, deniz tabanlarında, sıvı dışkı çukurlarında oluşan bozulmalardır. Biyogaz, ağırlıklı olarak metan ve karbon dioksitten, ayrıca eser miktarda da diğer gazlardan oluşmaktadır. Tipik bir biyogaz kompozisyonu %55-70 metan (CH<sub>4</sub>), %30-45 karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), ve eser miktarda hidrojen, hidrojen sülfür, karbon monoksit ve azot gazlarından oluşur. Biyogazın fiziksel özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.1’de verilmiştir [37].

Çizelge 3.1. Biyogazın genel özellikleri [37]

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Enerji İçeriği	6,0,-6,5 Kwj/m <sup>3</sup>
Yakıt Eşdeğeri	0,60-0,65 L petrol/m <sup>3</sup>
Yanma Değerleri	%6-12
Yanma Sıcaklığı	650-750 °C
Kritik basınç	75-89 bar
Kritik Sıcaklık	-82,5 °C
Yoğunluk	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Koku	Bozuk yumurta (sülfürü arındırılmış biyogaz) Kokusu zor farkedilir)
Molar kütle	16,043 kg/kmol

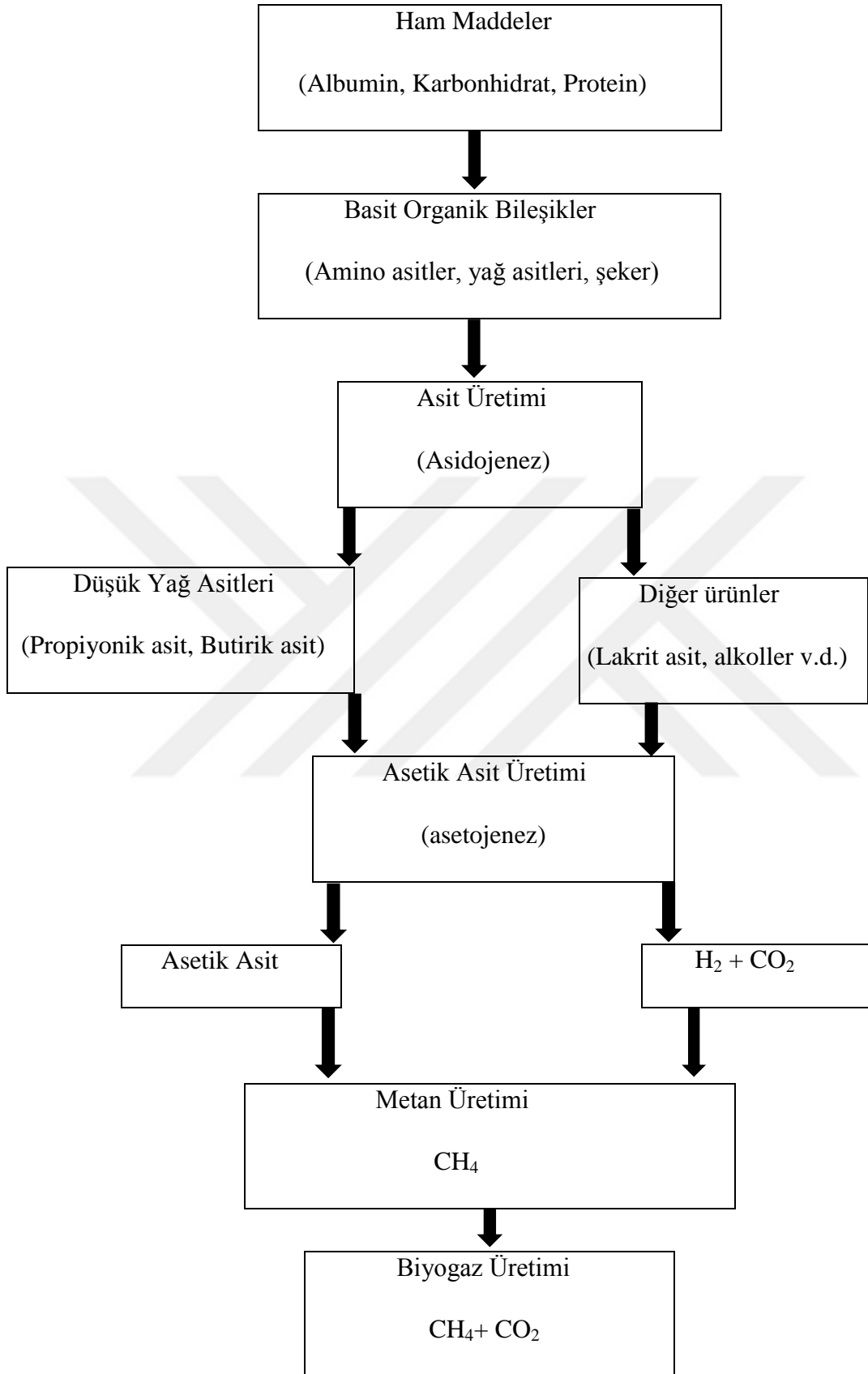
Biyogaz bileşenleri, kullanılan tesis tipi ve hammadde kaynağına bağlı olarak farklı özellikler gösterebilir. Uzun vadeli süreçlerde biyogaz bileşenleri belirli aralıklarla kontrol edilmelidir. Biyogazın karakteristik özellikleri ve içinde bulunabilecek yabancı maddeler (safsızlıklar) aşağıdaki Çizelge 3.2 'de listelenmiştir [37].

Çizelge 3.2. Biyogazın karakteristik bileşenleri ve bulunabilecek safsızlıklar [37]

Bileşik	İçerik	Etki
CO <sub>2</sub>	%25-50	-Kalorifik değeri düşürür. -Metan içeriğini ve sistem çalışmasını arttırır. -Gaz ıslak ise korozyona neden olur.
H <sub>2</sub> S	%0-0,05	-Ekipman ve boru sistemlerinde aşındırıcı etki yapar. -Yanma sonrası SO <sub>2</sub> emisyonları veya tam yanmama sonucu H <sub>2</sub> S emisyonları oluşur(Sınır değer % 0,1 olmalıdır.)
NH <sub>3</sub>	%0-0,05	-Yanma sonucu oluşan NO <sub>x</sub> emisyonları yakıt hücrelerine zarar verir.
Su Buharı	% 1-5	-Ekipman ve boru sistemlerinde aşındırıcı etki yapar. -Boru sistemi ve nozullarda donma riski oluşturur.
Toz	>5µm	-Nozulları ve yakıt hücrelerini tıkar.
N <sub>2</sub>	%0-5	-Kalorifik değeri düşürür.
Siloksan	0-50mg/m <sup>3</sup>	-Motor sistemlerine zarar verir ve aşındırır.

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere biyogazın bileşimi değişiklik gösterebilmektedir. Bu farklılık girdi olarak kullanılan maddeler, fermantasyon işleminin süreçleri ve mikrobiyolojik değişikliklerden dolayı oluşmaktadır [37].

Biyogaz oluşumu farklı mikrobiyolojik süreçlerde gerçekleşmektedir. Prosesin başarılı olarak devam ederek metan oluşumunu kesintisiz olarak sürdürülebilmesi için bozulma aşamalarının birbiri ile uyumlu olması gerekir. Bozulma aşamaları sırasıyla; hidroliz, asitojenez, asetojenez ve metanojenez evreleri olarak dörde ayrılır. Anaerobik bozulmanın şematik gösterimi aşağıdaki gösterilmiştir [37].



Şekil 3.1. Anaerobik bozulma akım şeması [37]

İlk aşama olan “hidroliz” aşamasında suda çözünmeyen kompleks maddeler (karbonhidratlar, albüminler, yağlar, vb.) suda çözünebilen daha basit organik yapılara (aminoasitler, şeker, yağ asitleri, vb.) dönüştürülür. Buna katılan hidrolitik bakteriler, malzemeyi biyokimyasal olarak parçalayan enzimleri serbest bırakırlar. Birinci aşamada suda çözünebilen forma dönüştürülen ürünler ise “asitojenesis” aşamasında daha düşük moleküler ağırlıktaki organik asitlere, hidrojen ve karbondioksite dönüştürülür. Ortam koşullarına ve ortamda bulunan bakteri türlerine göre oluşan ürünler değişiklik gösterebilir. Üçüncü aşama olan “asetojenesis” de ikinci aşamada oluşan ürünler anaerobik oksidasyon ile karbon dioksit ( $CO_2$ ) ve hidrojen gibi basit organik asitlere ve bunun yanı sıra asetik asite ( $CH_3COOH$ ) dönüştürülür. Biyogaz oluşumunun son aşaması olan “metanojenesis” de öncelikle asetik asitler, hidrojen ve karbondioksit, mutlak anaerobik metanojenler hidrojen ve karbondioksitten metan üretirken, asetoklastik metan oluşturucular asetik asidi ayrıştırarak metan oluştururlar [37].

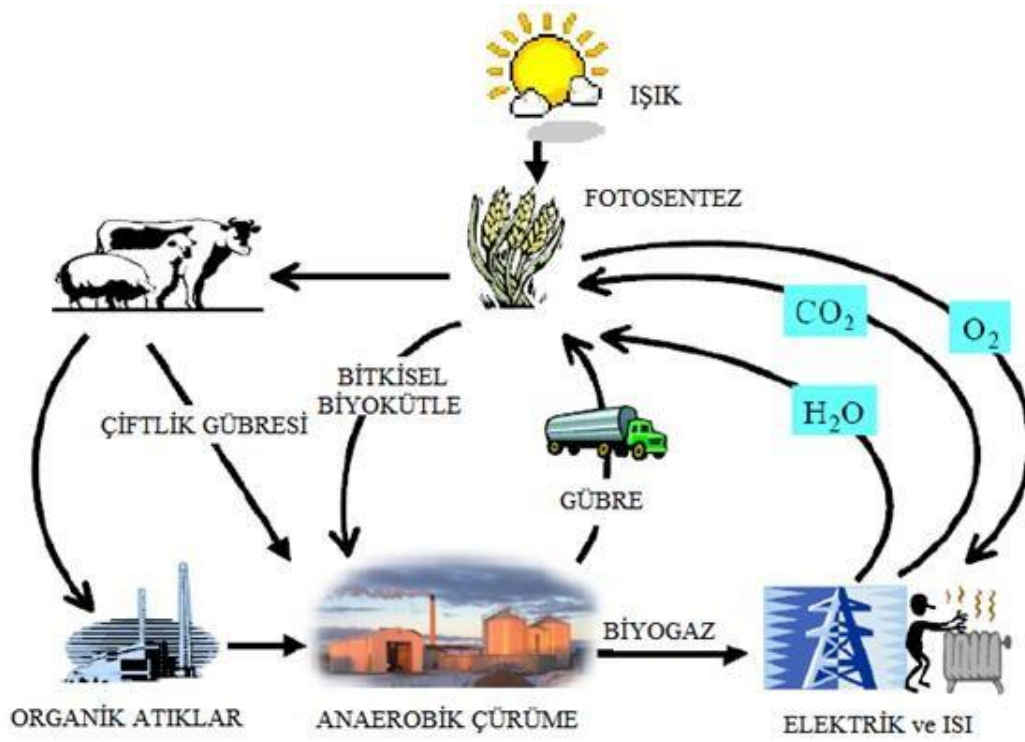
Oksijensiz bozulmanın dört aşaması aslında tek basamaklı bir proseste paralel olarak aynı zamanda gerçekleşir. Ancak her bozulma aşamasının bakterileri farklı yaşam alanı taleplerine sahip oldukları için (Örneğin pH değeri, ısı) proses tekniği bakımından bir uzlaşmanın yaratılması gerekir. Metanojik mikroorganizmalar düşük büyüme hızları nedeniyle prosesin en zayıf halkası olduklarından ve rahatsız edici etkilere karşı çok hassas tepki vermelerinden ötürü, çevre koşullarının metan oluşturan bakterilerin taleplerine uydurulması gerekmektedir [37].

Biyogaz tesislerinde kullanılan maddeler; içeriğinde karbonhidrat, protein, yağ, selüloz ve hemiselüloz gibi ana bileşenleri bulunduran biyokütle biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanılabilir [37];

- Hayvan atıkları (dışkı, kesimhane)
- Zirai atıklar
- Yenilenebilir hammaddeler
- Orman ve endüstriyel atıklar
- Deri ve tekstil endüstri atıkları
- Kâğıt endüstri atıkları
- Gıda endüstri atıkları
- Sebze, meyve, tahıl ve yağ endüstrisi atıkları

- Bahçe atıkları
- Yemek atıkları
- Hayvan dışkıları (büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık, tavukçuluk)
- Şeker endüstri atıkları
- Evsel katı atıklar
- Atık su arıtma tesisi çamurları

Biyogaz tesislerinde kullanılabilen hammaddeler ve bunların sürdürülebilir döngüsü aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.2. Biyogazın sürdürülebilir döngüsü [38]

Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz miktarları ve biyogazdaki metan oranları atık gaz hacminin yüzdesi cinsinden Çizelge 3.3 'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz ve biyogazdaki metan miktarları [39]

KAYNAK	BİYOGAZ (Litre/kg)	METAN ORANI (% Hacim)
Sığır Dışkısı	90-310	65
Kanatlı Dışkısı	310-620	60
Domuz Dışkısı	340-550	65-70
Buğday Samanı	200-300	50-60
Çavdar Samanı	200-300	59
Arpa Samanı	290-310	59
Sebze Artıkları	330-360	Değişken
Ziraat Atıkları	310-430	60-70
Çimen	280-550	70
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290	58
Atık Su Çamuru	310-800	65-80

Biyogaz tesisinin ana bileşenleri şu şekilde sıralanabilir;

1. Toplama ve karıştırma tankları
2. Atık havuzları (reaktörler)
3. Atık su havuzu
4. Gübre tesisi
5. Biyogaz temizleme üniteleri
6. Kojenerasyon sistemi ve elektrik bağlantı ekipmanları

Mevcut atıklar, atık özelliklerinin muhafaza edilmesi ve atıktan kaynaklı olumsuz koşulların engellenmesi için geçici dışkı deposunda toplanır. Burada toplanmış olan atıklar ana dışkı deposuna alındıktan sonra şartlandırma tanklarına yönlendirilir. Anaerobik çürütücüde kullanılması gereken atıklar hijyenizasyon sistemine transfer edilir. Atığın kimyasal ve biyolojik özelliklerine bağlı olarak hijyenizasyon safhasının kullanımı seçilir. Bu aşamada, bakteriler, virüsler ve parazitler pasif hale getirilirler. Bundan sonraki aşamada, dışkılar anaerobik çürümeye maruz kalmak üzere fermentöre alınır. Anaerobik çürüme süreci sonucunda kalan ve gübre olarak isimlendirilen materyal gübre deposunda depolanır. Organik bileşikler çoğu, özellikle de nitrojen anaerobik çürüme sürecinde

mineralize olur ve bitkiler tarafından kolay ulaşılabilir bir forma gelir. Nitrojenin bu özelliğinden kaynaklanan gübre iyileştirme işlemleri tesisin ilgili bölümünde gerçekleştirilir. Gübre iyileştirme tankında geliştirilen gübre, özellikle tarımsal amaçlı gübre uygulamaları için kullanıma hazır hale getirilir. Anaerobik çürüme esnasında oluşan biyogaz toplanarak biyogaz saflaştırma işlemleri için biyogaz iyileştirme tankına alınır. Elektrik ve ısı üretimi için kullanıma hazır hale getirilen biyogaz kojenerasyon tesislerine (CHP) gönderilir [37].

### 3.2. Yanma

Yanma işlemi yakıt ve oksitleyicinin (normal olarak hava) bileşimini içeren ısı ve yanma ürünlerinin açığa çıktığı kimyasal bir reaksiyondur. Bu olay kimyasal ve fiziksel işlemlerin etkileşiminden meydana gelmektedir. Genelde belirleyici sınıflandırma biçimi yakıtın meydana geldiği reaksiyon bölgesine yakıtın sağlanma biçimine göre olan sınıflandırmadır. Bu dikkate alındığında Yanmayı üç kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar difüzyon (önkarışimsız) yanması, önkarişimli yanma ve kısmi önkarişimli yanmadır. Önkarişimsız türbülanslı yanmada, oksitleyici ve yakıt ayrı olup, yanma türbülanslı karışım işlemi ile eş zamanlı olmaktadır. Ön karışimli yanmada yakıt ve oksitleyici yanma bölgesine girmeden önce tamamen karışır. Daha sonra kimyasal reaksiyon oranı bir ateşleme yüzeyi ile sıcak yanma bölgesinde soğuk reaksiyon olmayan bölgeye doğru bir yayılma olur [40].

#### 3.2.1. Emisyon

Günümüzde hava kirliliği, özellikle şehir hayatındaki insanlarda çeşitli akciğer hastalıkları koah, kronik obstrüktif v.s. artmasına neden olmaktadır. Örneğin; hava kirliliğinden kaynaklanan kurşunun kan hücrelerinin olgunlaşmasını ve gelişmesini engellediği, idrarda ve kanda birikerek insan sağlığını olumsuz yönde etkilediği, karbon monoksit (CO)'in ise, hayati faaliyetlerin devamı için azami önem taşıyan kandaki hemoglobinin ile birleşerek oksijen taşınmasını dikkate değer belirli oranlarda engellediği bilinmektedir. Bunların yanı sıra kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>)'in, akciğer uzantılı rahatsızlıklara sebebiyet verdiği bilinmektedir. Günlük hayatımızdan bunlara örnek vermek gerektiğinde üst solunum yollarında belirgin, boğucu ve tahriş edici etkileri vardır. Özellikle yaşam alanlarında ve diğer ortamlarda duman olarak temas edildiğinde akciğerden alveollere kadar ulaşarak olumsuz etki yapmaktadır. İnsan hayatında en belirgin ortaya çıkan rahatsızlıklar şöyle sıralanabilir; Cilt



hastalıkları, saç dökülmesi, akciğer hastalıkları ve kansere yol açtığı söylenebilir. Tüm canlı hayatı dikkate alındığında, bunlara ilaveten kükürt dioksit ve ozonun bitkiler üzerinde çok ciddi zararlı etkileri olup; özellikle ozon, meyve ve sebze yetiştiriciliğinde hiç de göz ardı edilemeyecek büyük ölçekli ürün kayıplarına sebep olmakta ve ormanlardaki yaşam alanlarına ve canlılara zarar vermektedir.

### 3.2.2. Yanmanın reaksiyon kinetiği ve termodinamiği

Yanma, ayrı bir biçimde reaksiyona giren ve ürünlerin enerjilerinden elde edilen kimyasal reaksiyonları devam ettirici olarak serbest enerjileri içerir. Yanma işlemi ile açığa çıkan enerjiyi hesaplamak için her bir kimyasal türün enerjisi ya onun iç enerjisi ya da entalpisi yoluyla aşağıdaki gibi verilebilir [40].

$$H = U + pV \quad (3.1)$$

H entalpiyi, U iç enerjiyi ve pV sistem üzerinde yapılan mekanik enerjiyi gösterir. İç enerjinin ve entalpinin ölçülmesi mümkün değildir. Bundan dolayı diğer bütün enerjiler ile ilgili standart bir durum seçilmesi gereklidir.

Bir reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanırsa;



Burada  $s_A$  ve  $s_B$ , A ve B reaktantları için stokiometrik katsayıları göstermekte,  $s_P$  ve  $s_Q$  ise P ve Q ürünleri için stokiometrik katsayıları temsil etmektedir.

Genel kimyasal reaksiyon için entalpi değişimi reaksiyona giren ve ürünlerin standart oluşum entalpilerinin farkı olarak aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.

$$\Delta H_{298}^\phi = \sum s_x \Delta H_{f298}^\phi (X) \quad (3.3)$$

Burada  $\Delta H_{298}^\phi$  standart koşullarda reaksiyondaki entalpi değişimidir.  $s_x$  reaktantlar için negatif, ürünler için pozitif olan stokiometrik bir faktördür.  $\Delta H_{f298}^\phi$  reaktant ve ürünlerin

kJ/mol biriminde standart oluşum entalpileridir. Kimyasal reaksiyonun davranışını miktar olarak tanımlamak için ürünlerin konsantrasyon ve oran sabitleri biçiminde kimyasal türlerin konsantrasyonlarındaki değişim oranını belirten bir oran kanunu aşağıdaki gibi tanımlanır [40].

$$-\frac{1}{s_A} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{s_B} \frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{s_P} \frac{d[P]}{dt} = -\frac{1}{s_Q} \frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (3.4)$$

Burada  $k$  oran sabitini,  $a$  ve  $b$  reaksiyon derecesini göstermektedir. Oran sabiti  $k$  genellikle sıcaklığa bağımlı ve konsantrasyondan bağımsızdır. Oran sabiti genellikle Arrhenius formunda şu şekilde ifade edilir [40]:

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3.5)$$

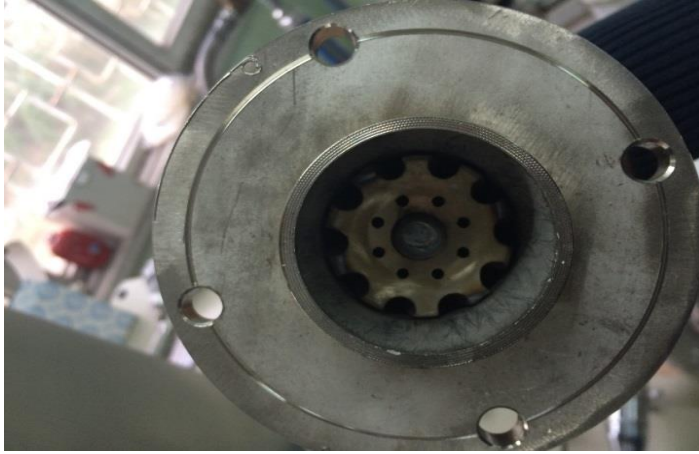
Burada  $A$  Arrhenius faktörü ( $k$ 'nin birimi ile aynı birimde),  $E$  reaksiyonun aktivasyon enerjisini (kJ/mol),  $R$  universal gaz sabitini ve  $T$  sıcaklığı (K) göstermektedir [40].



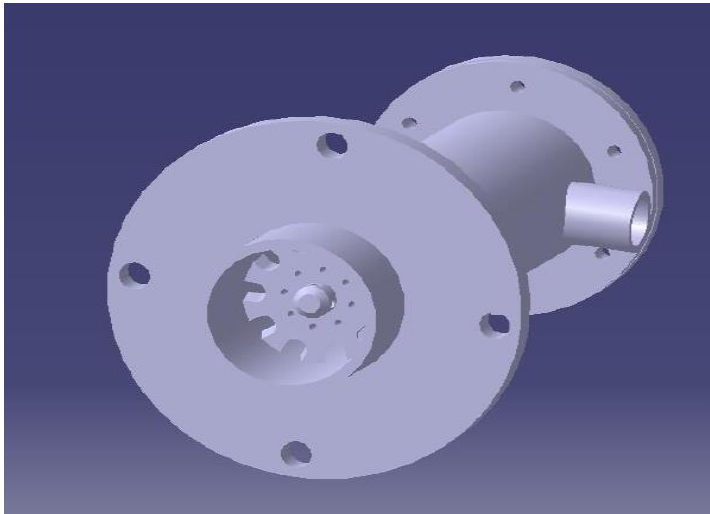
## 4. DENEYSEL SİSTEM VE ÇALIŞMA

### 4.1. Deneysel Yöntem

Bu tez çalışmasında biyogazların, ‘‘114M668’’ kodlu, ‘‘Model bir yanma sisteminde kömür gazlarının yanma performanslarının ve emisyon parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi’’ isimli TÜBİTAK-1005 projesi dahilinde imalatı yapılan, farklı ısı değer aralıklarına sahip gazları yakabilecek brülörler ve yanma odası kullanılarak yakılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada kullanılan brülörlerin resimleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilen tüm brülörler, metanı ve farklı ısı değer aralıklarında bulunan yakıtları yakabilecek kesitlerde tasarlanmıştır.



Şekil 4.1. Ön karışimsız metan brülörü görünüşü



Şekil 4.2. Ön karışimsız metan brülörünün katı model görünüşü

Şekil 4.3 'de ise, yukarıda bahsi geçen brülörlerin bağlanabildiği, eksenini boyunca belirli aralıklarla prob delikleri bulunduran yanma odasının resmi gösterilmiştir. Şekil 4.3 'de gösterilen yanma odasının boyutları uzunluk olarak 1 m ve çap olarak da 0,4 m'dir. Yanma odası, paslanmaz çelikten imal ettirilmiş ve daha estetik bir görünüme sahip olması için kumlama yapılmıştır. Şekil 4.3 'den de görülebileceği gibi yanma odası üzerinde, yanma odası girişinden itibaren 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m'de ve bacada olmak üzere 6 adet prob delikleri bulunmaktadır. Bu delikler sayesinde, yanma odası içerisindeki aksiyel ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri alınabilmekte, metan ve biyogazların yanma karakteristikleri karşılaştırılabilmektedir. Şekil 4.3 'de görüldüğü gibi, yanma odasının alev bölgesini görebilmek için, yanma odası üzerine bir adet gözetleme camı yerleştirilmiştir. Bu gözetleme camı, yüksek sıcaklıklara dayanabilen temperli camdan imal ettirilmiştir.



Şekil 4.3. Yanma odası

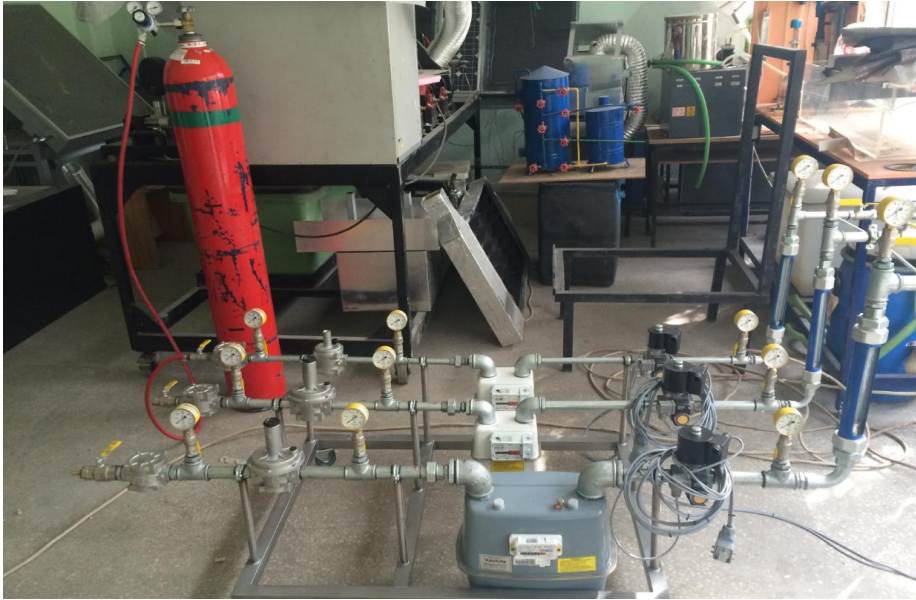
Yakma sisteminin güvenliğini sağlamak için sisteme bir adet kontrol panosu entegre durumdadır. Bu kontrol panosuna ilişkin detaylar Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Sistemde bulunan bu kontrol panosunun, gaz hattında bulunan selenoid ventillerin açma/kapama işlemlerini gerçekleştirmekten başka bazı görevleri de bulunmaktadır. Bunlardan birisi, sistemde bulunan pilot hattını devreye almak ve devreden çıkarmaktır. Bu kontrol panosunun diğer bir işlevi de yanma odasının baca kısmına bağlanmış olan PT-100 tipi bir termokupldan aldığı verilere göre, set edilen değeri doğrultusunda sistemi, güvenlik nedeniyle kapatmaktır.



Şekil 4.4. Kontrol panosu

Şekil 4.5.'de, brülörlere gaz beslemesi yapmak için tasarlanan gaz hatları ve bu hatlarda kullanılan armatürler gösterilmiştir. Şekil 4.5 'de gösterilen hattın en arka kısmı metan gazı için kullanılacak olup, orta kısım, Çizelge 1.1'de gösterilen biyogaz yakıtlar için kullanılacaktır. Burada kullanılan hatların farklı şekilde olmasının nedeni, her bir yakıtın

aynı ısıl gücü sağlayabilmesi için gerekli olan yakıt debilerinin birbirlerinden farklı olması (ısıl değer azaldıkça gerekli yakıt miktarı artmaktadır) ve bu nedenle de bu hatlarda kullanılan boru çaplarının birbirlerinden farklı olması gereğidir. Şekil 4.5 'e bakıldığında, arka tarafta bulunan metan hattına, metan yakıtı bulunduran tüpün bağlanacağı görülmektedir. Bu tüp üzerinde, 200 bar 'da depolanan metan yakıtının basıncını 0-2,5 bar aralığına düşürebilecek regülatör bulunmakta ve bu regülatör çıkışı ile beraber, imal ettirilen gaz hattına bir hortum yardımıyla metan yakıtının girişi sağlanmaktadır. Gaz hattına giriş kısmındaki basıncı ölçmek için hatta yerleştirilen manometreyi geçtikten sonra, gelen gazın basıncını 21 mbar seviyelerine indirmek için regülatör bulunmaktadır. Regülatörden sonra, hattaki gaz basıncını gözlemlemek için hatta tekrar manometre yerleştirilmiştir. Bu manometreden sonra, toplam tüketilen yakıt miktarını belirleyebilmek için bir sayaç bulunmaktadır. Sayaçtan sonra, yukarıda bahsedilen elektrik panosu tarafından kontrol edilen selenoid ventil, selenoid ventilden sonra, anlık debi ölçümlerinin yapıldığı debimetre ve brülörden önce yerleştirilmiş olan karıştırıcıya girmeden önce son kez basıncın ölçüldüğü manometre bulunmaktadır. Bahsi geçen armatürler, metan ve biyogaz hattının her ikisinde de mevcuttur.



Şekil 4.5. Gaz hattı ve bu hatlardaki armatürler

Şekil 4.6 'da ise, yakma havası hattı görülmektedir. Bir önceki paragrafta bahsedilen tüm gaz yolu armatürleri, yakma havası hattında da bulunmaktadır. Bu hat sayesinde, metan ve biyogazların yanmasını gerçekleştirecek olan yakıcı hava beslemesi yapılmaktadır.





Şekil 4.6. Hava hattı ve bu hattaki armatürler

Şekil 4.7 'de ise, yakma havasının beslenmesini sağlamak için, sisteme entegre edilmiş bir kompresörün resmi gösterilmiştir. Bu kompresör sayesinde, yüksek basınçta hava depolanabilmekte ve yanma işlemi sırasında gerekli hava debisinin hatta beslenmesi sağlanmaktadır. Hava hattının girişinde bulunan pnömatik regülatör sayesinde, yüksek basınçta gelen hava, hatta olması gereken basınca düşürülmektedir.



Şekil 4.7. Hava kompresörü

Yukarıda bahsedilen tüm sistem ve ekipmanlar (brülörler dahil), bu tez kapsamında düşünülen metan ve biyogaz yakıtlarını yakmak için kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılmak istenen asıl hedef ise, bu sistem kullanılarak, ilgili yakıtların yanma ve emisyon parametrelerinin araştırılması ve karşılaştırılmasıdır. Bu kapsamda, Gazi Üniversitesi



Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü bünyesinde, yukarıda bahsedilen tüm yakma sisteminin dışında, yanma odası boyunca sıcaklık ve emisyon değerlerini elde etmek için bazı teçhizatlar bulunmaktadır. Şekil 4.8'de, emisyon ölçümlerinin yapılması için alınan baca gazı analizörü ve Şekil 4.9'da, özellikle alev bölgesinden alınacak ölçümler için tasarlanan yüksek sıcaklığa dayanıklı seramikten yapılmış gaz probu gösterilmiştir. Şekil 4.8 'de gösterilen analizör, % cinsinden O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>, ppm veya mg/m<sup>3</sup> cinsinden CO, NO, NO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını gösterebilmektedir. Sıcaklık ölçümleri için, mevcut olan R tipi yüksek sıcaklığa dayanıklı termokupl kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Taşınabilir baca gazı analizörü



Şekil 4.9. Seramik uçlu gaz probu

Şekil 4.3 'de gösterilen yanma odası kullanılarak yakılacak olan biyogazların yanma sonu ürünlerinin tahliye edilebilmesi için bir baca sistemi gerekmektedir. Bu bağlamda, bu tez kapsamında, bir baca sisteminin de tasarlanması ve imalatı gerekmektedir. Bu baca sisteminin, geniş girişli bir davlumbaza sahip olacak şekilde tasarlanması düşünülmüştür. Bunun amacı, yanma sisteminin bulunduğu ortamın daha düzgün bir şekilde tahliye edilmesini sağlamak ve yanma odasının dışında da açık alev çalışmalarının yapılmasını sağlamaktır. Ayrıca, bu baca sistemi ile Şekil 4.3 'de gösterilen yanma odası çıkışının arasındaki bağlantı için de çelik flexible boru düşünülmüştür. Yanma odası ile bu baca sisteminin girişi arasında da damperli bir sistem bulunacaktır. Ayrıca, bu tahliye sisteminde, emişin daha sağlıklı olmasını sağlamak için bir adet de fan bulunmaktadır. Baca sisteminin çıkışından itibaren laboratuvarın çıkışına kadar da bir boru sistemi ile yanma sonu emisyonları, laboratuvar dışına tahliye edilmiş olacaktır.

#### **4.2. Tezin Deneysel Çalışmaların Yapılması için Biyogaz ve Metan Tüplerinin Alınması**

Bu tez çalışmasında, TÜBİTAK ARDEB 1005(Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı) 114M668 kodlu proje kapsamında geliştirilen yanma sistemi ile birlikte Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde mevcut olan makine ve teçhizat kullanılmıştır. Tezin başarıyla tamamlanabilmesi için gerekli olan sarf malzeme 07/2016-1 kodlu “ Bir yakma sisteminde biyogaz yanma karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi” projesiyle Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) biriminden temin edilmiştir.

#### **4.3. Yanma Deneylerinin Gerçekleştirilmesi**

Bu tez kapsamında, biyogazların yanma performansları ve emisyon parametreleri yakma sisteminde deneysel olarak incelenmiştir. Tezin deneysel bölümüne başlamadan önce, bir CFD programı kullanılarak, yakma sistemi (brülörler ve yanma odası) modellenmiştir. Farklı içeriklere sahip biyogazları yakabilecek şekilde bir doğalgaz brülörü ve yanma odası kullanılmış, farklı içeriklere sahip biyogazların istenen oranlarda hazırlanarak, bu gazlar deneysel olarak yakılmıştır. Yanma odası üzerine yerleştirilen ölçüm noktaları kullanılarak, yanma odası boyunca aksel ve radyal yönde sıcaklık ve emisyon dağılımları belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan tüm yakıtların yanma performanslarını ve emisyon parametrelerini karşılaştırabilmek için tüm yanma şartları aynı olacak şekilde seçilmiştir (10 kW ısı gücü, 0,83 eşdeğerlilik oranı, 21 mbar yakma havası ve yakıt basınçları). En yüksek alev sıcaklığı sırasıyla metan, biyogaz (3.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (1.Faz) ve biyogaz (4.Faz) olarak ortaya çıkmıştır.

Bu tez kapsamında, biyogazlarının yanma ve emisyon parametrelerinin deneysel olarak araştırılması ve metanın (doğal gaz) yanma performansına göre ne durumda olduklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, metan ve farklı içerikli biyogazları yakabilecek 10 kw kapasiteli bir brülör kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına geçmeden önce ise, bazı teorik bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Deneysel olarak kullanılacak gazların miktarlarını, debimetrelerden doğru şekilde ayarlayabilmek için, her bir yakıt için ne kadar yakıt tüketileceğinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir [40];

$$\text{Isıl Güç} = \text{LHV} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) \times Q \left( \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) \times \frac{1(\text{h})}{3600(\text{s})} \quad (4.1)$$

Bu denklemde, Q hacimsel olarak yakıt debisini, LHV yakıtların alt ısı değerini göstermektedir.

Sistemde kullanılan debimetreler hava debimetreleridir. Bu nedenle, gaz hatlarında bulunan debimetreler, ilgili biyogazın yoğunluğuna göre kalibre edilmeli ve deneyler esnasında okunan değerlerin, aşağıdaki eşitlik sayesinde bulunan değerlere göre okunması gerekmektedir [40];

$$Q_{\text{çalışma akışkanı}} = k \times Q_{\text{kalibrasyon akışkanı}} \quad (4.2)$$

$$k = \sqrt{\frac{\text{Kalibrasyon akışkanının Yoğunluğu}}{\text{Çalışma akışkanının Yoğunluğu}}} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte bahsedilen çalışma akışkanı, çalışılan gazı, k, dönüşüm faktörünü, kalibrasyon akışkanı ise kullanılan debimetrenin hangi akışkan için tasarlandığını (bu çalışmada hava) göstermektedir.

Yukarıda gösterilen 1, 2 ve 3 numaralı eşitlikler, basit bir örnekle daha iyi anlaşılacaktır. Örneğin; metan gazı kullanılarak 10 kW ısı güç elde etmek için ( $LHV_{\text{metan}} = 33607,574 \text{ kJ/Nm}^3$ )  $1,0712 \text{ m}^3/\text{h}$  metan gazına ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak, bu değer elde edilebilmesi için debimetreden okunması gereken değer ( $20^\circ\text{C}$ 'de  $\rho_{\text{hava}} = 1,204 \text{ kg/m}^3$  ve  $\rho_{\text{metan}} = 0,67148 \text{ kg/m}^3$ ) yaklaşık olarak  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tir. Deneysel yapılarırken de tüm gazlar için bu değerler hesaplanmış ve debimetrelerden, hesaplanan değerler okunmuştur [40].

Deneysel sırasında, tüm alevler için herhangi bir alev kopması, alev geri tepmesi vb. alev kararsızlıkları ile karşılaşmamıştır. Çalışılan biyogazlarının içerikleri düşünüldüğünde, böyle bir durumun meydana gelmemesi, tasarımı yapılan brülörlerin ve yanma odasının bu yakıtlar için uygun olduğu söylenebilir.

#### 4.3.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi

Deneysel çalışmalar neticesinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri, gerçek sıcaklık değerlerini yansıtmamaktadır. Yanma odası içerisindeki yüksek sıcaklık seviyeleri nedeniyle ışınlama ısı transferi ile bir miktar kayıp olmaktadır. Sıcaklık ölçümlerinin bu kayıplar da dikkate alınarak düzeltilmesi gerekmektedir. Sıcaklık düzeltmelerini geliştirmek için sıcaklık ölçümlerinde düzeltmeler ve korelasyonlarla ilgili yapılan bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır [40]. Isıl çiftler, ısı ve kimyasal dengede yüksek sıcaklıktaki gaz akımına yerleştirildikleri zaman, çevre ortam sabit sıcaklıkta kabul edilirse, gazdan tele taşınım ve ışınlama toplam ısı transferi, telden iletimle koruyucu tabakaya ve ışınlama duvara olan ısı transferi toplamına eşittir [40].

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (4.4)$$

Burada;  $Q_1$ , gazdan tele taşınım ile olan ısı transferini,  $Q_2$ , gazdan tele ışınlama ile olan ısı transferini,  $Q_3$ , telden koruyucu tabakaya (seramik) iletimle olan ısı transferini ve  $Q_4$ , telden duvara ışınlama ile olan ısı transferini temsil etmektedir.

Gazın yayınım katsayısı çok küçük olduğundan gazdan tele ışınlımla ısı transferi ihmal edilebilir. Ayrıca, koruyucu tabaka (seramik) için iletimle ısı kaybı, telin ısıl iletkenliği ve boyutları ve koruyucu tabaka ile ilgilidir. Bundan dolayı, ısı çiftler için bu ısı kayıpları, ısı çiftin uç kısmı ile doğrudan ilgili olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda, ısı çift için ısıl denge eşitliği şöyle olmalıdır:

$$Q_1 = Q_4 \quad (4.5)$$

Gazdan tele taşınım ile olan ısı kayıpları ( $Q_1$ ) şöyle yazılabilir:

$$Q_1 = hA(T_g - T) \quad (4.6)$$

Burada,  $h$  ( $W/m^2.K$ ), taşınım ısı transfer katsayısını,  $A$  ( $m^2$ ), telin yüzey alanını,  $T_g$  (K), gaz sıcaklığını ve  $T$  (K) tel sıcaklığını göstermektedir.

Telden yanma odasının duvarlarına ışınlımla ısı kaybı ( $Q_4$ ) aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir:

$$Q_4 = \sigma A(\epsilon T^4 - a T_w^4) \quad (4.7)$$

Burada,  $\sigma$ , Stefan-Boltzman sabitini,  $\epsilon$ , telin yayma katsayısını,  $a$ , telin emme ya da yutma katsayısını,  $T_w$ , duvar sıcaklığını göstermektedir. Kirchoff kanununa göre, ısıl dengedeki bir cismin yayma ve yutma katsayısı eşittir. Bu ifadeden hareketle Eşitlik (4.7) şöyle yazılabilir:

$$Q_4 = \sigma A \epsilon (T^4 - T_w^4) \quad (4.8)$$

$Q_1 = Q_4$  eşitliğinden hareketle,

$$hA(T_g - T) = \sigma A \epsilon (T^4 - T_w^4) \quad (4.9)$$

Eşitlik (4.9) elde edilir. Eşitlik (4.9) düzenlenecek olursa,

$$T_g = \frac{\sigma \epsilon (T^4 - T_w^4)}{h} + T \quad (4.10)$$

eşitliği elde edilir. Eşitliğin sağ taraftaki ilk terimi, ısı kayıplarından dolayı azalan ısıl çift sıcaklığını karşılamak için bir düzeltme faktörünü temsil etmektedir. Bu çalışmanın deneysel kısmında yapılan ölçümlerin düzeltilmesi için de Eşitlik (4.10) kullanılmıştır. Eşitlik (4.10)'da, Stefan-Boltzman sabiti  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  ve ısıl çiftlerin yayma katsayısı  $\varepsilon = 0,22$  [40] şeklindedir.  $T$  (K) deneyler sırasında ölçülen hatalı değeri,  $T_w$  (K) deneyler sırasında ölçülen duvar sıcaklığını göstermektedir.  $h$  değeri ise, bir silindir etrafındaki akış dikkate alınarak, Nu sayısına [40] bağlı olarak ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu = 0,8. (Re)^{0,25} \quad (4.11)$$

$$Nu = \frac{h.D}{k} \quad (4.12)$$

$$Re = \frac{U.D}{\nu} \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.12)'de verilen Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan hız değeri, teorik olarak hesaplanan yakıt hızlarıdır. Hidrolik çap ( $D$ ) değeri de, ısıl çiftin tel çapıdır (0,5 mm). Bu değerler kullanılarak, her bir yakıt karışımı için Reynolds sayısı belirlenmiş olup, bu sayı kullanılarak da Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan Nusselt sayıları kullanılarak ise, her bir biyogazı için ısı taşınım katsayısı ( $h$ ) belirlenmiştir. Eşitlik (4.12)'de bulunan, yanma sonu ürünlerinin ısı iletim katsayısı ( $k$ ), yanma sonu ürünlerinin tamamının hava kabulü ile 800°C'deki havanın ısı iletim katsayısı değeri olan 0,051 W/m.K olarak alınmıştır [40].



## 5. YANMANIN SAYISAL MODELLEMESİ

### 5.1. Yanmanın Modellenmesi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) temel olarak akışkan davranışının etkili olduğu problemlerin, sayısal yöntem ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği, günümüzde endüstriyel işletmelerde ve Ar-Ge çalışmalarında birçok işlem ve cihazların simülasyonunda çok avantajlı çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle yanma analizi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellenmesinden bahsedilmiş, ardından referans alınan brülör ve model yanma odasında yanma analizi parametreleri (model yanma odası geometrisi ve CFD modellenmesi, kullanılan biyogazların temel özellikleri ve analizleri için belirlenen sınır şartları) belirlenmiştir.

#### 5.1.1. Yanmanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellenmesi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellenmesi, çalışılan kontrol hacimleri içerisindeki korunum denklemlerinin çözümlenmesi ve akış alanı simülasyonlarının yapılmasını kapsamaktadır. Bu alanın simülasyonunun yapılabilmesi için tüm gerekli faktörleri içeren bir SAD modeline ihtiyaç duyulmaktadır [41].

Gaz yakıtların SAD modellenmesi, gerek yanmanın gerekse akış alanının karmaşıklığından dolayı araştırmacılar için önemli bir ilgi odağı olmuştur. Bu çalışmada kullanılan SAD paket programı Sheffield Üniversitesi'nde geliştirilen ve NO<sub>x</sub> son işlemcisiyle bütünleştirilmiş FLUENT sayısal akışkanlar dinamiği programıdır [40]. Bu şekilde akışın özellikleri, yanma odasının yanma ve emisyon performansının tahmini gerçekleştirilmiştir.

#### Temel denklemler

Simülasyonda kullanılan matematiksel model aslında, kütle, momentum, enerji ve skaler değişkenler için taşınım denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır. Metan ve biyogaz yanmasının gerçekleştiği model yanma odası içerisindeki reaksiyonun akış alanı,



3-boyutlu olarak çözülmeye çalışılmıştır. Yanma odası içerisinde biyogazlarının yanma olayını tanımlayan kısmi diferansiyel denklemler aşağıda sunulmuştur [40].

### Korunum denklemleri

Kütlenin Korunumu;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u r)}{\partial r} = 0 \quad (5.1)$$

Z-Momentumun Korunumu;

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u v r)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{2\mu}{3r} \frac{\partial(vr)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5.2)$$

R-Momentumun Korunumu;

$$\frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v v r)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2}{3} r \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{4}{3} r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2}{3} \mu v \right) \quad (5.3)$$

Enerjinin Korunumu;

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v h r) = -\frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} r \right) + q \quad (5.4)$$

Denklem 5.4. 'te  $h$  özgül entalpiyi,  $T$  alev sıcaklığını,  $k$  ısı iletkenliği,  $q$  ise birim hacimde üretilen ısı oranını göstermektedir. Entalpi  $h = \sum_i m_i h_i$  olarak tanımlanmaktadır. Burada  $h_i$  i türünün özgül entalpisini,  $m_i$  i türünün kütle kesrini göstermektedir [41].

Kimyasal Türlerin Korunumu;

$$\frac{\partial(\rho u m_i)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r m_i)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( J_i \frac{\partial(\rho m_i)}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( J_i r \frac{\partial(\rho m_i)}{\partial r} \right) + R_i \quad (5.5)$$

Denklem 5.5' te  $J_i$  i türünün kütle difüzyonunu,  $R_i$  ise kimyasal reaksiyon ile oluşan ya da bozulan kimyasal tür kütle kesrini göstermektedir. Kütle difüzyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$J_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'da  $D_i$  i özelliğinin difüzyon katsayısıdır.  $Sc_t$  türbülanslı Schmidt sayısı ( $Sc_t = \frac{\mu_t}{D_t \rho}$ ) 0,7 olarak alınmıştır.

$$D_{i,m} = \frac{1-X_i}{\sum_{j \neq i} X_j / D_{i,j}} \quad (5.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\mu_t$  türbülans vizkozitesi  $D_{i,j}$  j türü içerisinde i türü için ikili difüzyon katsayısıdır [41].

### 5.1.2. Yanma odalarında türbülanslı akışın modellenmesi

Türbülans tanım olarak oldukça karmaşık bir ifadedir. Türbülanslı akışta karmaşık olaylar arka arkaya meydana gelir. Akışın davranışı gelişigüzel ve karmaşıktır. Türbülanslı akış meydana geldiği zaman akışın özellikleri (örneğin hız) sürekli değişmektedir. Bu yüzden türbülanslı akışta, bir noktadaki hız ortalama ve değişen bileşenin toplamı olarak ( $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ) dikkate alınmaktadır [41].

Bu çalışmanın sayısal yanma analizinde FLUENT programındaki türbülans modelleri arasından standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bunun yanında başka türbülans modelleri de program içerisinde mevcuttur. Bunlar RNG  $k-\varepsilon$  ve RSM türbülans modelleridir.

#### Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli

Standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeli eddy-viskozite modeli olarak da bilinmektedir. Reynolds gerilmesinin, ana hız gradyanı ile orantılı olduğu varsayılır. Bu Boussinesq hipotezi olarak bilinir [41].

Gerilmeler;

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5.8)$$

Denklem 5.8' de  $\mu_t$  türbülans viskozitesini,  $\delta_{ij}$  kroneker delta tensörünü,  $u_i$  ve  $u_j$  ortalama hızları,  $u_i'$  ve  $u_j'$  değişen hızları ve denklemdeki  $k$  ifadesi de türbülanslı kinetik enerji ( $\frac{1}{2} \sum_i \overline{u_i'^2}$ )' yi temsil etmektedir [41].

Türbülans girdap vizkozitesi laminar akışta moleküler viskoziteden farklıdır. Fakat, moleküler viskozite ile aynı rolü oynar. Moleküler viskozite yerine efektif viskozite ( $\mu_{eff}$ ) kullanılır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5.9)$$

Türbülanslı viskozitesinin ( $\mu_t$ ), türbülans hızı ve uzunluk skalası ile orantılı oldu varsayılır. Bu skalalar türbülans kinetik enerjisinden  $k$  ve yayılma oranı  $\varepsilon$  elde edilir. Türbülans vizkosite ifadesi aşağıdaki gibidir [41].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

$C_\mu$ , deneysel bir sabittir.  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modelinde türbülans vizkozitesinin ( $\mu_t$ ) hesaplanması için  $k$  ve  $\varepsilon$  değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler ise aşağıda verilen denklemlerden elde edilmektedir [41].

Türbülans kinetik enerjisi  $k$ ' nın değeri;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.11)$$

Türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı  $\varepsilon$ ' nun değeri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.12)$$

Burada  $G_k$  ortalama hız gradyentinden dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi,  $C_{1\varepsilon}$  ve  $C_{2\varepsilon}$  deneysel sabitleri,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  Prandtl sayılarını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi üretim oranı  $G_k$  aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir [40].

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (5.13)$$

Çizelge 5.1.  $k$ - $\varepsilon$  modelde kullanılan sabitler [40]

SABİT	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
DEĞER	0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

### 5.1.3. Yanmanın modellenmesi

Türbülanslı reaksiyon akışlarının modellenmesi hem türbülans ve kimya arasındaki etkileşimlerin hem de bir çok reaksiyon ve kinetik modellerin tanımlanmasını gerektirmektedir. Akış denklemlerine ek olarak tüm kimyasal tür için kütle kesrinin taşınım denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Tüm kimyasal türlerin taşınım denklemlerinde bir kimyasal türün üretimi veya bozunmasının hacimsel oranı kaynak terimi ( $S_j$ ) olarak bulunmaktadır. Yakıt, oksitleyici ve inert türlerin hepsinin kütle ve hacim kesirlerinin toplamı 1' e eşittir. Yanma işlemi boyunca kimyasal enerji ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu işlemdeki entalpi, taşınım denkleminin çözümü sonucunda elde edilir [40].

Yanmanın gerçekleştiği akış hacmi sıcaklık ve yoğunluk değişimlerinden etkilenmektedir. Bundan dolayı kimyasal tür ve entalpi denklemleri çözülmelidir. Sonuçta oluşan denklemler çok büyüktür [40].

Bu çalışmada kullanılan biyogazlar genel olarak beş farklı gazı bünyelerinde bulundurmalarından dolayı yanma modeli Mixture Fraction/PDF yanma modeli seçilmiştir. Bu model özellikle karışım yakıtlar için daha iyi sonuçlar vermektedir.

### The Mixture Fraction/PDF yanma modeli

Çalışmada kullanılan Mixture Fraction/PDF yanma modeli skaler korunumlu tek bir karışım için taşıyıcı eşitliklerin çözümünden meydana gelir [40]. Bu yanma modelinde ayrı ayrı türler için taşıyıcı eşitlikler çözülmez. Onun yerine, ilgili tür için tek tek bileşim konsantrasyonu, karışım oran dağılımı tahmin edilen formda türetilmiştir. Kimya ve türbülansın etkileşimi, imkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonunun yardımı ile açıklanabilir [40].

PDF model yaklaşımı türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici bir sistem için, karışım oranı  $f$ , yerel yakıt kütle oranı bakımından şöyle yazılabilir [40]:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \quad (5.14)$$

Burada  $m_F$  ve  $m_O$  yakıt ve havanın kütle oranlarını göstermektedir. Karışım oranı  $f$ , türbülanslı akış alanının zaman ortalamalı değeri için korunum denklemlerinin çözüldüğü akış alanındaki her noktada korunan bir nicelik değeridir [40].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (5.15)$$

$S_m$ , sıvı yakıt damlacığından gaz fazına, yalnızca zamanı gelmiş kütle transferinin kaynak terimidir.

Anlamli karışım oranı için çözüme ek olarak, bir korunum denklemi karışım oranı değişimi için çözülür.  $\overline{f'^2}$  türbülans-kimya etkileşimini tanımlayan kapama modelinde kullanılır [40].

$$\frac{\partial(\rho\overline{f'^2})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \overline{f'^2})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left( \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (5.16)$$

Çizelge 5.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler [40]

SABİT	$\sigma_t$	$C_g$	$C_d$
DEĞER	0,7	2,86	2,0

Sistem kimyasını tanımlamak için, modelde iki seçenekli varsayım yapılır; alev tabakası (karışım yakılır (mixed is burned)) yaklaşımı ve denge varsayımı. Alev tabakası ya da ‘‘karışım yakılır’’ benzerliği, kimyanın sonsuz hızda ve tersinmez olduğu varsayar. Bununla beraber yakıt ve oksitleyici türleri boşlukta asla birlikte görünmezler ve tek aşamada yanma sonu ürünlerine dönüşürler. Bu basit sistem türlerin kütle ve karışım oranları arasında düz çizgi ilişkisi sağlar. Bu benzerliğin hesaplanması kolaydır ve reaksiyon oranına ihtiyaç duyulmadan nispeten hızlıdır. Fakat ‘‘karışım yakılır’’ modeli, tek aşama reaksiyonlarının tahmininde yetersiz olup orta türlerin tahminini gerçekleştirememektedir. Sonuç olarak, denge varsayımı, sistemdeki orta türlerin hesaplamasını yapmaktadır. Bu varsayım, moleküler seviyede her zaman var olan kimyasal denge için yeterli kimyasal hızı işaret etmektedir [40]. Karışım oranındaki ( $f$ ) türlerin mol oranları, Gibbs free enerji [40]’ nin azaltılması temelli bir algoritma ile hesaplanır. Bu model detaylı bir kimyasal kinetik oran verisini gerektirmez. Kimyasal türler için özellik verisi, kodlarla belirlenmiş kimyasal bir veri tabanından tanımlanır [40].

### Türbülans-Kimyasal etkileşimi

Türbülans ve kimyasalın etkileşimi, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)’ nun uygulaması ile modellenir. PDF,  $p(f)$ , dalgalı değişken  $f$  değerinin  $f + \Delta f$  arasında bir değer almasının zaman oranını tanımlar [40].

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (5.17)$$

$\tau_i$  burada  $f$ ’ nin  $\Delta f$  aralığında harcadığı zamanın oranıdır [38].

### Radyasyon modeli

Radyasyonla gerçekleşen ısı transferi yüksek sıcaklıklarda olmaktadır. Yanma odalarının gaz alev sıcaklıkları, stokiyometrik yanma koşullarında genellikle 1000-1600 °C’ den

yüksektir. Bundan dolayı yanma odalarında ısı transferi önemlidir ve yanma odalarındaki sıcaklık dağılımlarının daha iyi tahmin edilebilmesi adına, çözümlerinde radyasyon modeli kullanılmalıdır [41].

Işınım ile ısı transferi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$Q_{rad} = \sigma (T_{max}^4 - T_{min}^4) \quad (5.18)$$

Burada taşınım ya da iletim ısı transfer miktarları, radyasyonla ısı transfer modeli simülasyonu içinde yer almalıdır.

Bir  $d_x$  yolu süresince radyant yoğunluğu da aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\frac{dI}{dx} = (\alpha_a + \alpha_s)I + \frac{\alpha_a \delta T^4}{\pi} \quad (5.19)$$

$\alpha_a$  ve  $\alpha_s$  sırasıyla emme ve saçılma katsayıları,  $I$ , toplam yarı küresel şiddet,  $T$  yerel sıcaklık (K), ve  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabitidir ( $5,672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ). Bu modelde, eşitlik 5.19, bir yüzeyde her ayrık kontrol hacminde tek bir noktadan çıkan ışınların serileri boyunca entegre edilir. Bu ışınlar, bu nokta civarında yarı küresel katı açı kaplarlar [40]. Entegre edilmiş ışınma yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir.

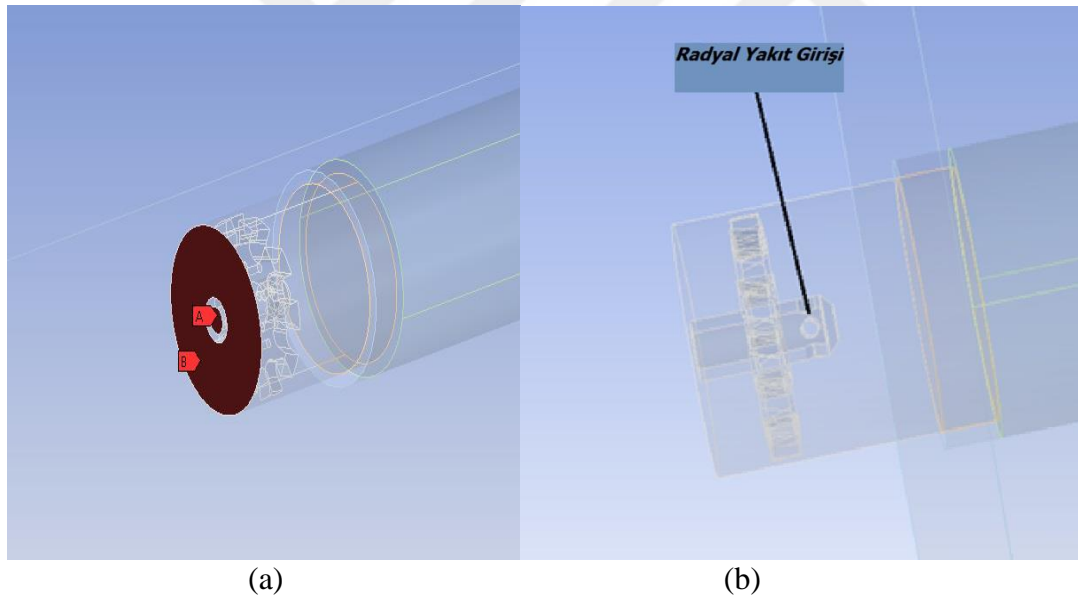
$$I(x) = \frac{\sigma T^4}{\pi} \left( \frac{\alpha_a}{\alpha_a + \alpha_s} \right) (1 - \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)x]) + I_0 \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)x] \quad (5.20)$$

$I_0$  devam eden  $d_x$  mesafesinin başındaki ışınma yoğunluğudur. Bu yeni durumda entalpi kaynağı, ‘ışınma izleme’ tekniğinin kullanıldığı akışkan kontrol hacmi boyunca takip edilen her ışınma mesafesi yolu boyunca, yoğunluktaki değişimin toplamı olarak hesaplanır [41].

Fluent radyasyon modelinde radyasyon, modeldeki tüm yüzeylerin radyasyonda dalga boyuna bağlı olmadığı anlamına gelen gri radyasyon olarak kabul edilir. Yani, yukarıdaki eşitlikten tahmin edilen radyasyon yoğunluğu, tüm dalga boylarında entegre edilmiş bir yoğunluğa eşittir. Sonuç olarak, Fluent radyasyon modeli gri-yayılmalı bir radyasyon modelidir [42].

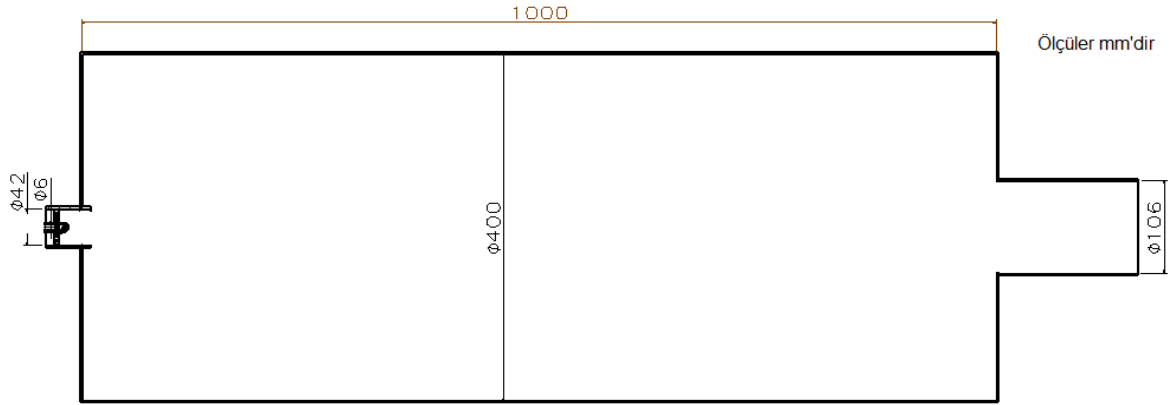
Karbondiyoksit ve su buharı gibi, yanma sistemlerindeki gazların çoğu ağır emici ve yayıcı olmalarına rağmen, radyasyonu belirgin bir şekilde saçamazlar [43]. Dağıtma katsayısı bir ihmal etkisine sahip olmak için bulunur. Değişken bir emme katsayısı, alevdeki emisyon ve emmeye katkı sağlayan karbondiyoksit ve su buharıyla beraber yanma sisteminde radyasyon emişinin bileşim bağımlılığının öneminden dolayı olanak sağlar. Radyasyon özellikleri bir program vasıtasıyla hesaplanabilme imkanı sağlar. Duvar yayıcılığı 0,6' ya ayarlanır (gaz yakıt yanması için bilinen değer). Akış giriş ve çıkışındaki yayıcılık katsayısı 1,0 olarak alınır (siyah cisim emmesi) [44].

Bu bölümde sayısal simülasyonda kullanılan temel korunum denklemleri, brülörlerde türbülanslı akışın ve yanmanın modellenmesi, hesaplamalı akışkan dinamiğinde model üretimi ve çözüm metodu ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Bununla birlikte, iki farklı yanma odası geometrisi kullanılarak model yakıcının geometrisinin seçimi yapılmıştır.



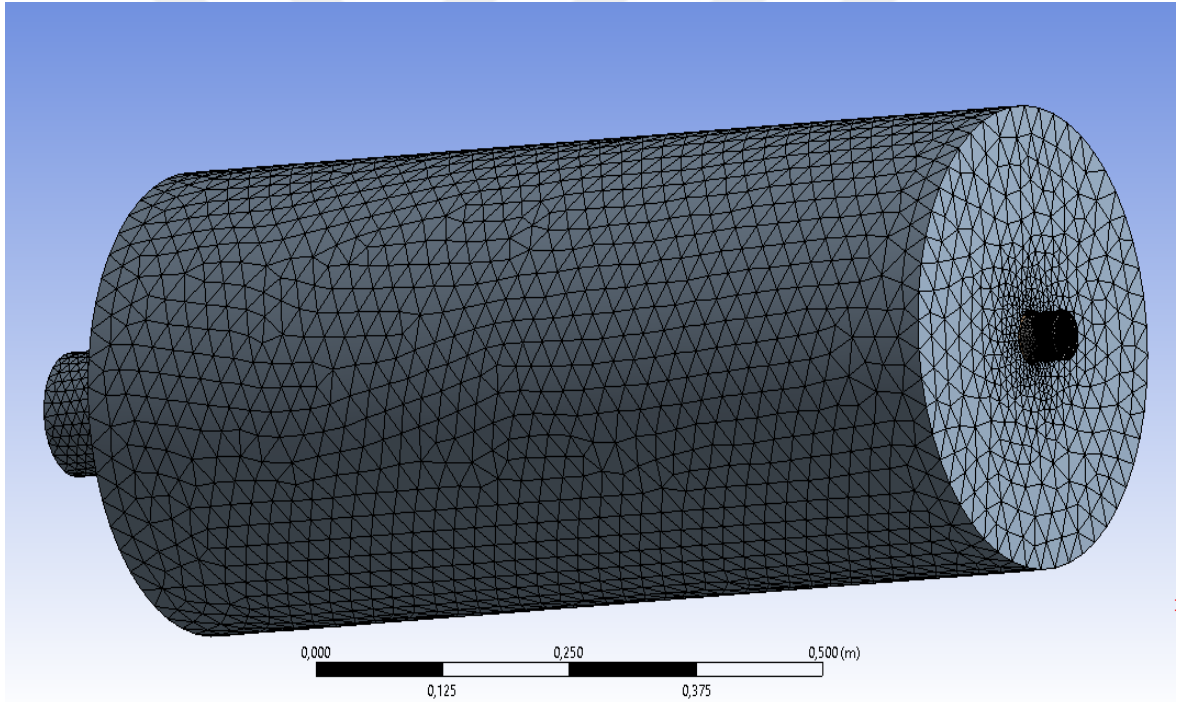
Şekil 5.1. a) Hava ve yakıt girişi b) Radyal yakıt girişi





Şekil 5.2. Yakıcı kesit görünüşü

Grid ağ yapısı;



Şekil 5.3. Yakıcı grid ağ yapısı görünüşü

<input type="checkbox"/> Elements	613947
<b>Mesh Metric</b>	<b>Skewness</b>
<input type="checkbox"/> Min	1,29841477094494E-05
<input type="checkbox"/> Max	0,833056716498741
<input type="checkbox"/> Average	0,231656830043782
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,121400050951561

Şekil 5.4. Skewness verileri

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	15,0 °
<input type="checkbox"/> Min Size	1,e-004 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	2,5e-002 m
<input type="checkbox"/> Max Size	4,e-002 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20 )
Minimum Edge Length	7,4222e-004 m

Şekil 5.5. Orthogonal quality verileri

Sayısal modelleme için aşağıdaki modeller kullanılmıştır;

- The PDF/Mixture Fraction yanma modeli
- P-I radyasyon modeli
- Standart k - epsilon türbülans modeli



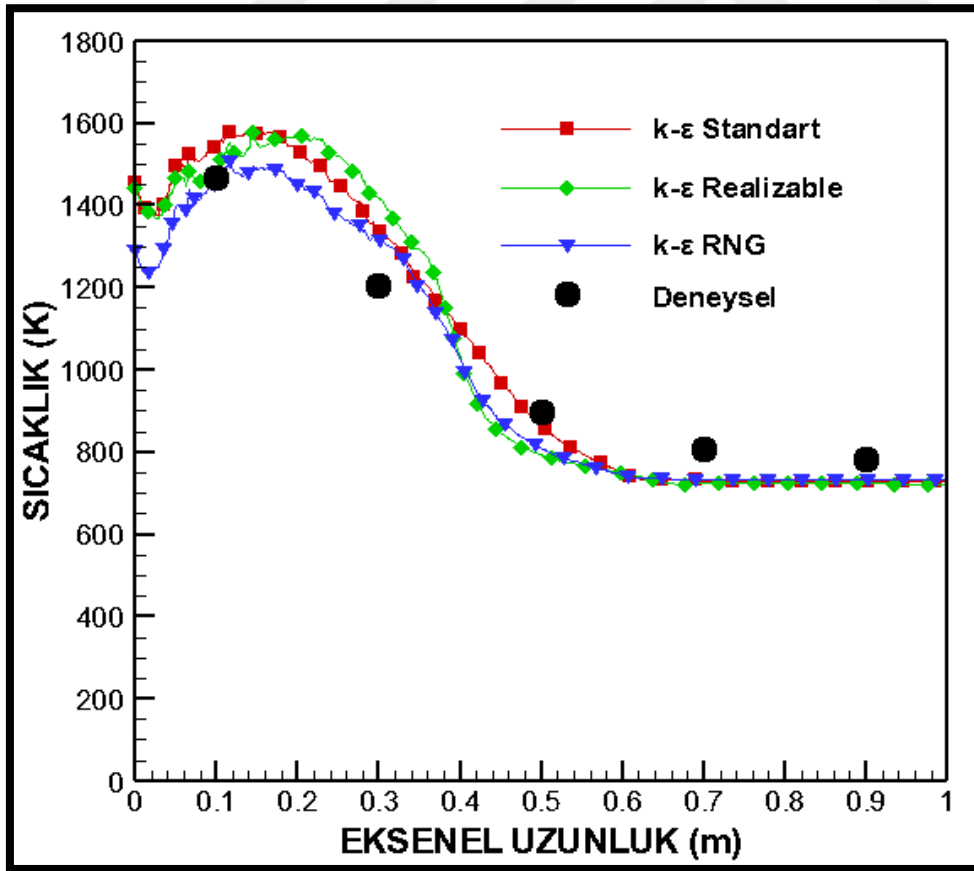
## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel ve sayısal çalışmaların sonucu ve karşılaştırılması sunulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

### 6.1. Sayısal Sonuçlar

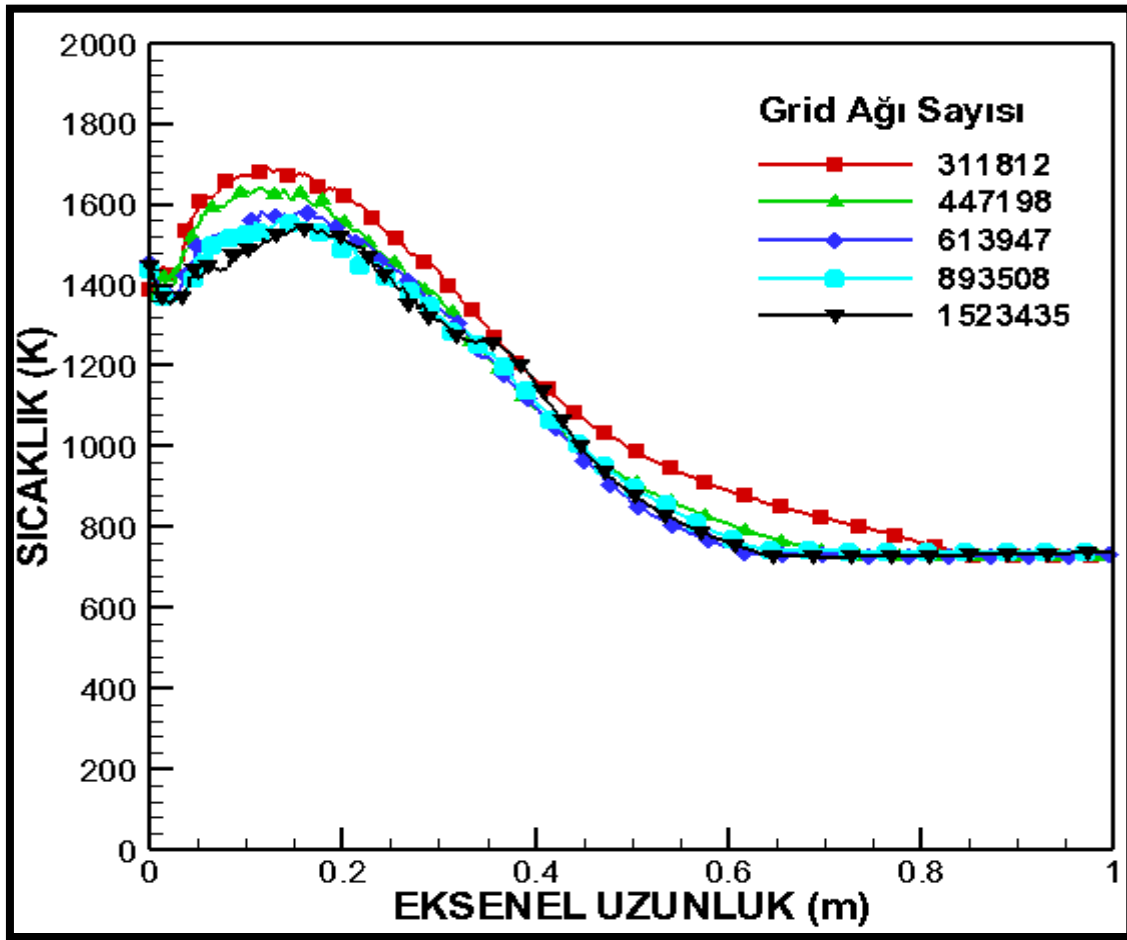
Çalışmada tüm sayısal çözümlerinde yakınsama dikkate alınmıştır ve analizler yakınsadıktan sonra yapılan çözümler ve veriler kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal analizlerde çözümler de enerji ve radyasyon artıkları  $10^{-6}$  seviyelerine inerken diğer denklemlerin artıkları  $10^{-4}$ 'ün altına kadar gerilemiştir.

#### 6.1.1. Yakıcılarda türbülanslı akışın modellemesi



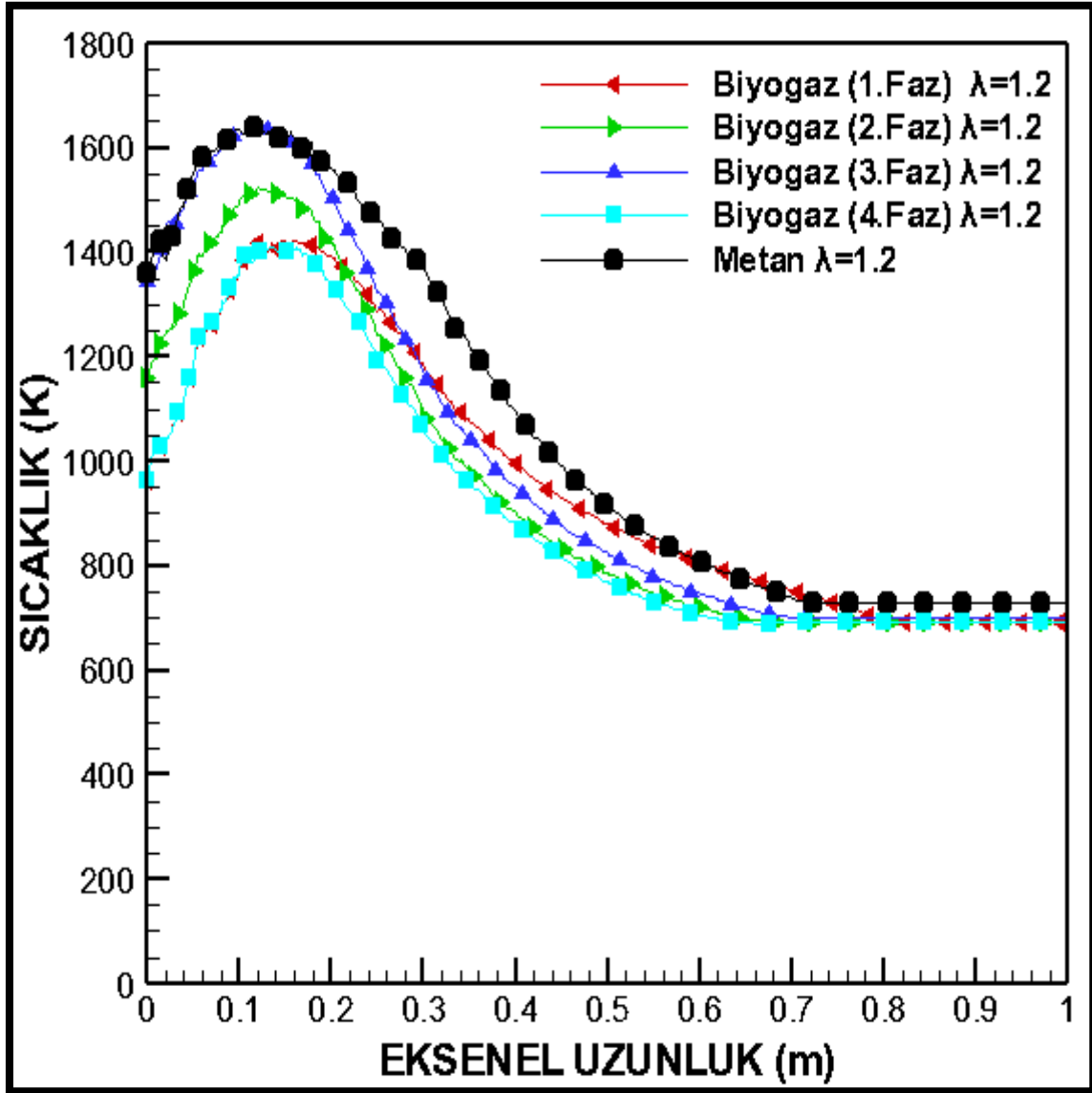
Şekil 6.1. Türbülans modellerinin karşılaştırılması

Çalışmada sayısal modelleme ve analiz sonucu, k-ε standard, k-ε RNG, k-ε realizable türbülans modellemelerinden, metan gazı yakma deneysel verileri ile sayısal verilerin uyumundan dolayı Şekil 6.1 'de gösterildiği k-ε standard tercih edilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde özellikle kazan içi sıcaklık değişimlerindeki sıcaklık dağılım eğrileri ve kazan içinde 0,50 m mesafedeki sıcaklık dağılımındaki değerler ile yakınsaması üzerine k-ε standard tercih edilmiştir. Sayısal analizlerdeki çalışmaların k-ε standard türbülans modeli kullanılarak yapılması sağlanmıştır.



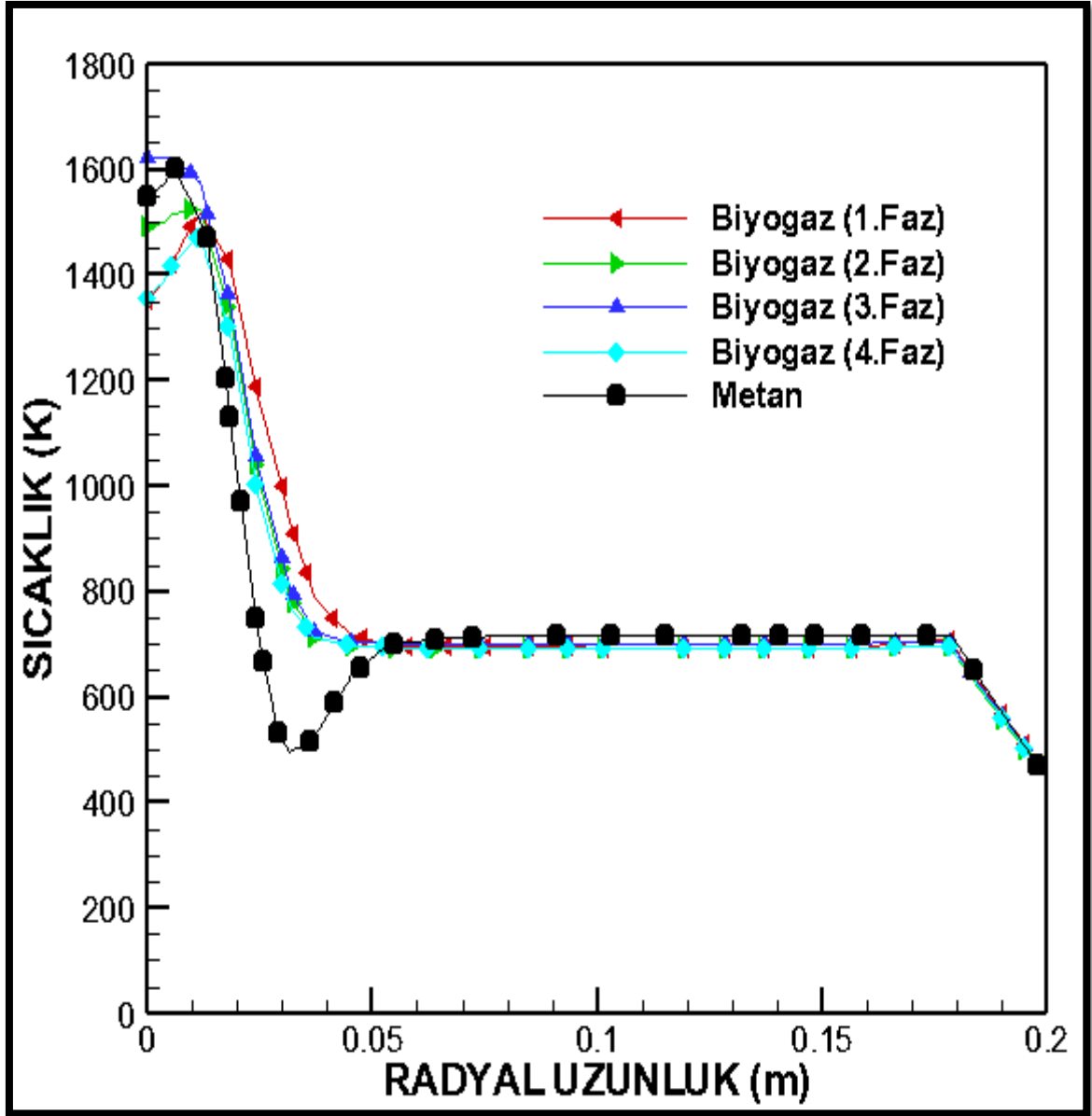
Şekil 6.2. Grid ağ sayılarının karşılaştırılması

Şekil 6.2'de sunulduğu gibi farklı yanma odası grid ağ sayılarına göre sayısal analizler yapılmıştır. Farklı grid ağ sayıları 311812, 447198, 613947, 893508, 1523435 belirlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Grid ağ sayısı 613947 de yapılan sayısal modellemelerden sonraki grid ağ sayısının artırılması sonuçta bir değişiklik gözlenmemiştir. Analiz yapılan bilgisayarı daha fazla yormamak ve analiz sürelerini daha verimli kullanmak için yapılan sayısal analizde grid ağ sayısı 613947 olarak uygun görülmüştür.



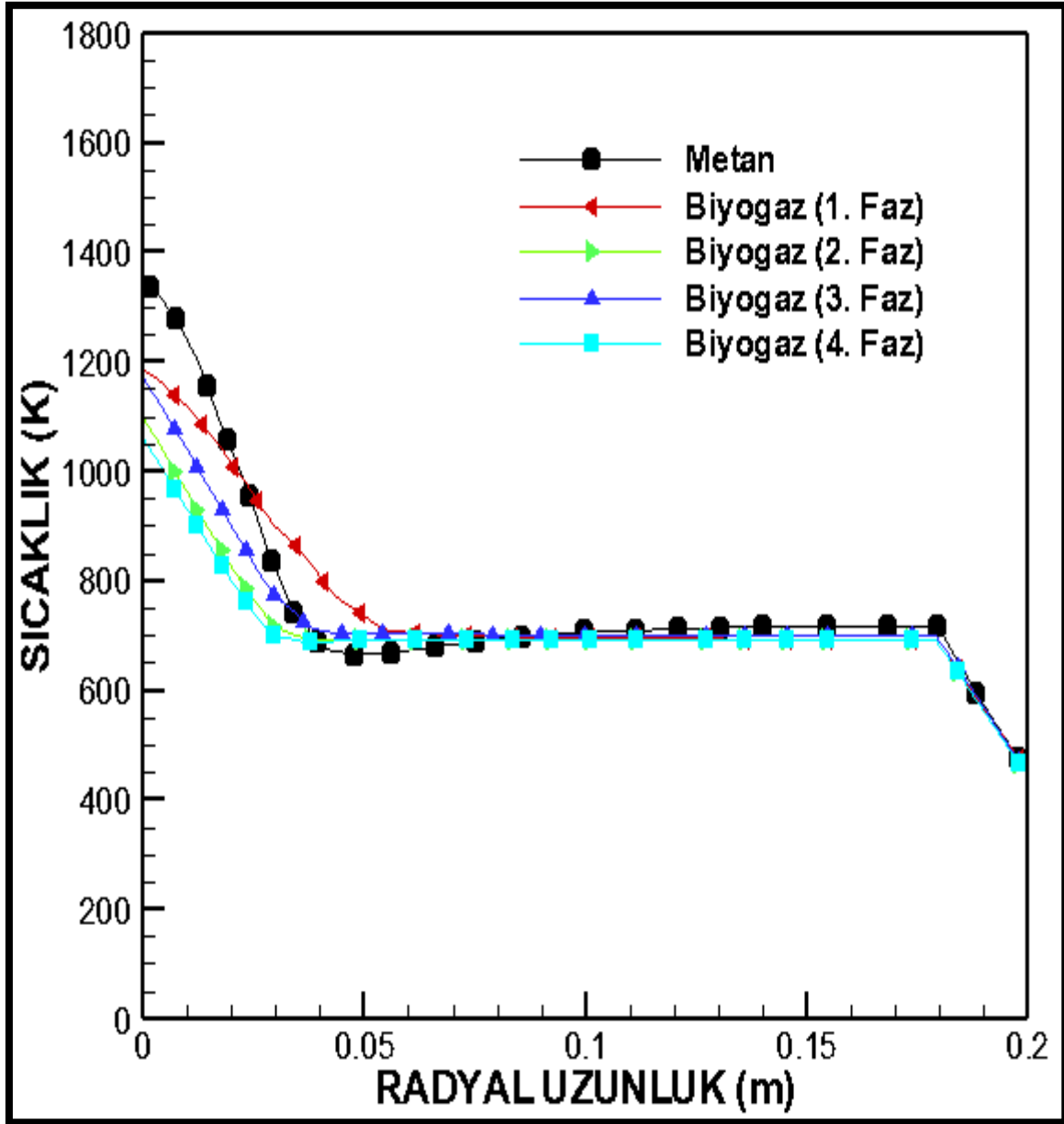
Şekil 6.3. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) eksenel sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Farklı oranlara sahip biyogazların yakma sonucu elde edilen sıcaklıklarının metan gazı yakma sonucu elde edilen eksenel sıcaklık değerleri ile karşılaştırılması Şekil 6.3 'de gösterilmiştir. Biyogaz içeriğindeki  $CH_4$  (%) oranının artması ile yakma alev sıcaklıkları ve yanma odası çıkışına doğru eksenel sıcaklık değerlerinin benzer eğriler gösterdiği söylenebilir. Şekilde incelendiğinde en yüksek sıcaklık dağılımı sırasıyla metan, biyogaz (3.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (1.Faz), biyogaz (4.Faz) olarak gözlenmiştir.



Şekil 6.4. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,1 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

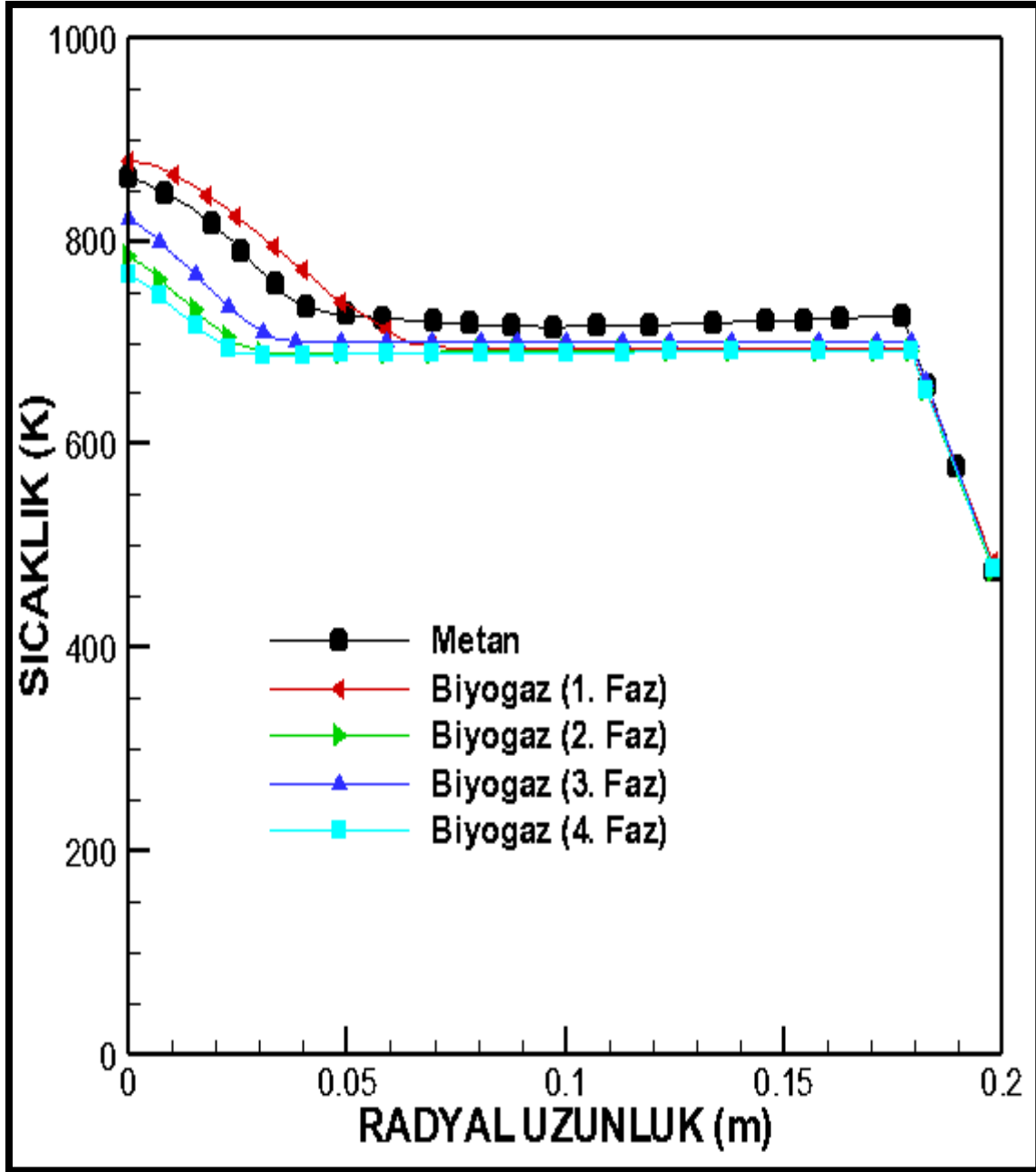
Şekil 6.4 'de 0,1 m'deki 4 farklı içeriğe sahip biyogazların ve metan gazının yanma odası duvarına doğru radyal sıcaklıkları gösterilmiştir. Yanma odası duvarına doğru radyal sıcaklıklar 0,05 m 'den sonra metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) yanma sonucu sıcaklıkları benzer eğilimlere sahip olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.5. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,3 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

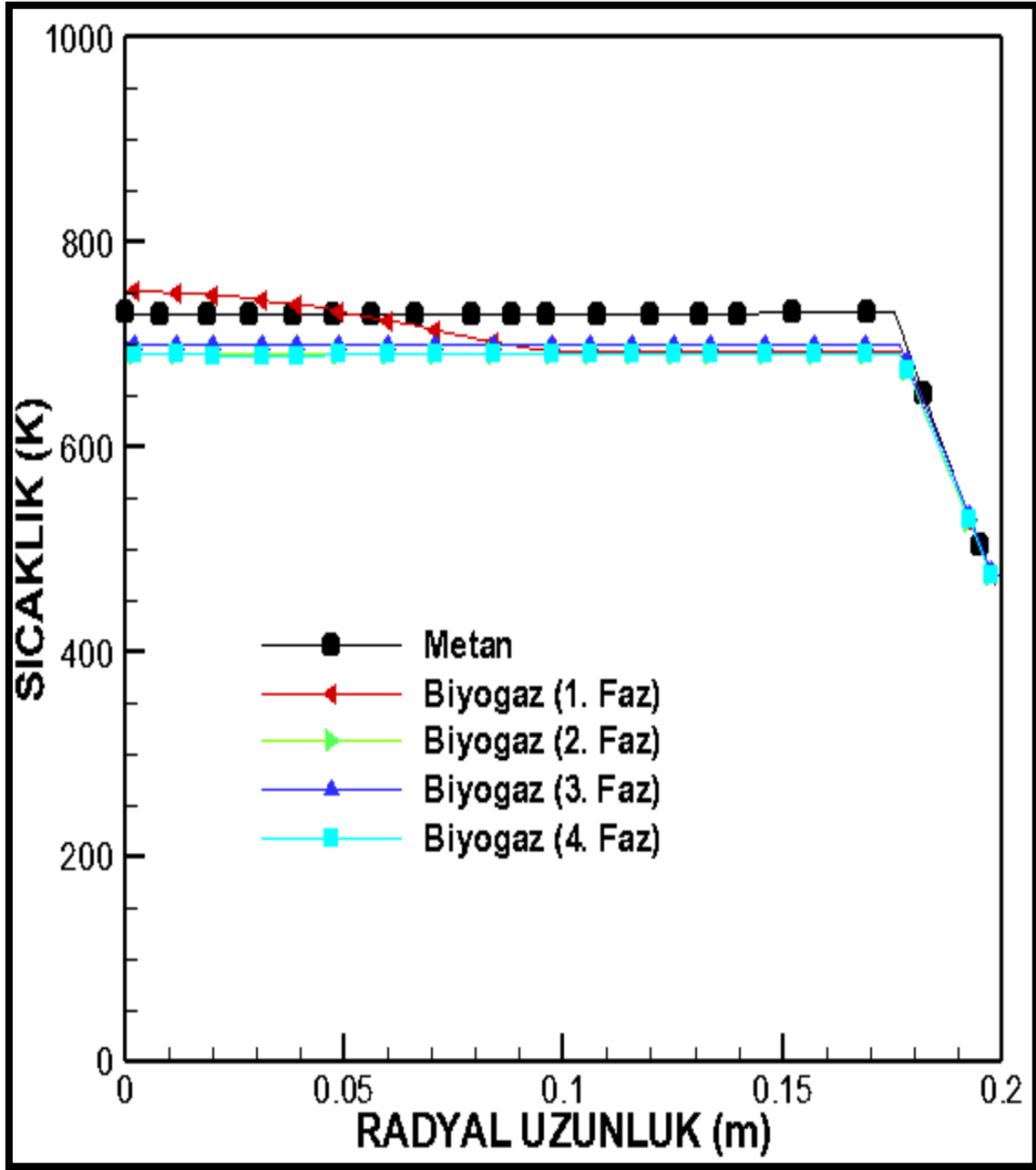
Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,3 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.5 'de gösterilmiştir. Yanma odası ekseninde en yüksek sıcaklık metan gazı yanma sonucu sıcaklığında gözlenmiştir. Yanma odası duvarına doğru radyal yönde sıcaklık dağılımları incelendiğinde biyogazların ve metanın benzer trendler gösterdiği söylenebilir.





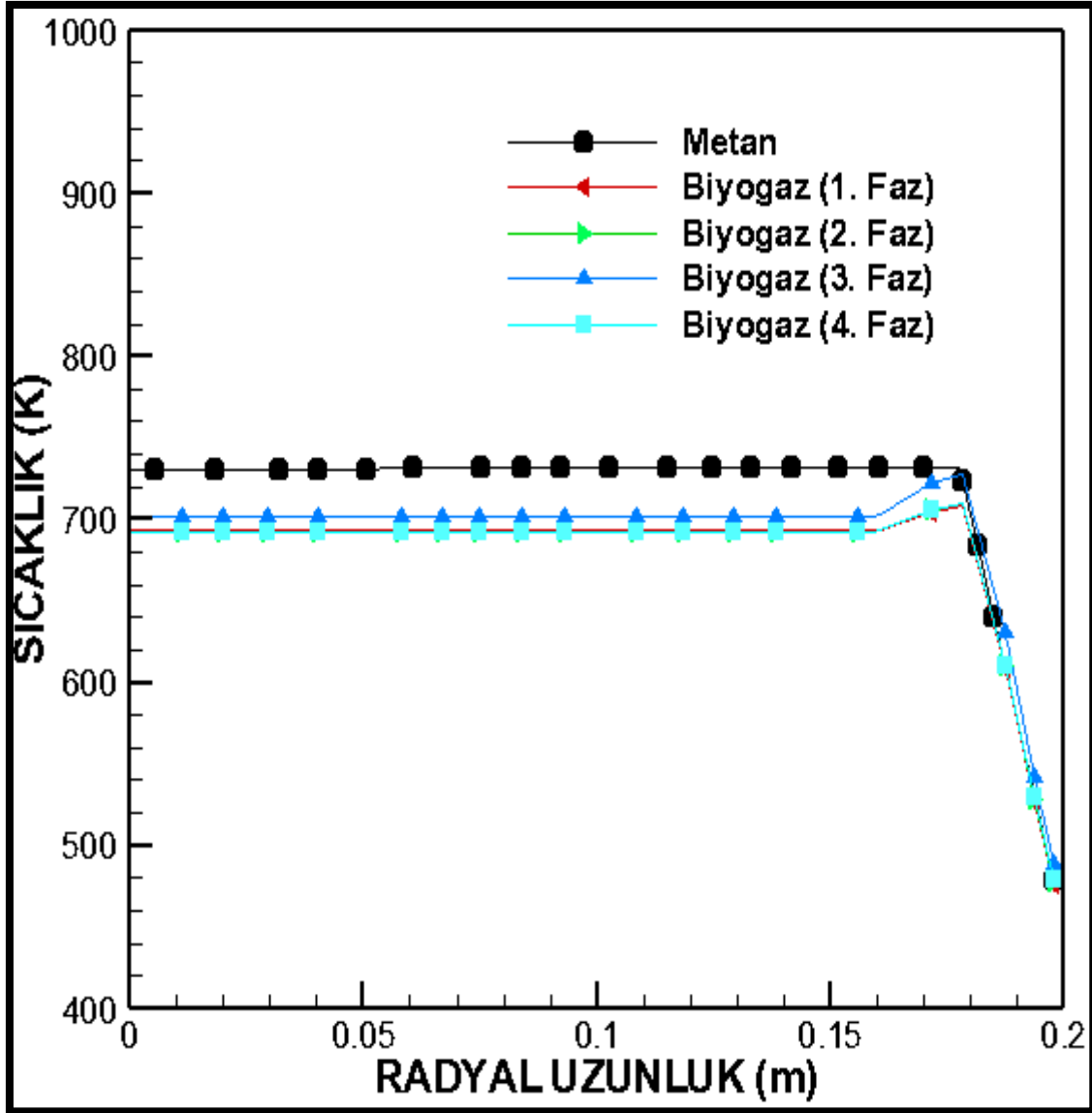
Şekil 6.6. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,5 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,5 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.6 'da gösterilmiştir. Yanma odası duvarına doğru radyal yönde sıcaklık dağılımları incelendiğinde biyogazların ve metanın benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



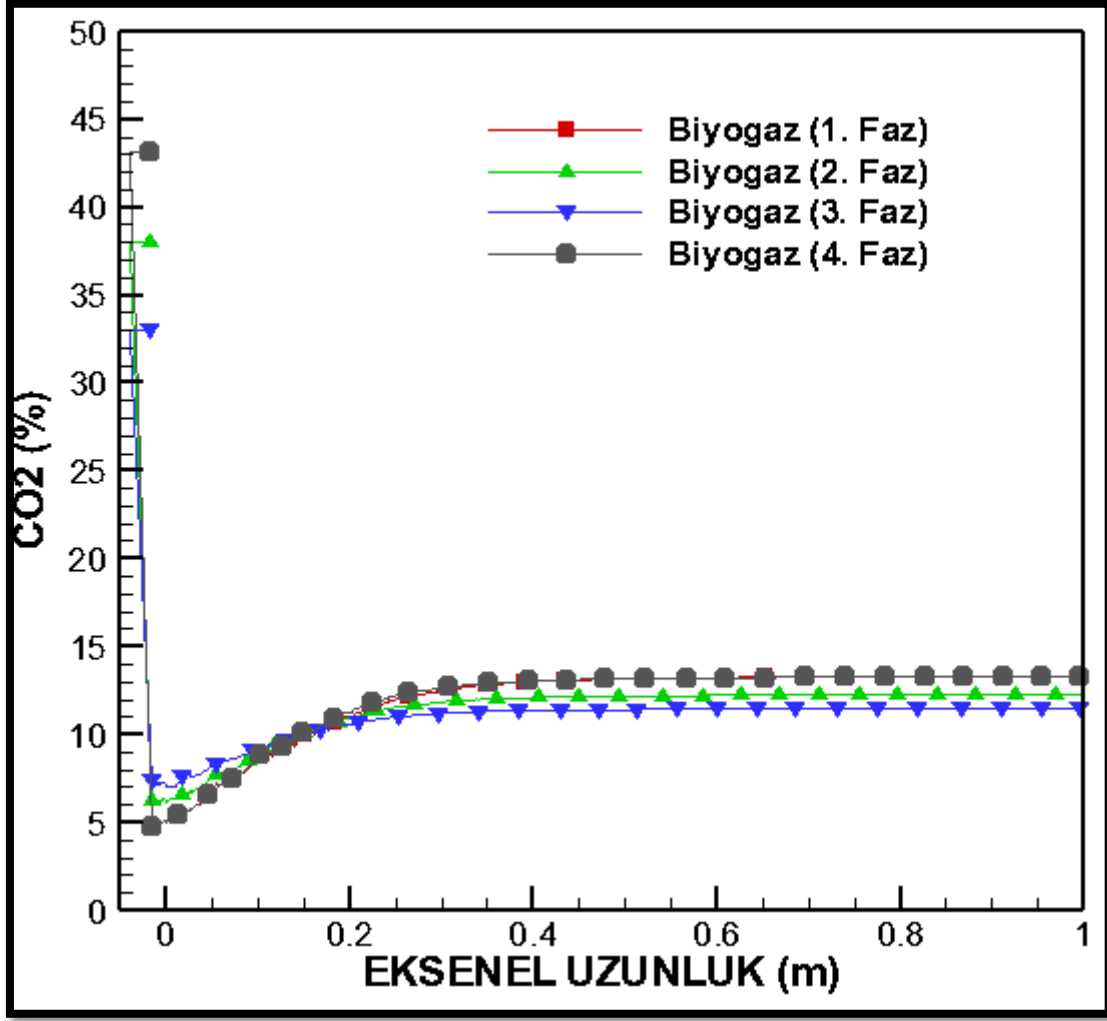
Şekil 6.7. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,7 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,7 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.7'de gösterilmiştir. 0,7 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sıcaklık sonuçları incelendiğinde, yanma odası duvarına doğru radyal yönde sıcaklık dağılımları incelendiğinde biyogazların ve metanın benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



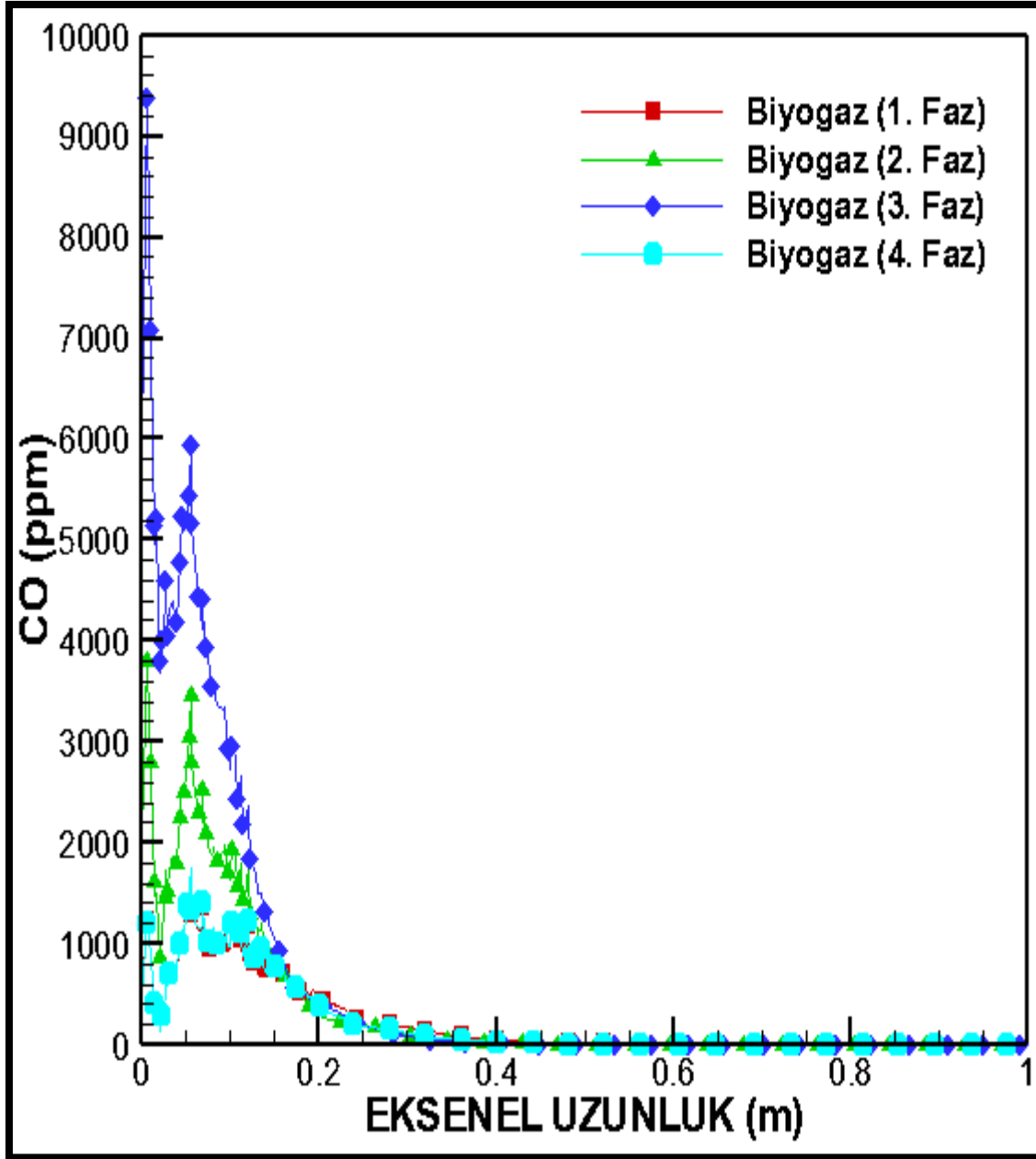
Şekil 6.8. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,9 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) 0,9 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.8 'de gösterilmiştir. 0,9 m'deki radyal sıcaklık dağılımının sayısal sıcaklık sonuçları incelendiğinde, yanma odası ekseninde metanın yanma sonucu sıcaklığının biyogazlardan yüksek olduğu gözlenmiştir. Yanma odası duvarına doğru radyal yönde sıcaklık dağılımları incelendiğinde biyogazların ve metanın benzer sıcaklık trendleri gösterdiği söylenebilir.



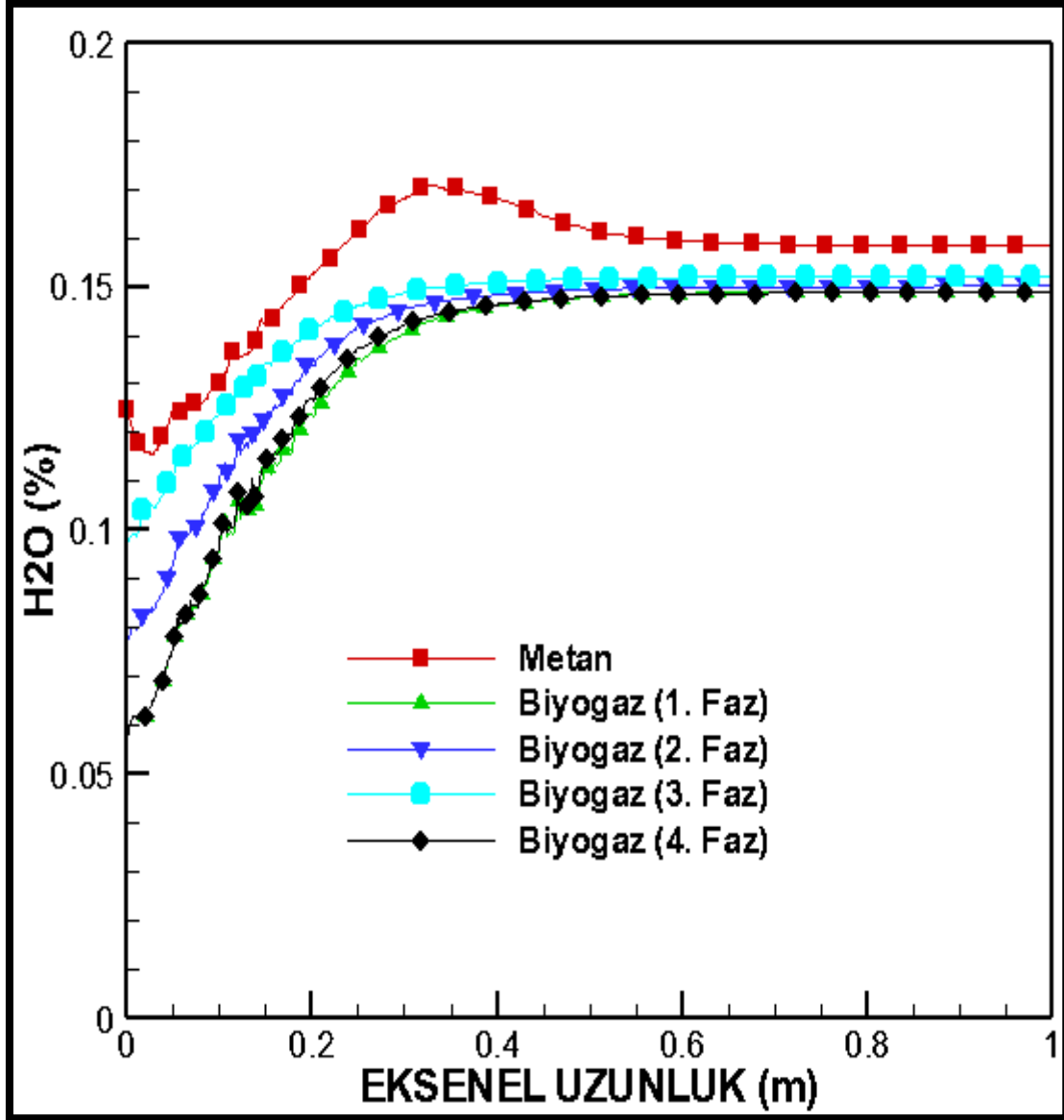
Şekil 6.9. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO<sub>2</sub> (%) değerlerinin aksnel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO<sub>2</sub> (%) değerlerinin aksnel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.9 'da gösterilmiştir. Dört farklı içeriğine sahip biyogazların yakma sonucu oluşan CO<sub>2</sub> (%) 'lerinin değişimleri bünyesinde ihtiva etmiş olduğu (%) 'ler ile yanma işlemine başlamış ve yanma odası boyunca benzer eğilimler göstermiş oldukları gözlenmektedir. Biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) gazların bünyelerinde ihtiva etmiş oldukları CO<sub>2</sub> (%) 'leri sırasıyla (%) 43,1, (%) 38, (%) 33 ve (%)43,1 'dir. Şekil 6.9 incelendiğinde yanma odası alev oluşum esnasında her yakıtın bünyesinde bulunan CO<sub>2</sub> (%) 'lerinde başlamış olduğu söylenebilir. Yanma odası çıkışına doğru biyogazların yanma sonucu elde edilen CO<sub>2</sub>(%) emisyonlarının benzer eğilimlerde olduğu gözlenmektedir.



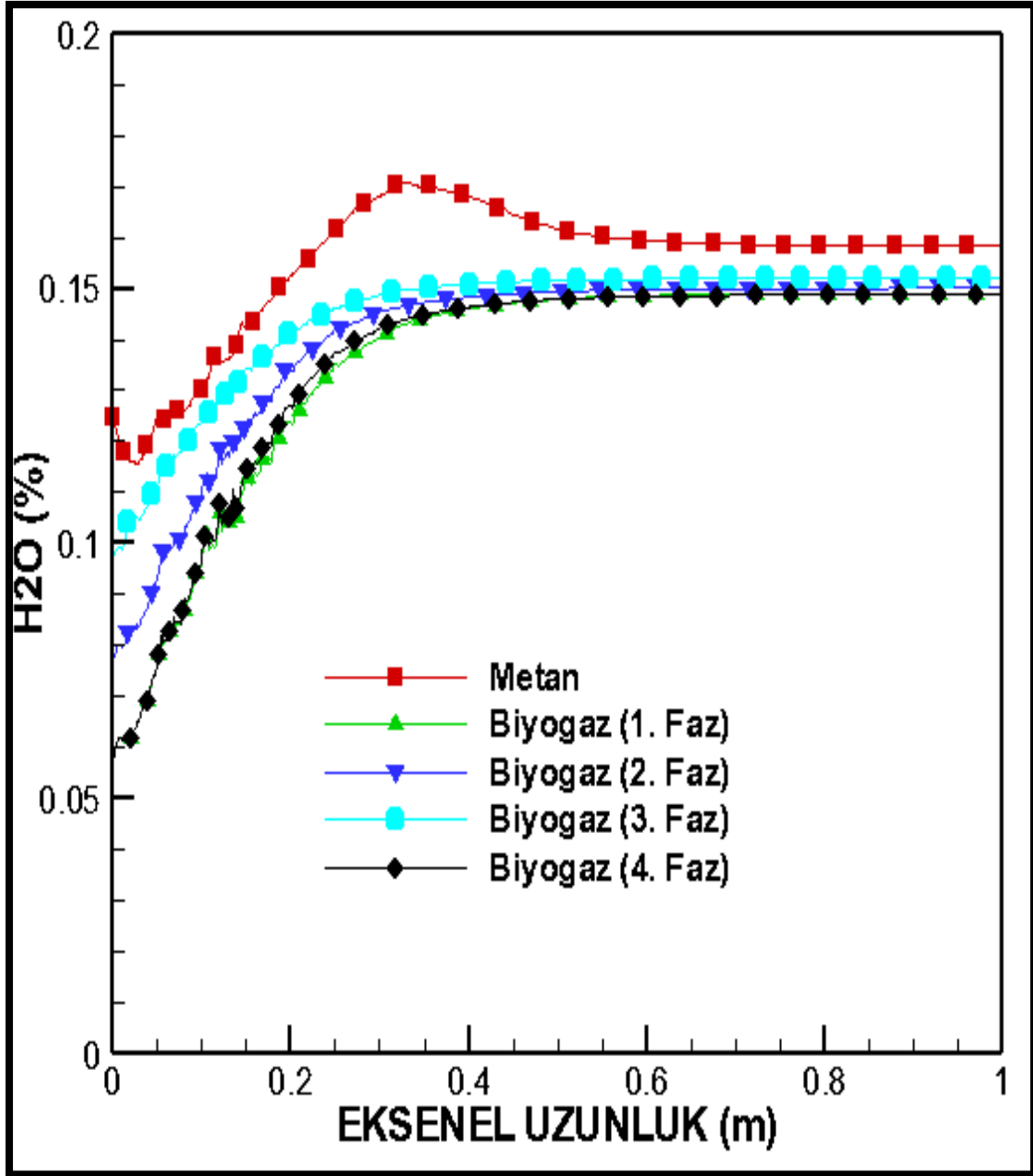
Şekil 6.10. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO (ppm) değerlerinin aksel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) CO (ppm) değerlerinin aksel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.10 'da gösterilmiştir. Dört farklı içeriğe sahip biyogazların yanma sonucu gazlarından CO (ppm) dağılımında biyogaz (3. Faz) emisyonunun diğer biyogaz yakıtlara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.11. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metanın H<sub>2</sub>O (%) değerlerinin aksnel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

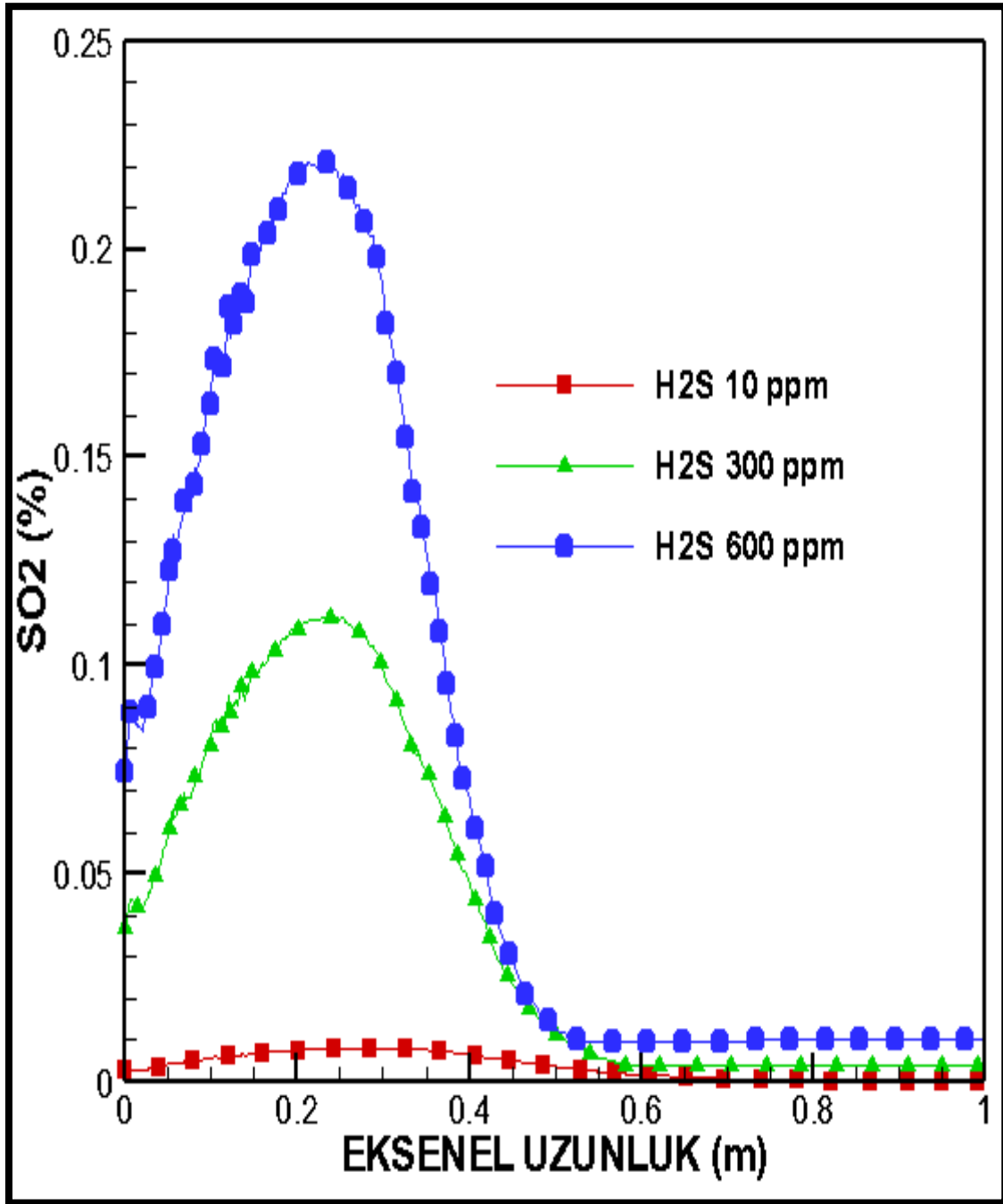
Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metanın H<sub>2</sub>O (%) değerlerinin aksnel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Metan gazının yanma sonucu elde edilen H<sub>2</sub>O (%) 'sinin dört farklı içeriğe sahip biyogazın yanması sonucu oluşan su buharı emisyonundan bir miktar yüksek olduğu gözlenmiştir. Biyogazların içeriğindeki metan oranı arttıkça H<sub>2</sub>O (%) olarak artmış olduğu Şekil 6.11 incelendiğinde söylenebilir. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metan H<sub>2</sub>O (%) değerlerinin aksnel dağılımının benzer trendleri olduğu söylenebilir.



Şekil 6.12. Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metanın O<sub>2</sub> (%) değerlerinin aksel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metanın O<sub>2</sub> (%) değerlerinin aksel dağılımının sayısal sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Dört farklı içeriğe sahip biyogazların bünyesinde ihtiva etmiş olduğu O<sub>2</sub> (%)'den dolayı yanma sonucu emisyonunda bulunan O<sub>2</sub> (%) metana göre yüksek olduğu söylenebilir. Biyogazların başlangıçta bünyesinde bulundurdıkları oksijen miktarları yanma odası aksel boyunca yanma sürecinde benzer trendler gösterdiği söylenebilir.

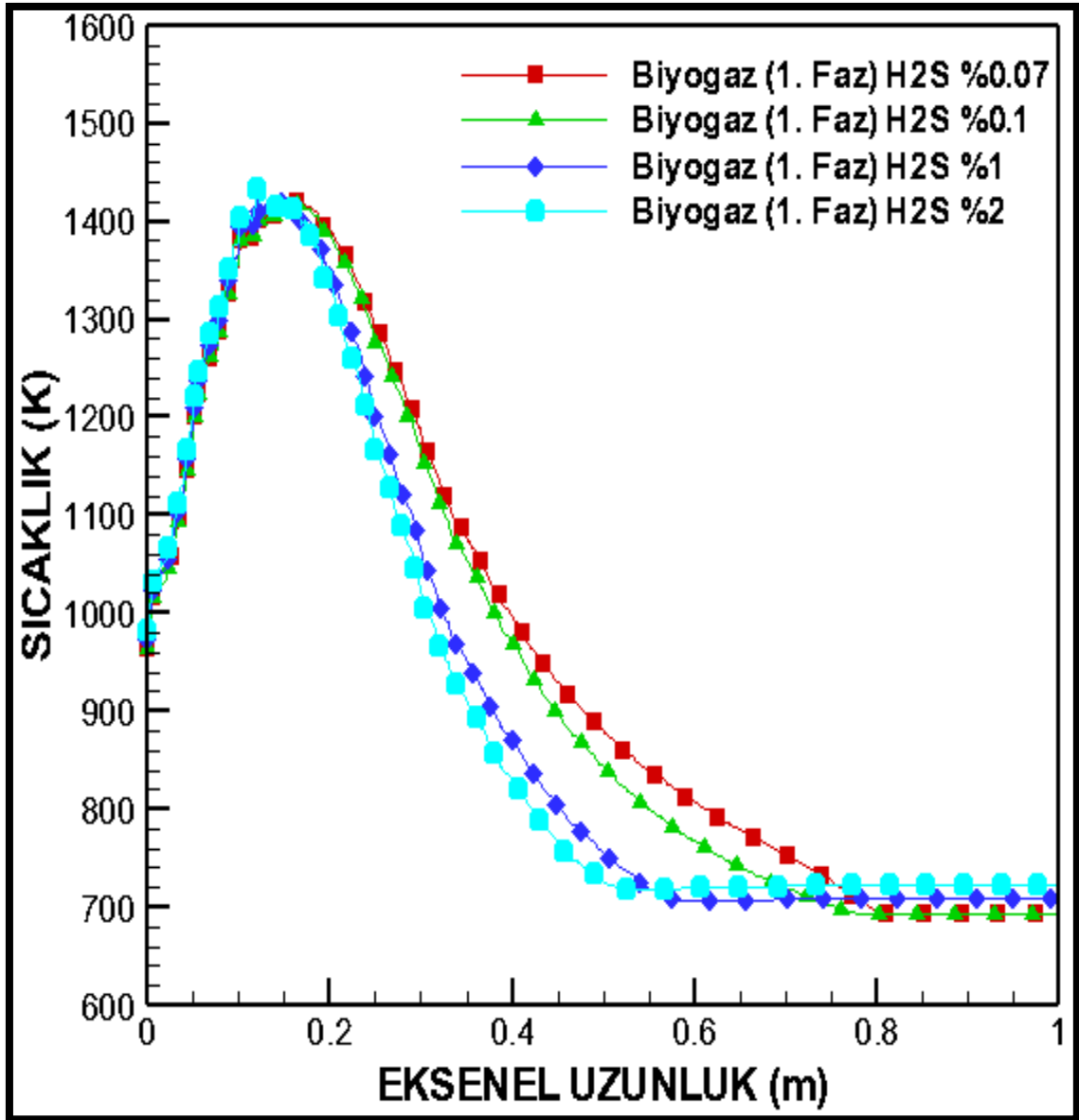
Biyogaz ve metan yanma odası çıkışına doğru O<sub>2</sub> (%) eğrilerini benzer eğilimlerde oldukları gözlenmiştir.



Şekil 6.13. SO<sub>2</sub> (%) değerleri(H<sub>2</sub>S ppm oranlarına göre değişimi)

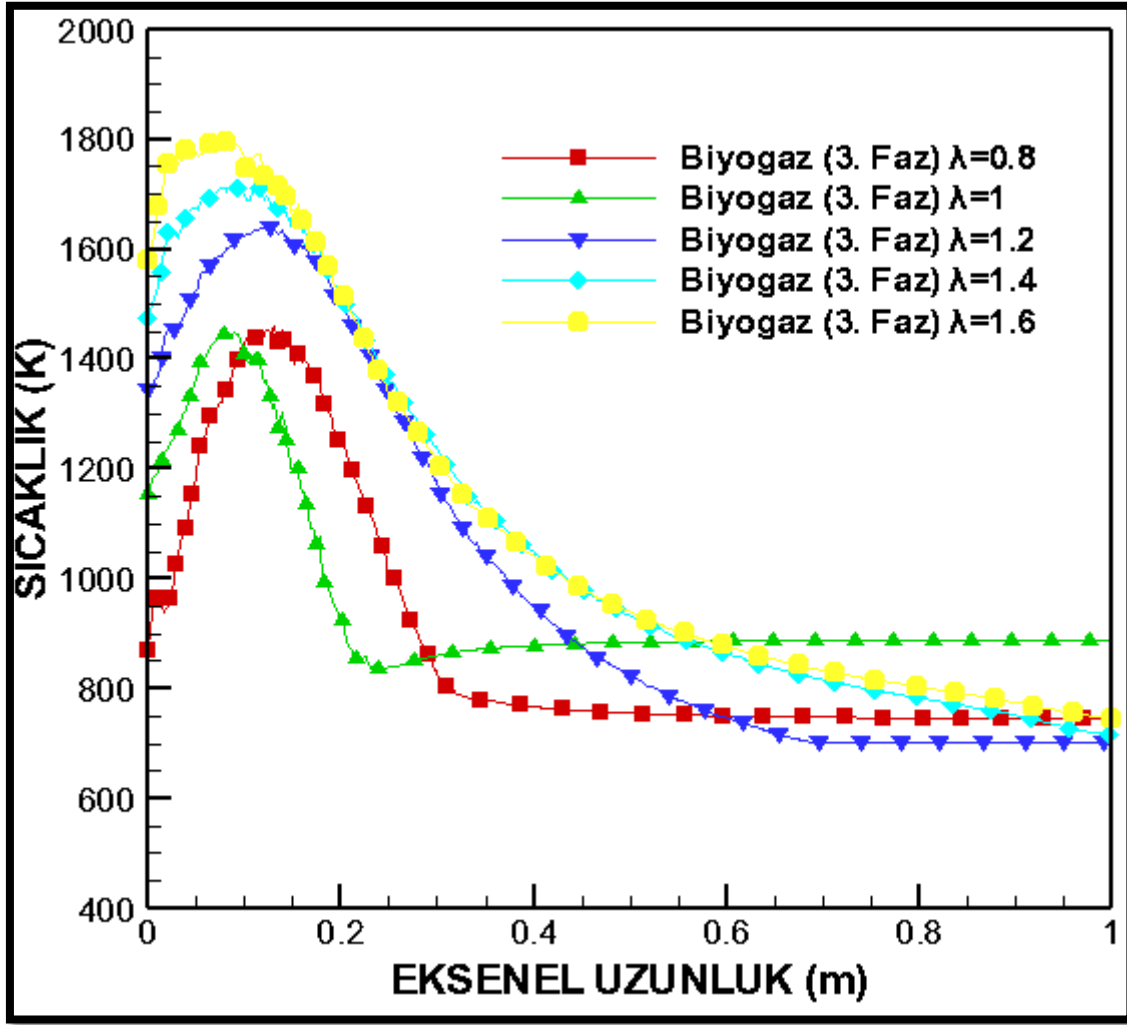
Biyogaz (1. Faz) bünyesinde ihtiva ettiği H<sub>2</sub>S (%) oranlarının 10 ppm, 300 ppm, 600 ppm olarak değişime göre yanma sonucu gazlardan elde edilen SO<sub>2</sub> (%) değerleri Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Biyogaz içeriğindeki H<sub>2</sub>S (ppm) oranının artmasıyla, yanma sonucu elde edilen emisyonlardaki SO<sub>2</sub> (%) olarak arttığı Şekil 6.13 incelendiğinde söylenebilir.





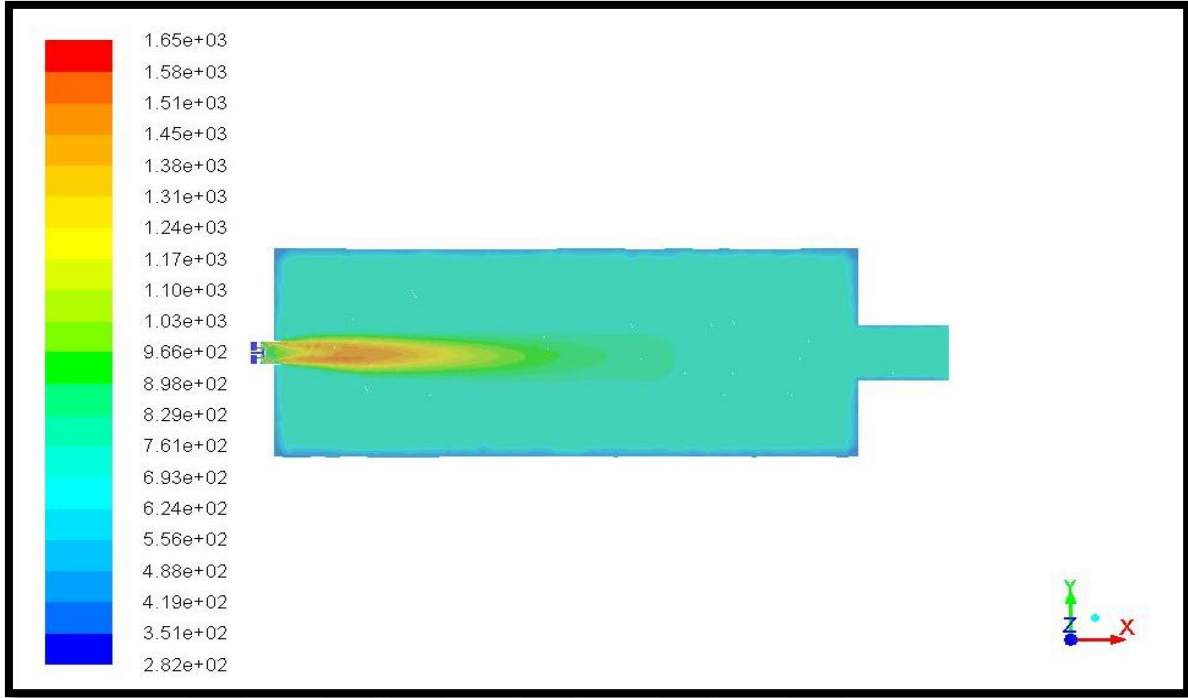
Şekil 6.14. Biyogaz (1.Faz) gazının farklı H<sub>2</sub>S değerlerine göre aksel sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Biyogaz (1.Faz) gazının farklı H<sub>2</sub>S değerlerine göre aksel sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6.14'de sunulmuştur. Biyogaz (1.Faz) içeriğinde farklı H<sub>2</sub>S (%) oranları arttıkça yanma alev sıcaklık değerlerinde az bir miktar artma olduğu söylenebilir. H<sub>2</sub>S (%0,07), H<sub>2</sub>S (%0,1), H<sub>2</sub>S (%1) ve H<sub>2</sub>S (%2) oranlarını ihtiva ettiğinde Biyogaz (1. Faz) sıcaklık değerleri Şekil 6.14 incelendiğinde yanma odası akseni boyunca benzer eğilimlerde buldukları söylenebilir. Biyogaz (1.Faz) içeriğinde H<sub>2</sub>S(%2) bulduğunda yanma alev sıcaklığının diğer oranlara kıyasla az bir miktar yüksek olduğu söylenebilir.



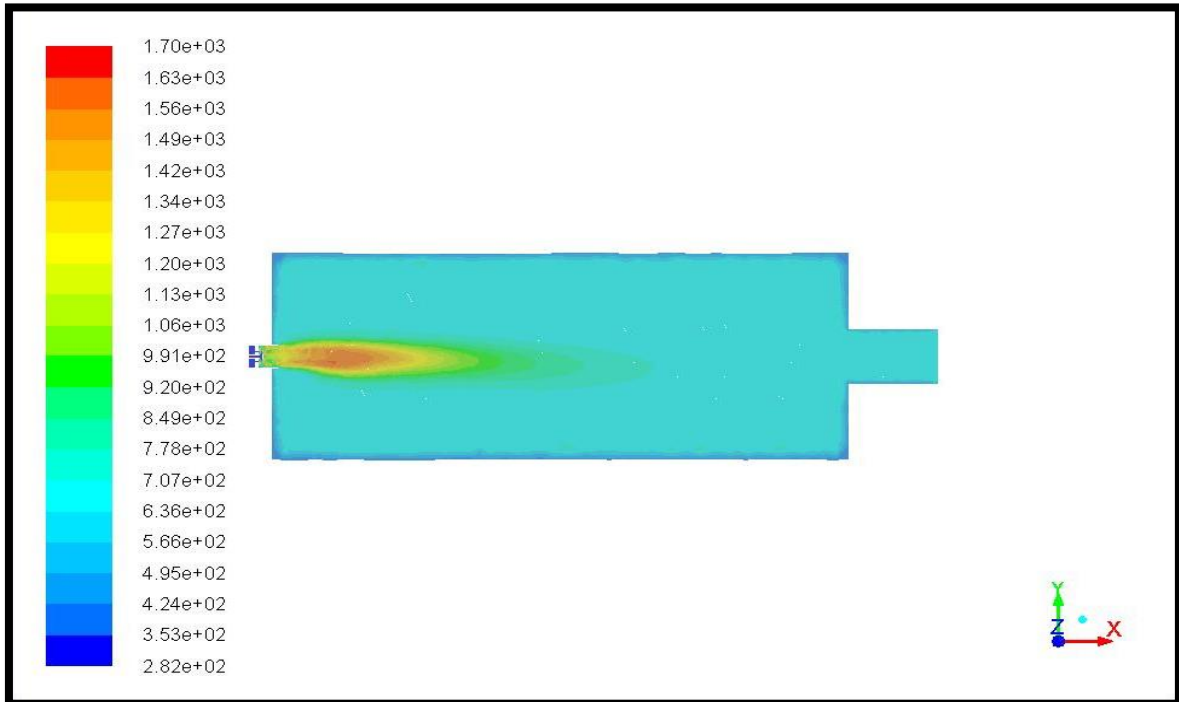
Şekil 6.15. Biyogaz (3.Faz) yakıtının hava fazlalık katsayısına göre sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Biyogaz (3.Faz) hava fazlalık katsayısına göre sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6.15 'de gösterilmiştir. Yanma alev bölgesinde hava fazlalık katsayısı arttığında bölgesel sıcaklığının arttığı, fakat yanma odası eksenel yönde stokiyometrik  $\lambda=1$  hava fazlalık katsayısında sıcaklık değerlerinin diğer  $\lambda=0,8$ ,  $\lambda=1,2$ ,  $\lambda=1,4$ , ve  $\lambda=1,6$  hava fazlalık katsayılarında ki yanma sıcaklık değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yanma odası çıkışına doğru  $\lambda=1$  hava fazlalık katsayısında sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu Şekil 6.15 incelendiğinde gözlenmektedir.



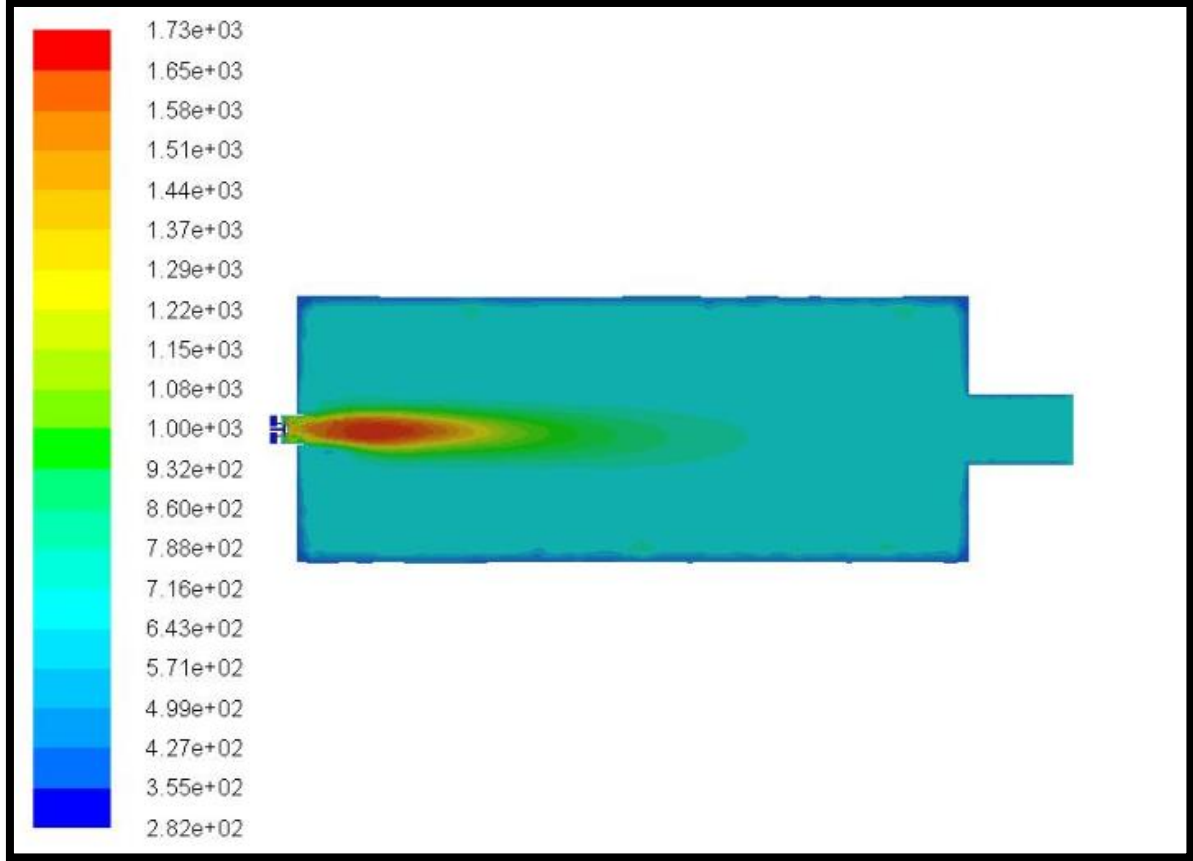
Şekil 6.16. Biyogaz (1. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı

Biyogaz (1. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı Şekil 6.16 'da gösterilmiştir. Biyogaz (1. Faz) yanma odasında alev bölgesindeki sıcaklık dağılımının, yanma odası duvarına ve yanma odası çıkışına doğru azaldığı söylenebilir.



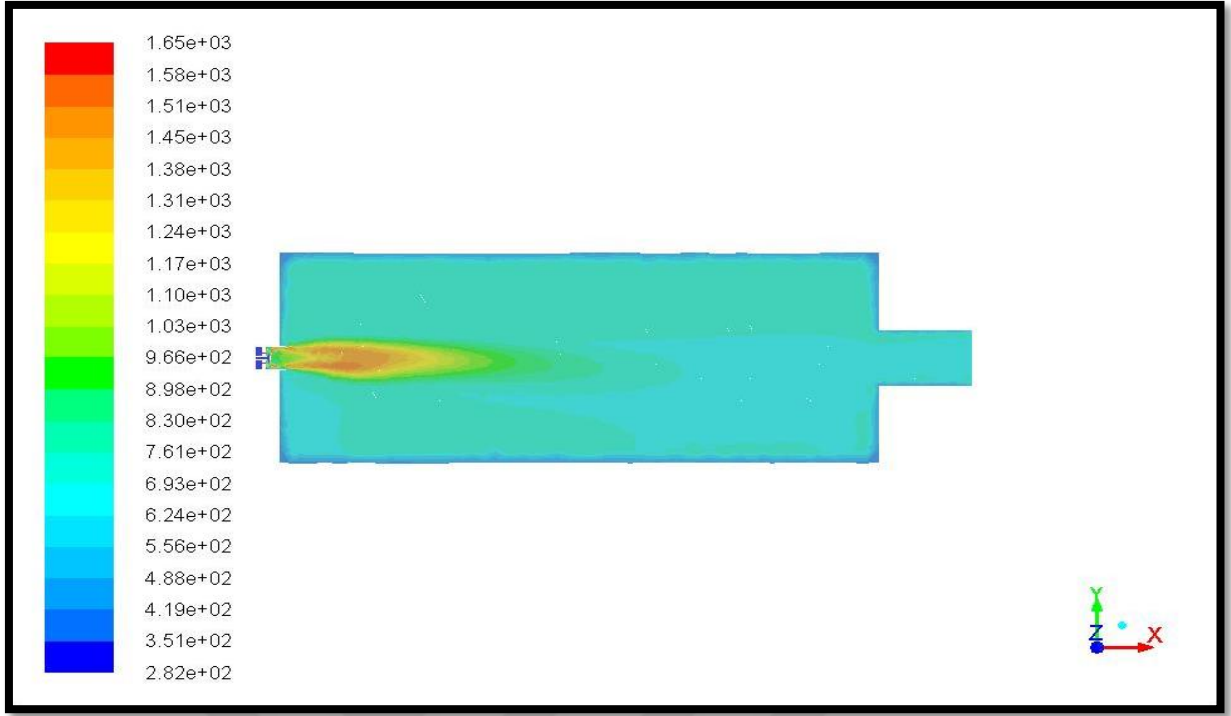
Şekil 6.17. Biyogaz (2. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı

Biyogaz (2. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı Şekil 6.17 'de gösterilmiştir. Biyogaz (2. Faz) yanma odasında alev bölgesindeki sıcaklık dağılımının, yanma odası duvarına ve yanma odası çıkışına doğru azaldığı söylenebilir.



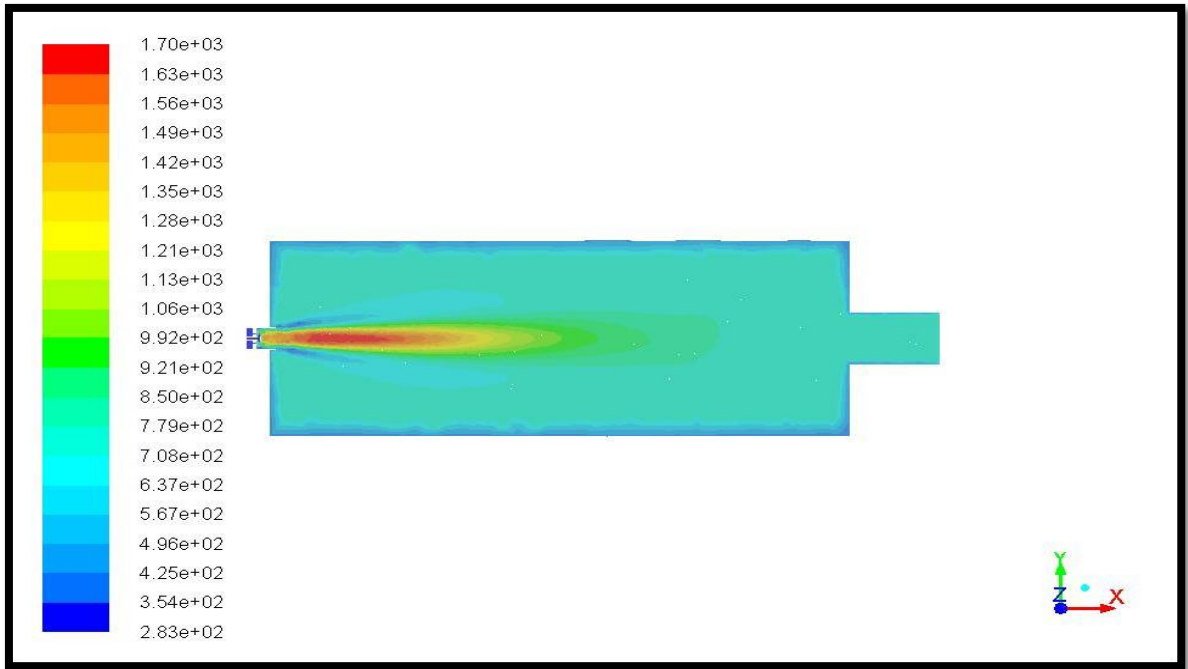
Şekil 6.18. Biyogaz (3. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı

Biyogaz (3. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı Şekil 6.18 'de gösterilmiştir. Biyogaz (3. Faz) yanma odasında alev bölgesindeki sıcaklık dağılımının, yanma odası duvarına ve yanma odası çıkışına doğru azaldığı söylenebilir. Biyogaz (3. Faz) bünyesinde ihtiva etmiş olduğu metan oranı (%) 65 olduğundan dolayı yanma alev sıcaklığı diğer biyogazların alev yanma sıcaklıklarına göre bir miktar daha yüksek olduğu söylenebilir.



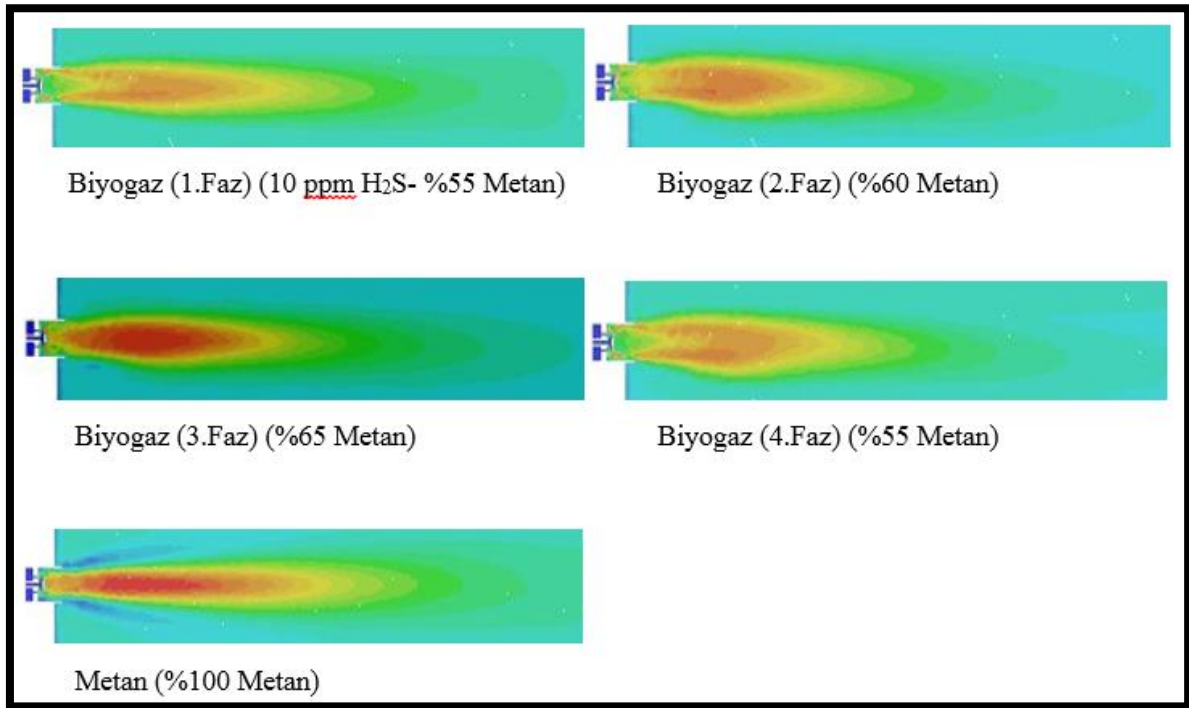
Şekil 6.19. Biyogaz (4. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı

Biyogaz (4. Faz) yanma odası sıcaklık dağılımı Şekil 6.19 'da gösterilmiştir. Biyogaz (4. Faz) yanma odasında alev bölgesindeki sıcaklık dağılımının, yanma odası duvarına ve yanma odası çıkışına doğru azaldığı söylenebilir.



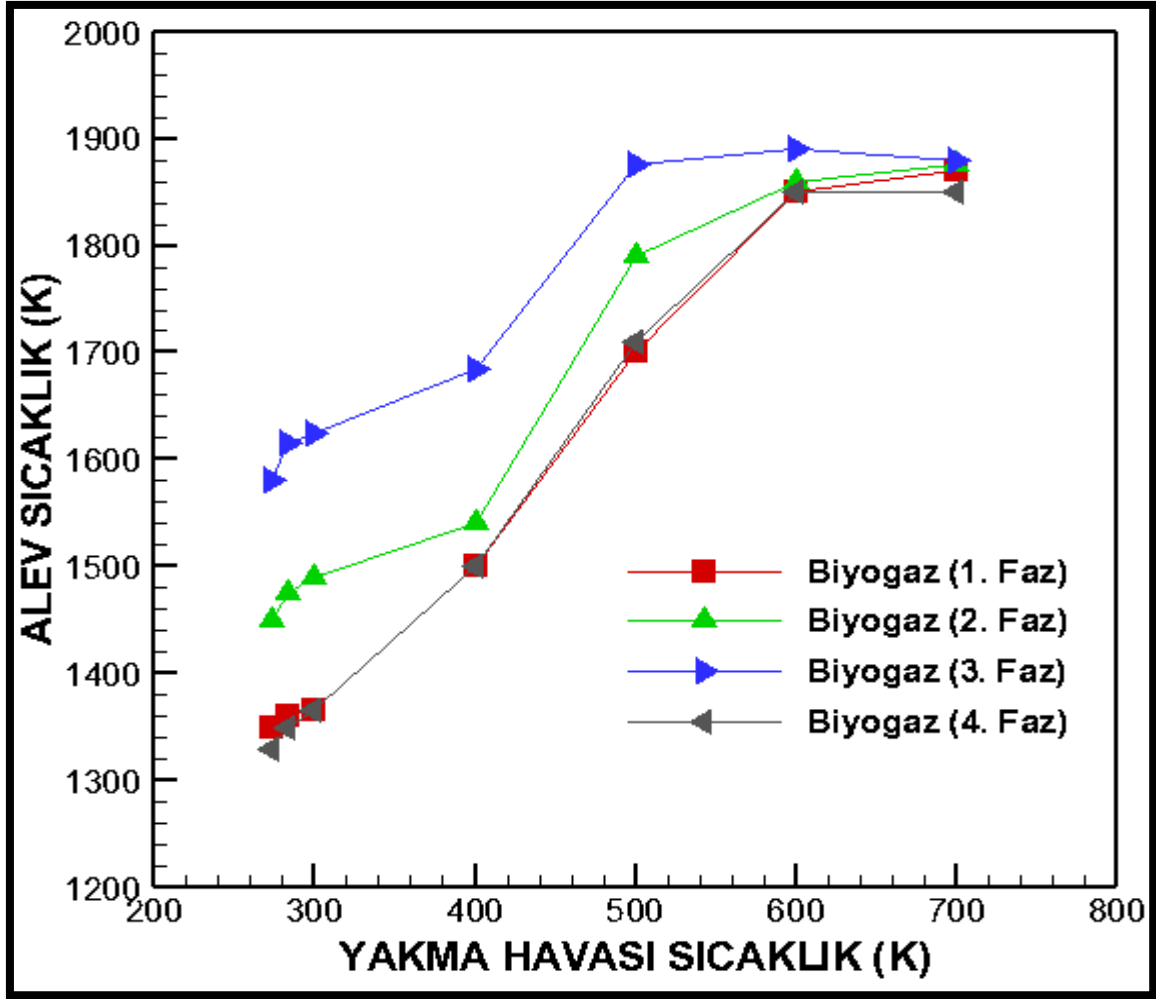
Şekil 6.20. Metan yanma odası sıcaklık dağılımı

Metan yanma odası sıcaklık dağılımı Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Metan gazının kazan içi yanma sıcaklık dağılımı Şekil 6.20 incelendiğinde yanma odası duvarlarına ve çıkışına doğru azaldığı gözlenmektedir. Biyogaz içeriğindeki metan oranının artışıyla beklenen yanma alev sıcaklığın bir miktar artma olduğu daha önceki grafiklerde gözlenmişti. Bu doğrultuda metanın yanma alev bölgesi sıcaklığının biyogazlardakinden bir miktar daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 6.21. Biyogaz(1. Faz), biyogaz(2. Faz), biyogaz(3. Faz), biyogaz (4. Faz) ve metan yakıtlarının yanma alev sıcaklıklarının sayısal analizinin karşılaştırılması

Biyogaz(1. Faz), biyogaz(2. Faz), biyogaz(3. Faz), biyogaz(4. Faz) ve metan yakıtlarının yanma alev sıcaklıklarının sayısal analizinin karşılaştırılması özet olarak Şekil 6.21.’de gösterilmiştir. Sayısal analiz sonucu en yüksek yanma alev sıcaklığı Şekil 6.20. ‘de metan yanma alev sıcaklığı olarak gösterilmiştir. Metan yanma alev sıcaklığına yakın değerler sırasıyla biyogaz (3. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (1. Faz) ve biyogaz (4. Faz) yanma alev sıcaklıkları elde edilmiştir. Yanma alev sıcaklık değerleri oluşmasına neden olan ana faktör olarak yakıtların içerdikleri metan gazının olduğu tespit edilmiştir.



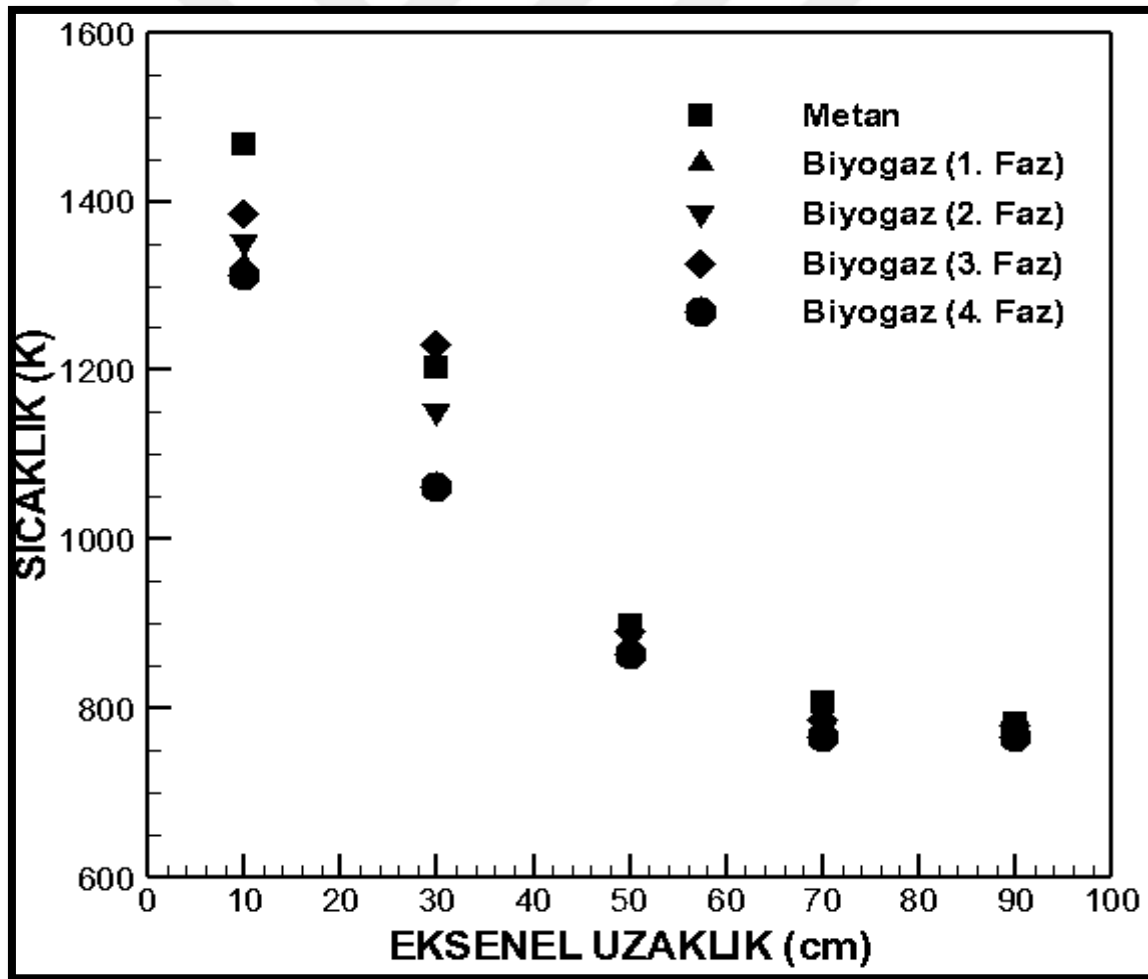
Şekil 6.22. Ön ısıtmalı yakma havası sıcaklıklarına göre alev sıcaklıklarının değişimi

Yanma odası alev bölgesindeki, ön ısıtmalı yakma havası sıcaklıklarına göre alev sıcaklıklarının değişimi Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Ön ısıtmalı yakma havası sıcaklıklarını arttırdıkça biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) gaz yakıtların yakma sonucu elde edilen sıcaklıklarında artmakta olduğu söylenebilir. Ön ısıtmalı yakma havası sıcaklıklarının biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) yakma sonucu elde edilen sıcaklıklarda benzer eğilimler olduğu gözlenmiştir.

## 6.2. Deneysel Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, tarif edilen metan brülörü kullanılarak 10 kW ısı gücü ve 0,83 eşdeğerlilik oranı için yapılan deneyler neticesinde aksel ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında deneydeki hava ve yakıtın yanma odası

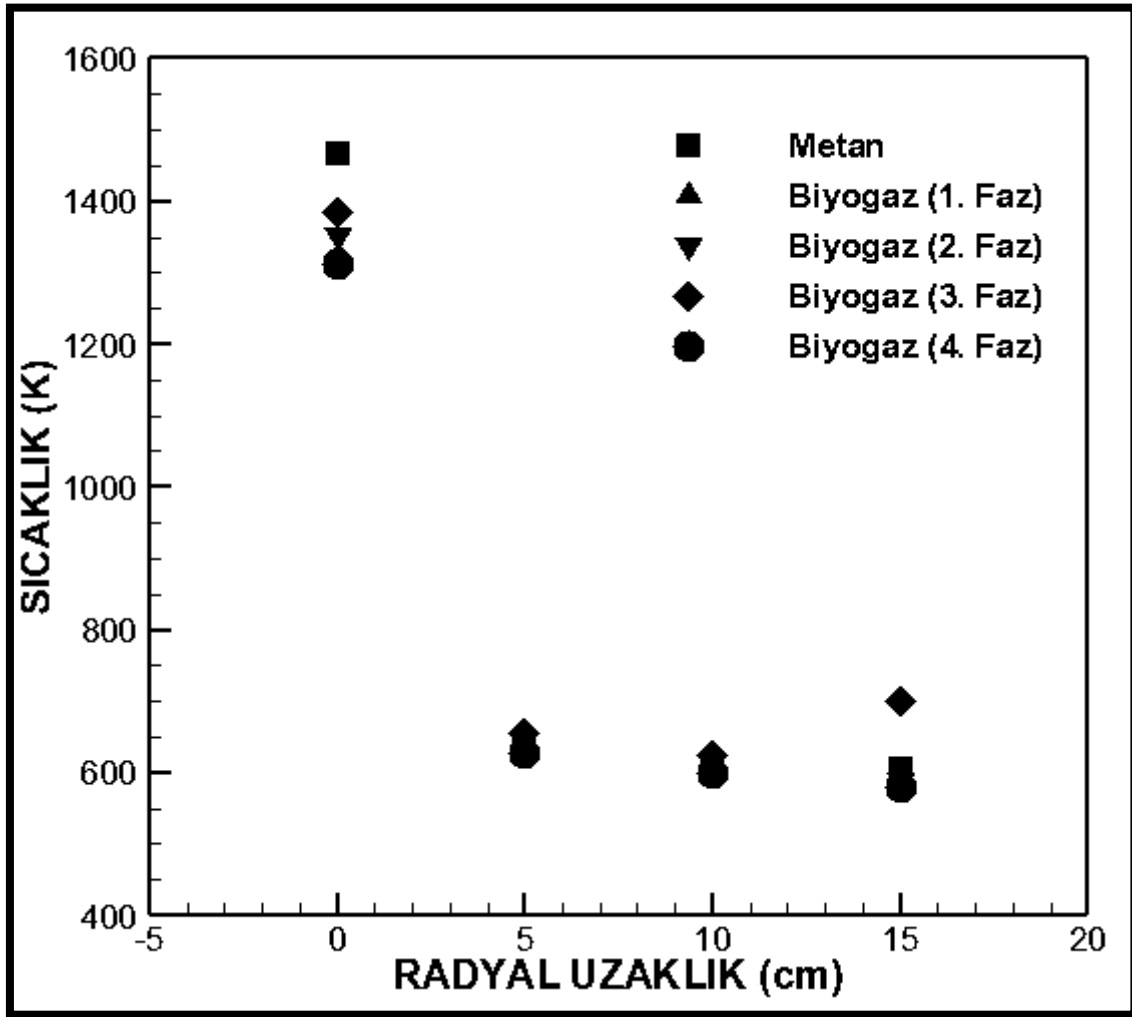
giriş basınçları 21 mbar olarak ayarlanmıştır. Eksenel yönde elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 6.23 'de gösterilmiştir. Şekil 6.23 'den de görüleceği gibi, tüm biyogaz fazlarında, en yüksek sıcaklık değerlerine alev bölgesinde ulaşılmıştır. Metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) alevleri için elde edilen sıcaklık değerleri sırasıyla 1466,54 K, 1323,98 K, 1351,71 K, 1385,90 K ve 1312 K'dir. Alev bölgesinden yanma odası çıkışına doğru gidildikçe yanma sonu ürünlerinin sıcaklık değerleri azalmaktadır. Genel eğilim değerlendirildiğinde, biyogazların ve metan alevlerinin sıcaklık eğilimleri birbirine yakın seyretmesine rağmen, yanma odasının büyük bir bölümünde, metan alevine ait sıcaklık değerlerinin az bir miktarda yüksek olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeninin, metan ısıl gücünün biyogazlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.23. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) eksenel sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



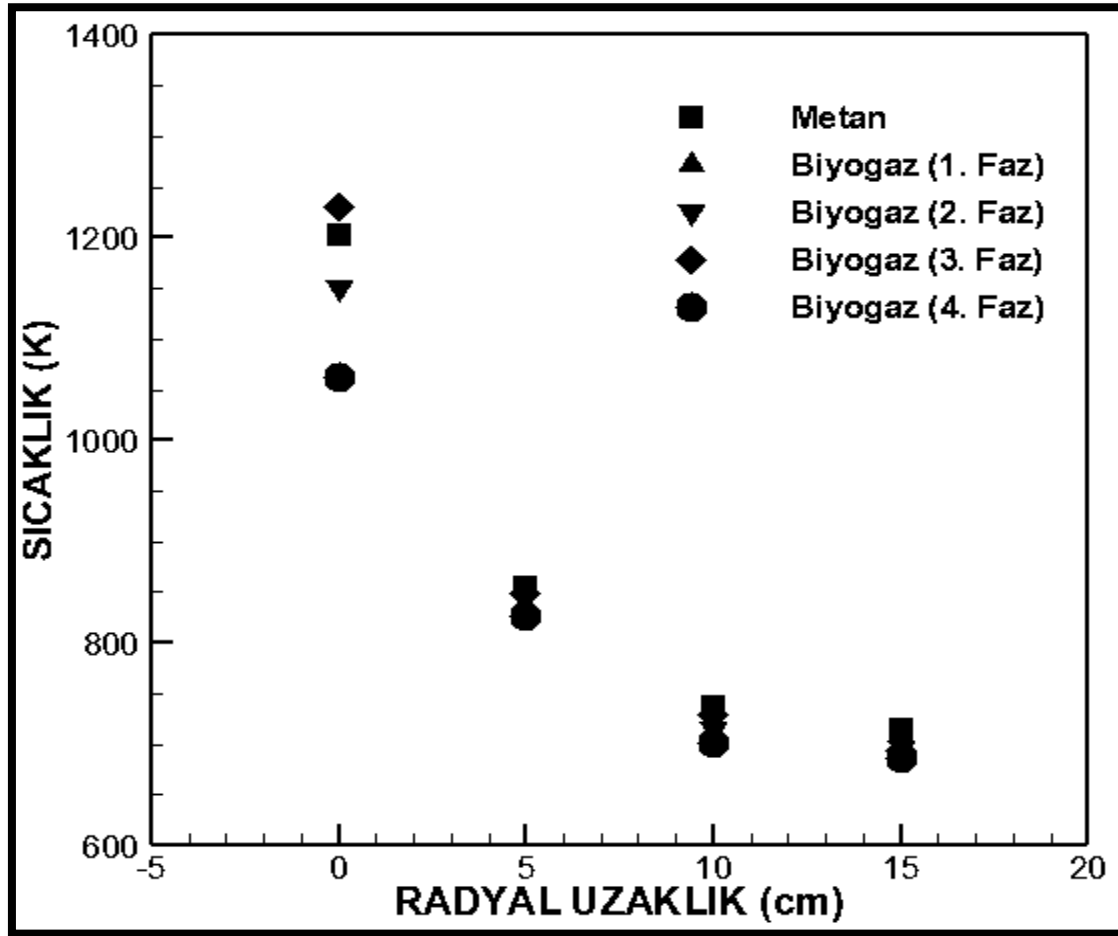
Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) aksenal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.23’de gösterilmiştir. Yanma odası alev bölgesinden yanma odası çıkışına kadar eksendeki sıcaklık değerleri genellikle en yüksekten sırasıyla metan, biyogaz (3. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (4. Faz) ve biyogaz (1. Faz) olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni için gaz yakıtların bünyelerinde ihtiva etmiş oldukları  $CH_4$  (%) olarak açıklanabilir.



Şekil 6.24. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm’deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

0,1 m’deki radyal sıcaklık dağılımına ilişkin veriler Şekil 6.24 ’de gösterilmiştir. Eksendeki sıcaklık değerleri oldukça yüksek olmasına rağmen (alev bölgesi) yanma odasının duvarlarına gidildikçe metan, biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) alevi yanma sonu gazlarının sıcaklıkları oldukça düşmektedir. Bilindiği gibi, çalışmada kullanılan yanma odası ani genişlemelidir. Ani genişlemeli yanma

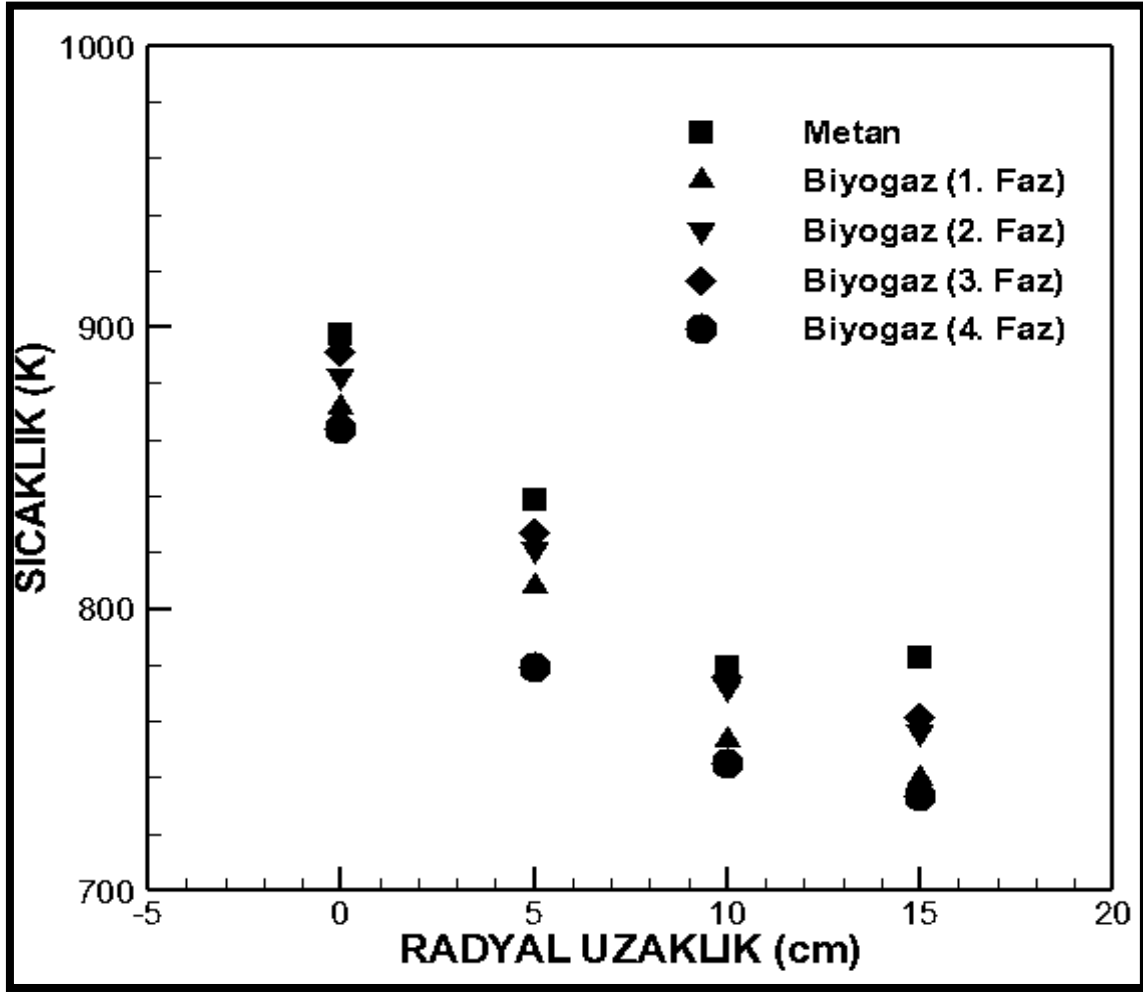
odalarında, brülör çıkışı ile yanma odası arasındaki bölgeler genellikle resirkülasyona uğrarlar. Bu nedenle, bu bölgedeki sıcaklık değerlerinin nispeten düşük olması beklenen bir sonuçtur. Metan ve biyogaz alevleri birbiriyle karşılaştırılacak olursa, 0,1 m'deki metanın alev sıcaklığının bir miktar yüksek olduğu ve diğer biyogazların radyal sıcaklık dağılımları için kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.25. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

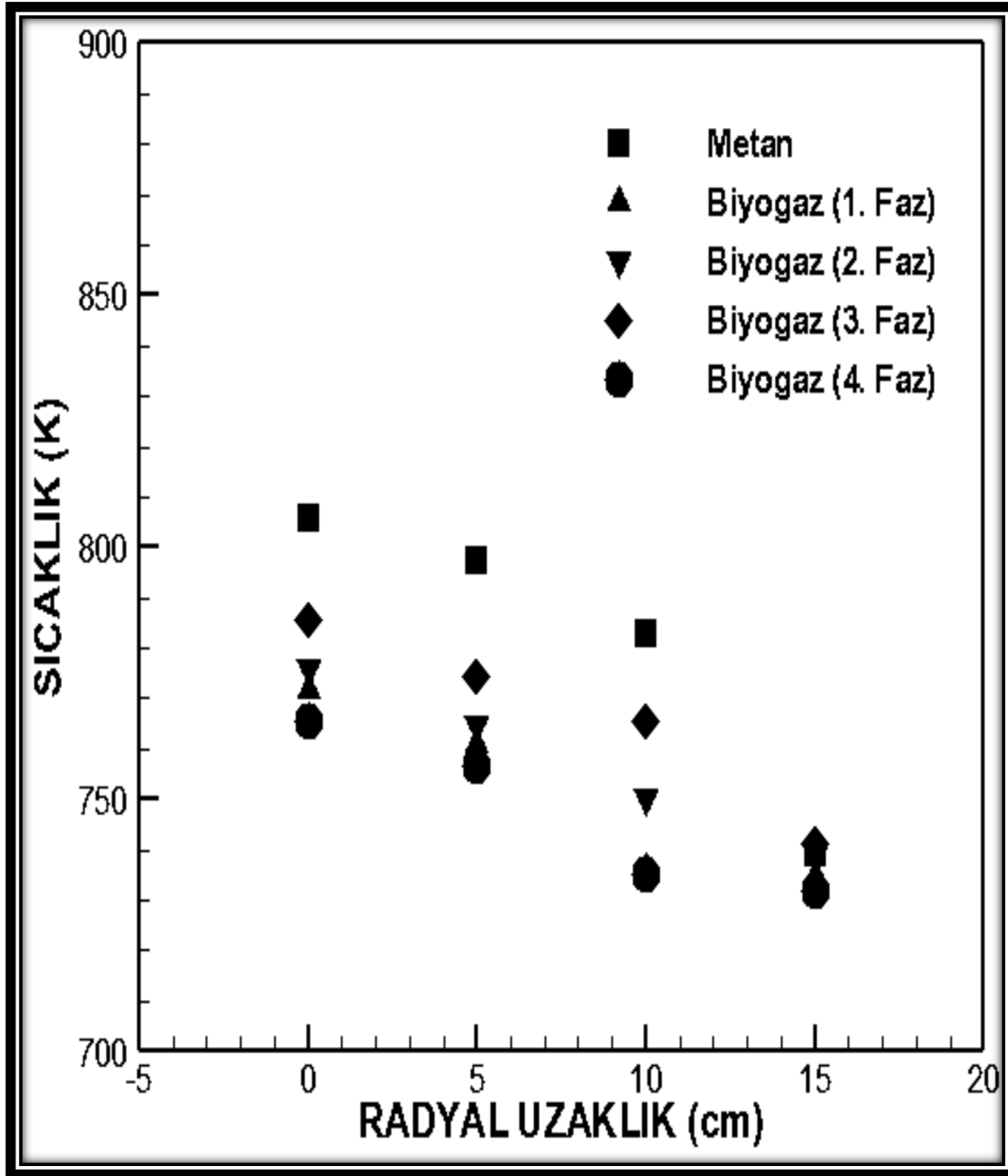
Metan ve biyogazların 0,3 m'deki radyal sıcaklık dağılımına ilişkin veriler Şekil 6.25'de sunulmuştur. 0,1 m'deki radyal sıcaklık dağılımlarına göre karşılaştırma yapılırsa, yanma sonu gazlarının yanma odasına yayılmaya başladığı ve bu nedenle de sıcaklık değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca, neredeyse tüm yanma odası boyunca, metan alevinin sıcaklık değerlerinin biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) alevlerine göre genelde yüksek olmasına rağmen, Biyogaz (3.Faz) alev sıcaklığının diğer biyogazlara nispeten daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun temel nedeni,

biyogaz (3.Faz)'ın diğer biyogazlara göre içeriğinde daha yüksek metan gazı bulunması ile açıklanabilir. Biyogaz (3.Faz) 'dan sonra biyogaz (2.Faz) sıcaklığının diğer biyogazlara göre yüksek olması yine içeriğindeki metan oranının yüksek olması ile açıklanabilir. Bu durum dikkate alındığında sırasıyla metan, biyogaz (3.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (1.Faz) ve biyogaz (4.Faz) alevinin sıcaklık değerlerinin genel olarak yüksek olduğu savunulabilir.



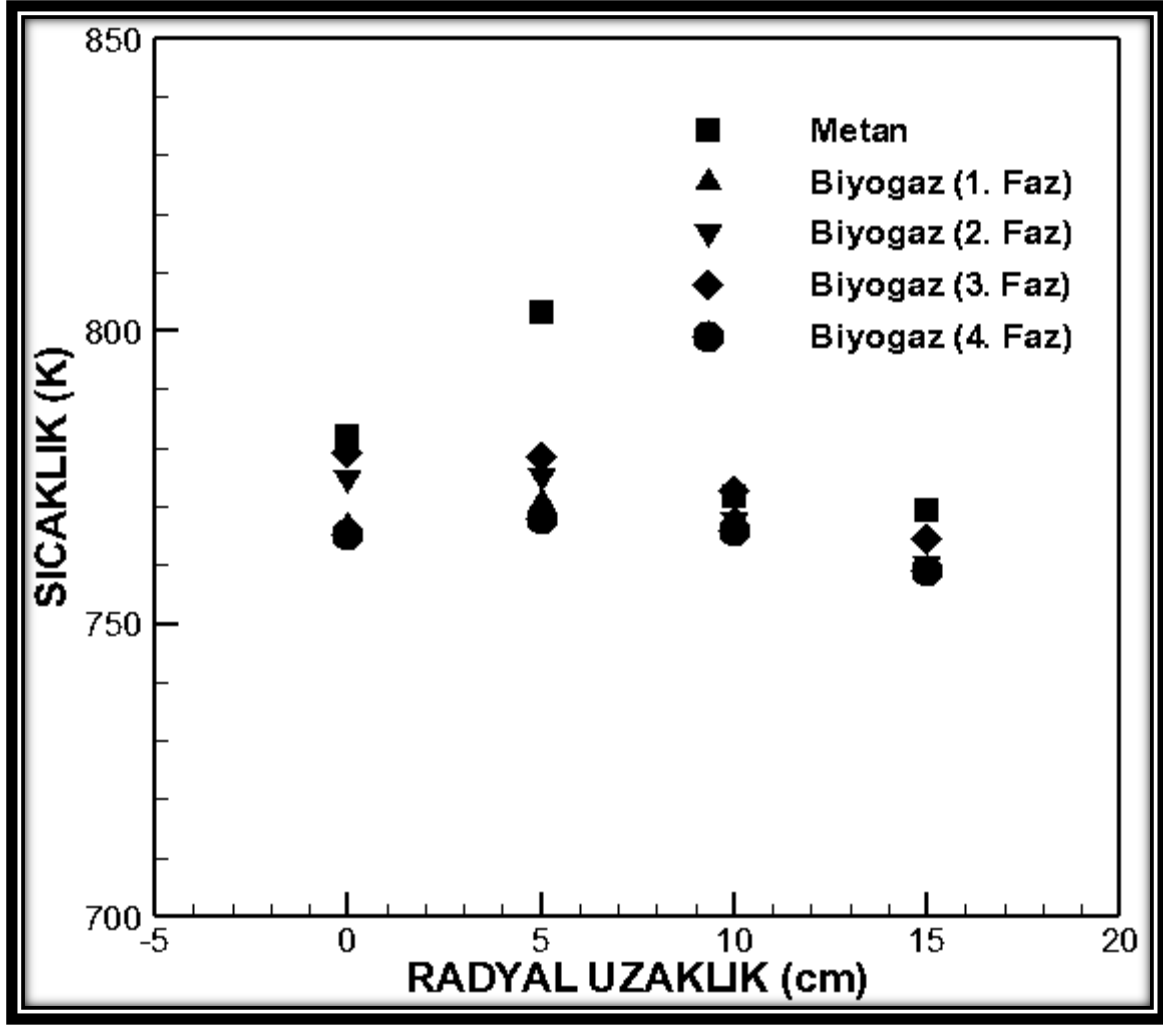
Şekil 6.26. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Metan ve biyogazların 50 cm'deki radyal sıcaklık dağılımına ilişkin veriler Şekil 6.26 'da sunulmuştur. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki eksenel mesafedeki radyal sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 6.26 incelendiğinde, metanın, biyogazların yanma sonu ürünlerinin sıcaklığının nispeten daha yüksek olmasının yanı sıra, 0,5 m'deki radyal dağılımı için sıcaklık trendlerinin benzer seyrettiği söylenebilir.



Şekil 6.27. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) için yanma odası çıkışına yaklaşıldıkça, aksenal mesafe olarak 70 cm de, yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının tüm yakıtlar için de azalmaya başladığı Şekil 6.27 'de gösterilmiştir. Metanın biyogazlara göre yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının daha yüksek olduğu ve biyogaz (3. Faz) 'ın da diğer biyogazlara göre yüksek olduğu gözlenmektedir. Buna sebep olan etken olarak içerdikleri metan oranı söylenebilir.

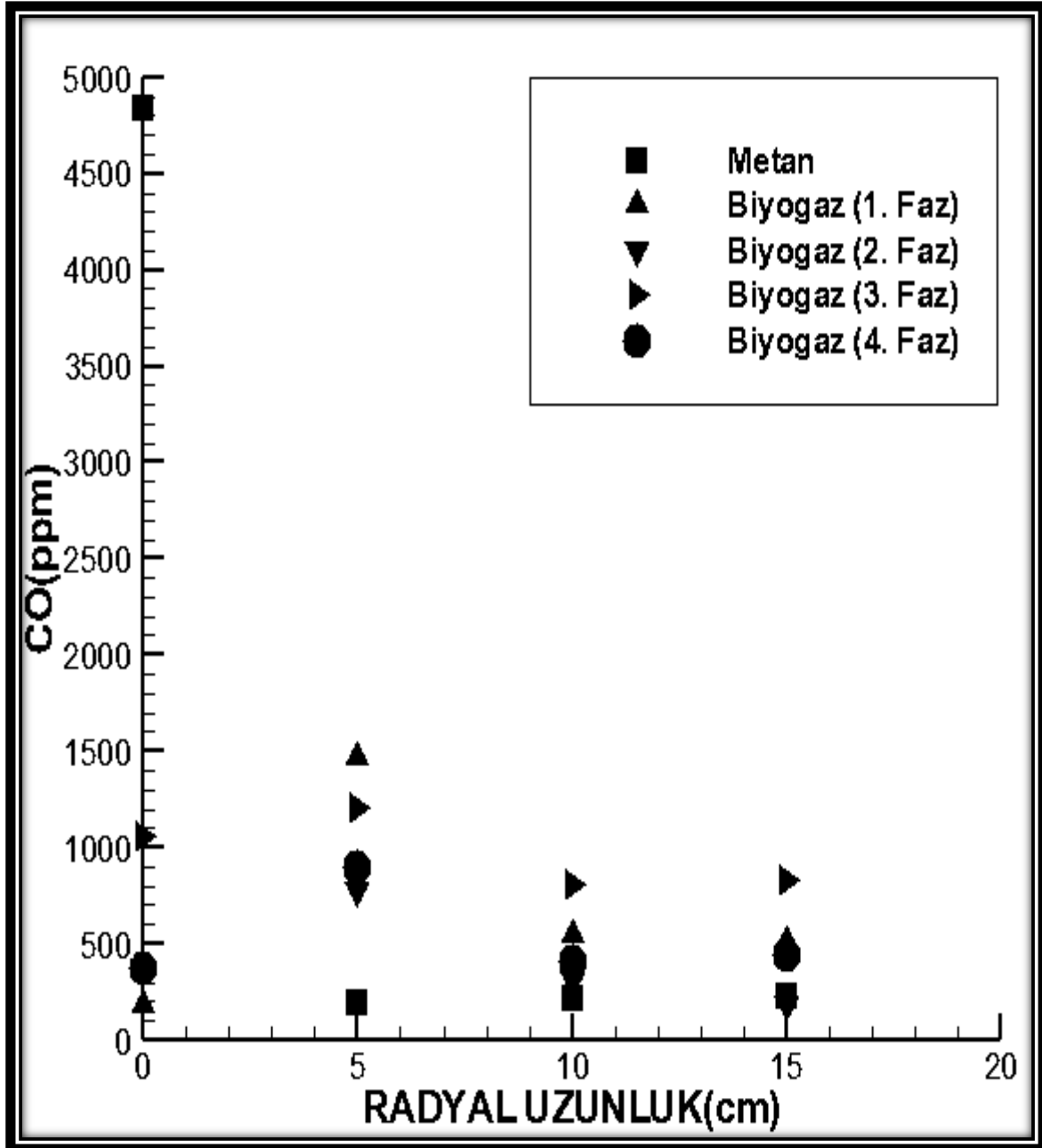


Şekil 6.28. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki radyal sıcaklıklarının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

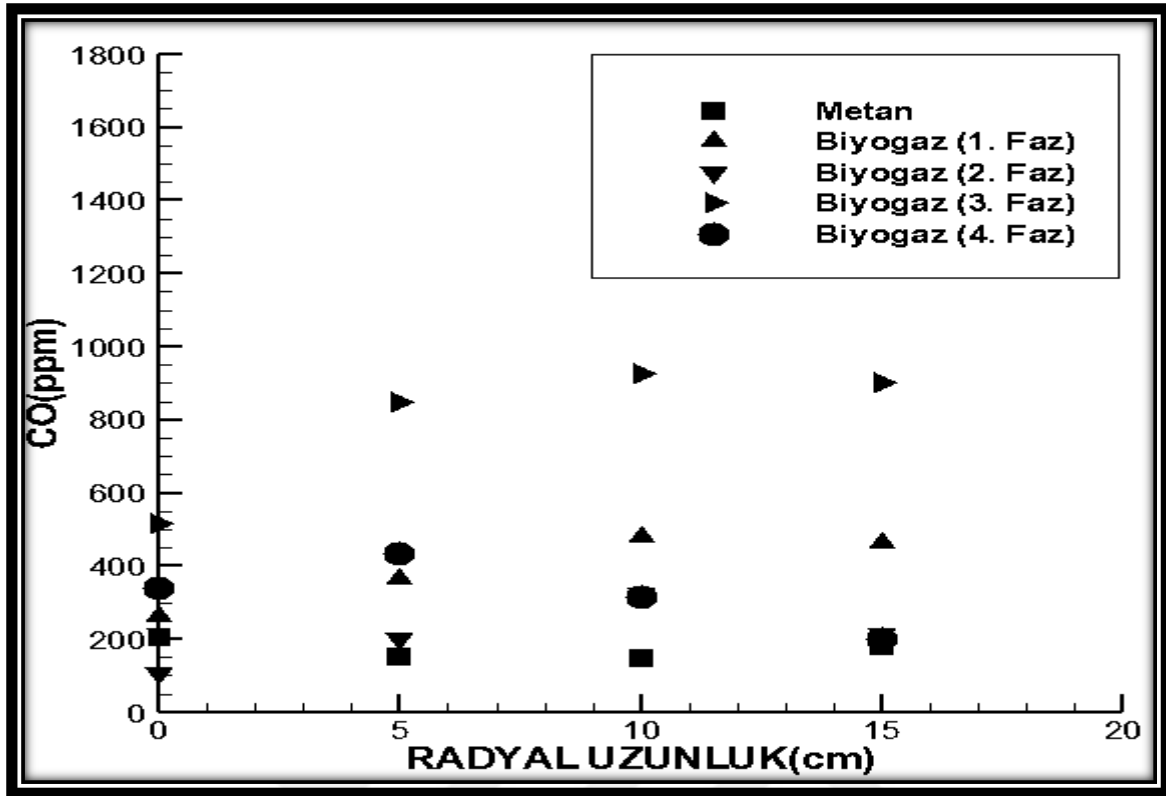
0,9 m'de yanma odası çıkışına yaklaşıldıkça metanın yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının, biyogazların yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarından daha yüksek olduğu Şekil 6.28'de sunulmuştur. Biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının trenlerinin genelde benzerlik gösterdiği söylenebilir.

Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) alevlerinin yanma odası boyunca ölçülen CO emisyon seviyelerini Şekil 6.29-6.33'de göstermektedir. Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen verilere göre, özellikle alev bölgesinde CO emisyon seviyelerinin yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Yanma odasının çıkışına doğru gidildikçe, yanmanın tamamlanmasından dolayı CO seviyelerinde ciddi azalmalar gözlemlenmiştir. Şekil 6.29 'da sunulan metanın yanma odası çıkışına doğru CO

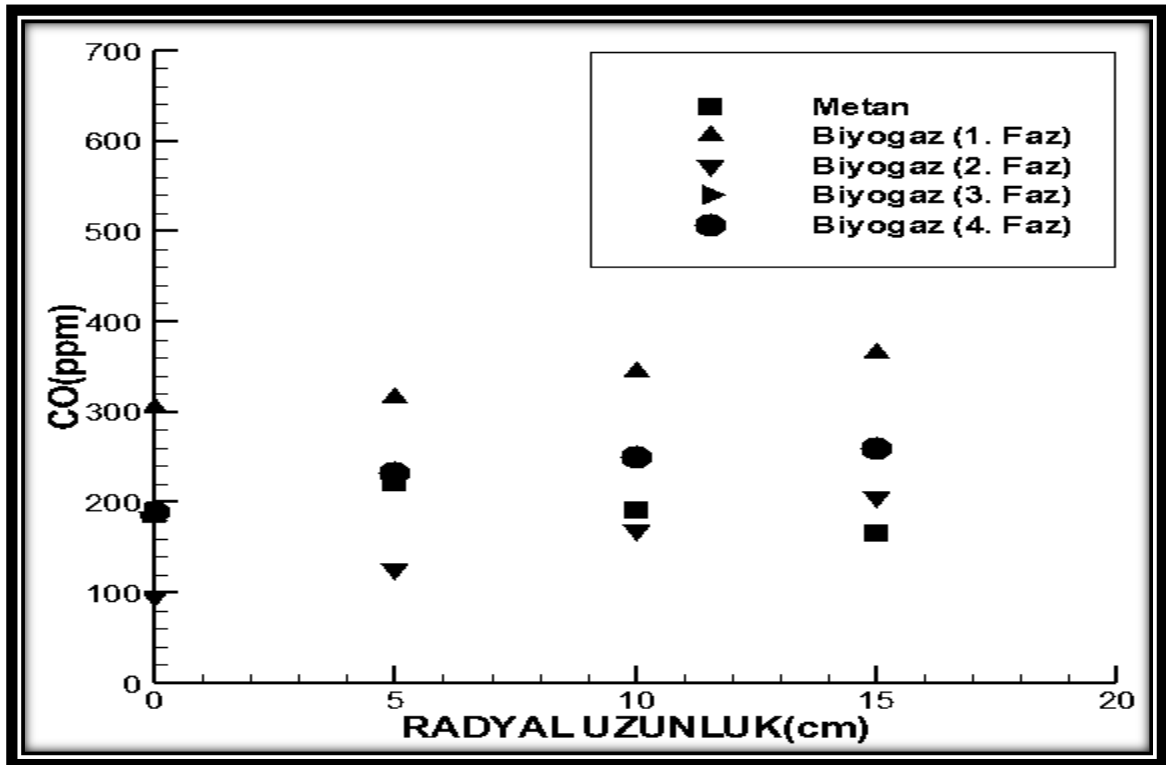
seviyelerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Yani, yanma odası boyunca, metan yakıtı bünyesindeki C atomları  $CO_2$ 'e dönüşmekte, eksik yanma ürünü olan CO seviyelerinde azalmalar meydana gelmektedir. Biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) alevlerinin yanma odası boyunca ölçülen CO emisyon seviyeleri, yanma odası çıkışına doğru azaldığı ve nispeten benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



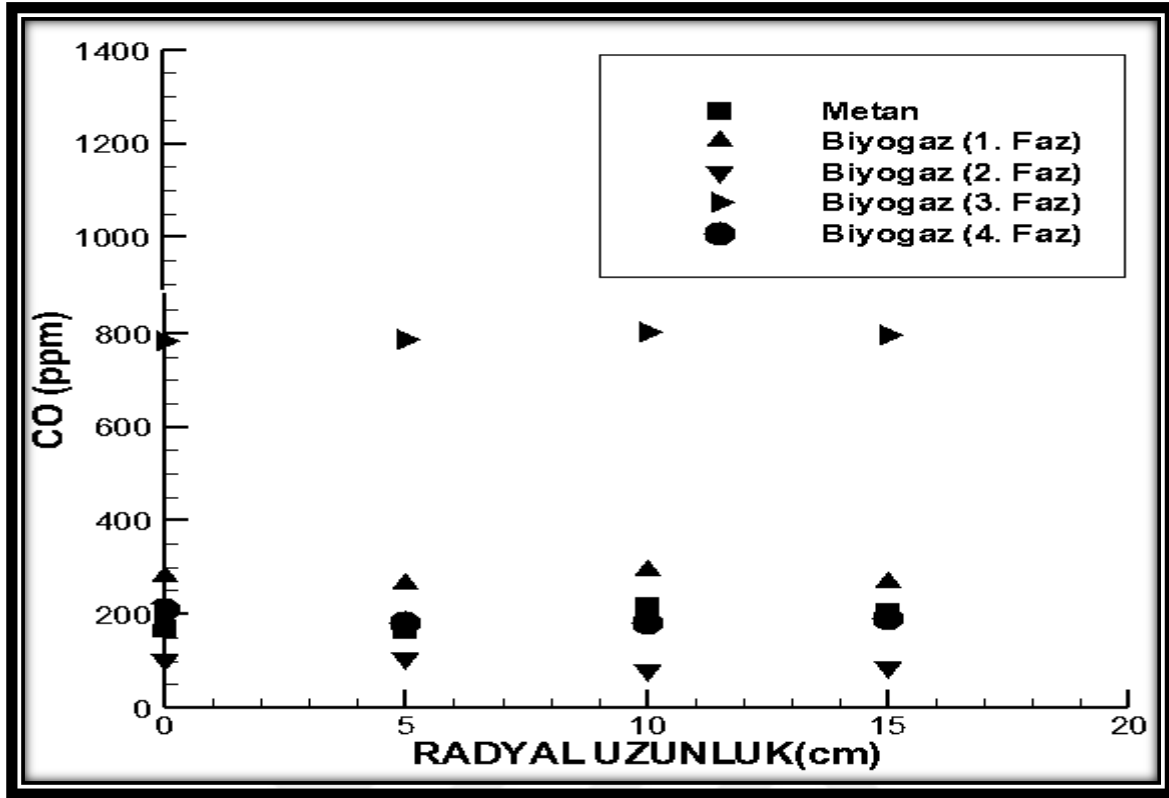
Şekil 6.29. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



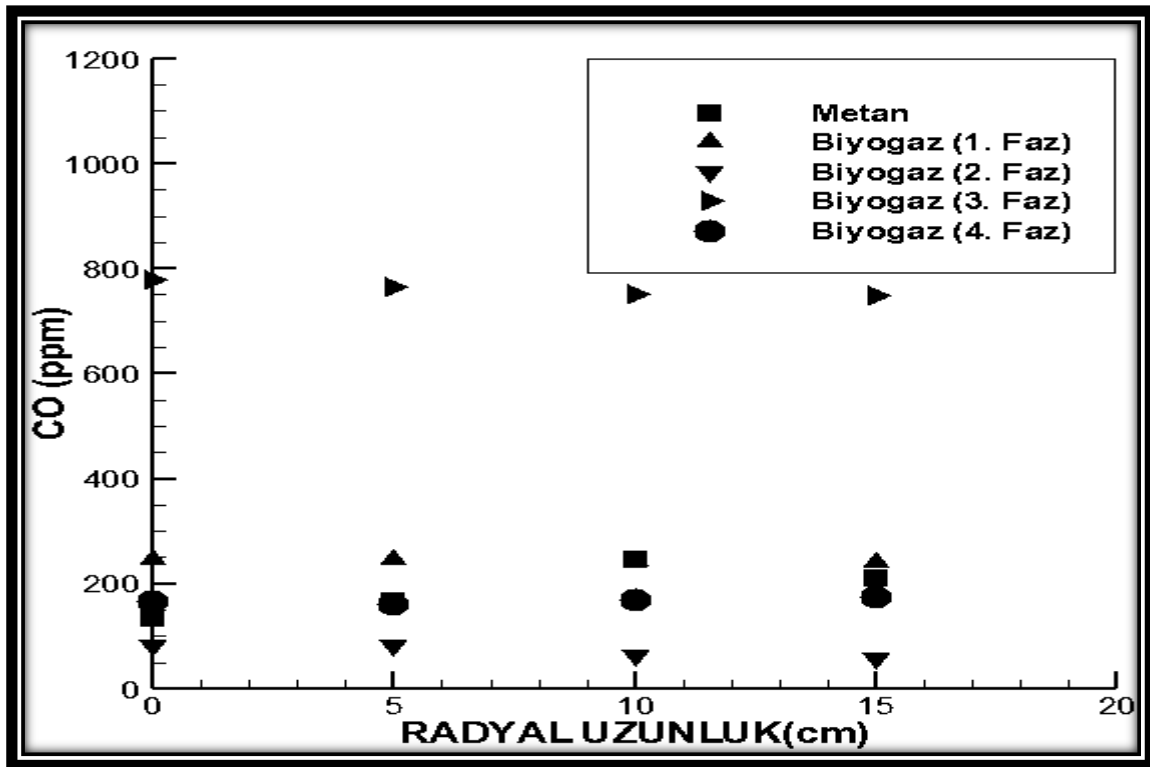
Şekil 6.30. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.31. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



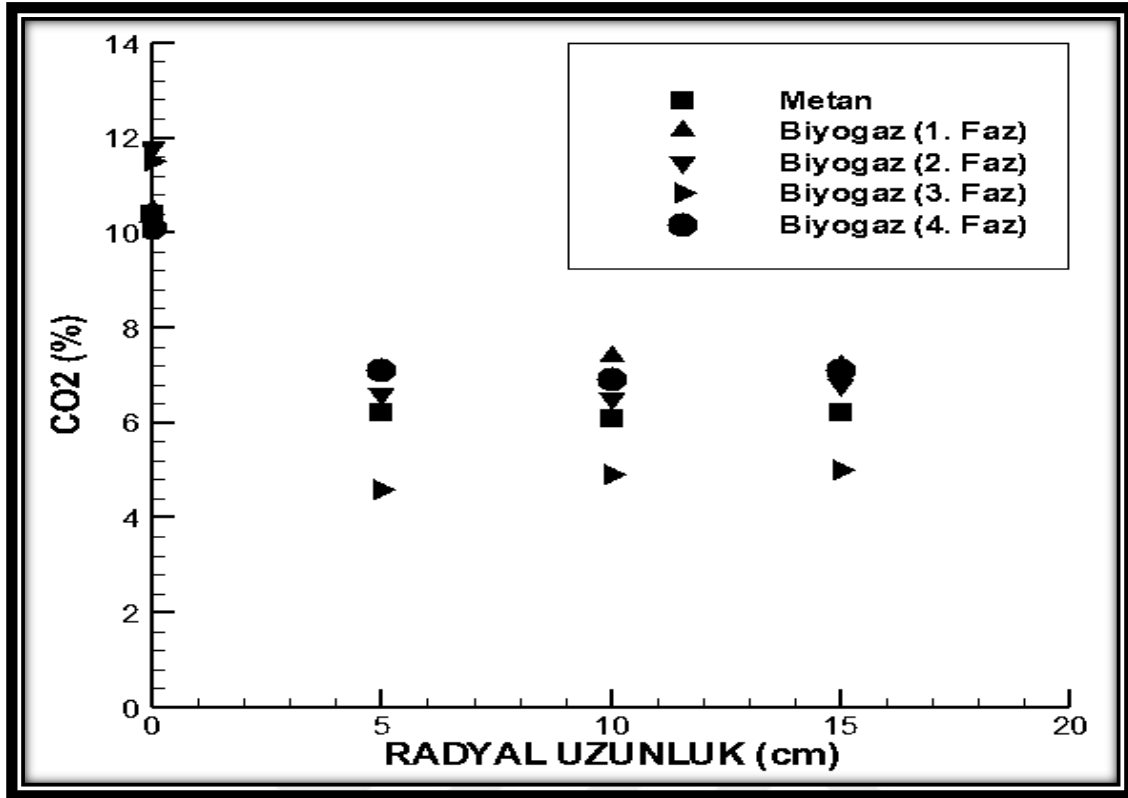
Şekil 6.32. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



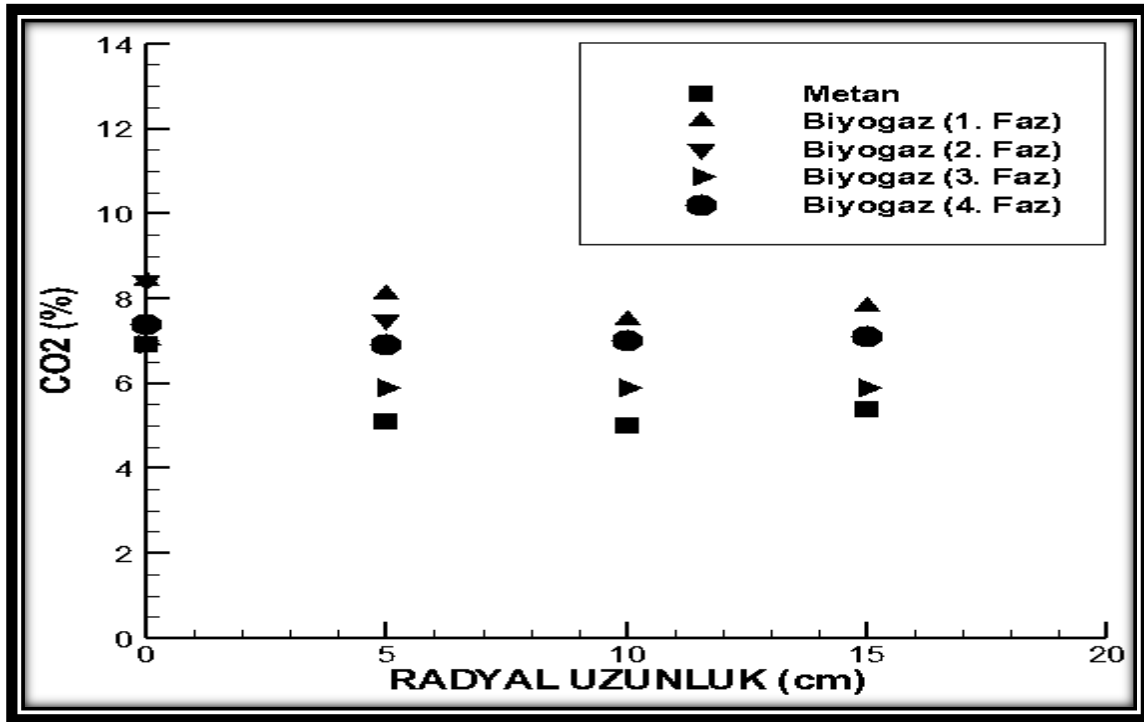
Şekil 6.33. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki CO (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



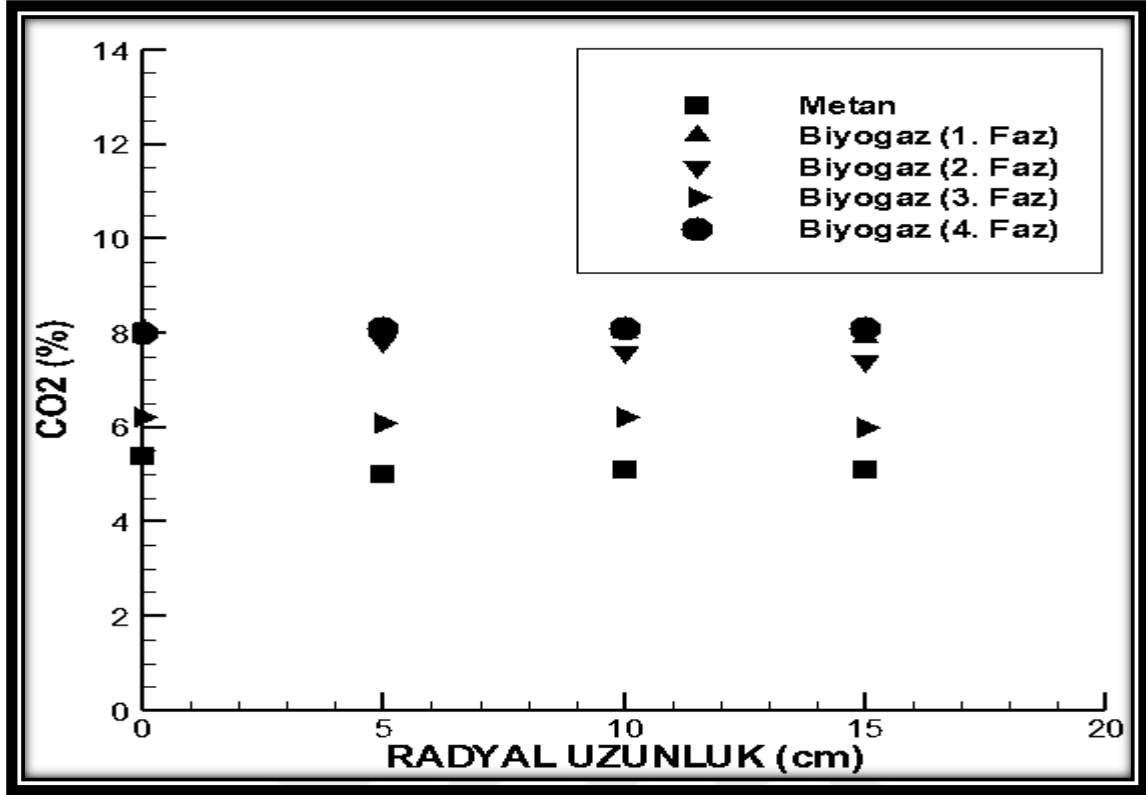
Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 'ın alevlerinin yanma odası boyunca ölçülen CO<sub>2</sub> dağılımları Şekil 6.34, -Şekil 6.38'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yanma odasının alev bölgesindeki CO<sub>2</sub> değerleri tüm yakıtlar için oldukça yüksek iken, yanma odası çıkışına doğru, yanma odasının merkezindeki CO<sub>2</sub> seviyelerinde azalmalar olduğu gözlemlenmektedir. Yanmanın, alev bölgesinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, bu durumun normal olduğu söylenebilir. Radyal yöndeki CO<sub>2</sub> seviyeleri değerlendirilecek olursa, yanma odası boyunca ölçülen CO<sub>2</sub> seviyeleri nispeten azalarak devam etmiştir. CO<sub>2</sub>'nin yanma odasının merkezinden yanma odasının duvarlarına doğru yayılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) gazları için CO<sub>2</sub> seviyeleri değerlendirildiğinde, içeriğinde CO<sub>2</sub> bulundurması itibari ile yanma merkezinde metan alevinden ölçülen CO<sub>2</sub> değerleri benzer trendler göstermektedir. Biyogazların bünyesinde içerdiği CO<sub>2</sub> değerleri biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz), biyogaz (4.Faz) için sırasıyla %43,1, %38, %33, %43,1'dir. Bunun için yanma merkezinde metanın yanma sonucu CO<sub>2</sub> değerlerinden yüksek olduğu gözlenmiştir. Metanın yanma sonucu ürünleri olan CO<sub>2</sub> yanma odası duvarlarına doğru yayılımlarda ve yanma odası çıkışına doğru biyogazların CO<sub>2</sub> emisyon değerlerine yaklaşma eğiliminde olduğu söylenebilir. Metan ve biyogazların yanma için gerekli türbülansın daha iyi sağlanmış olması ve metan bünyesinde bulunan C atomlarının havadan gelen O<sub>2</sub> ile daha iyi reaksiyona girmesidir. Yanma odası boyunca alınan CO<sub>2</sub> emisyon ölçümleri değerlendirildiğinde, bünyesinde ihtiva ettiği CO<sub>2</sub> (%) değerine göre değişim gösterdiği söylenebilir. Buna ilaveten yakıtların yanma odası duvarına ve yanma odası çıkışına doğru benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



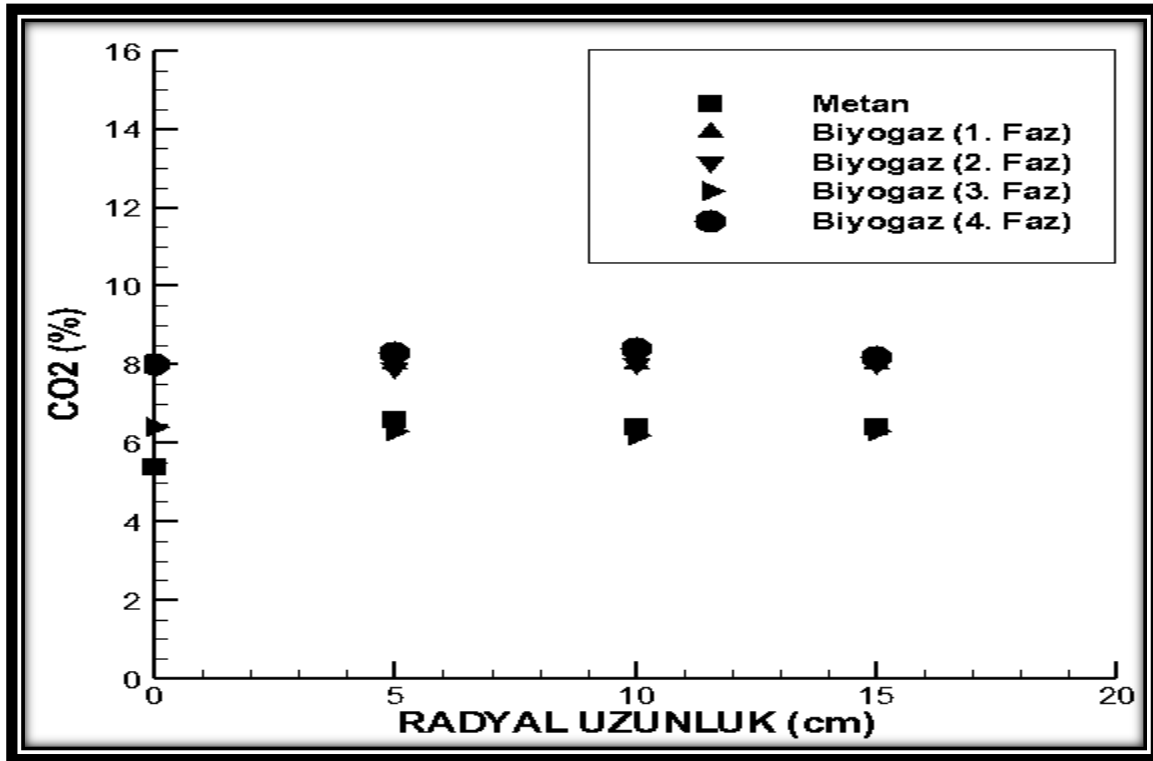
Şekil 6.34. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki CO<sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



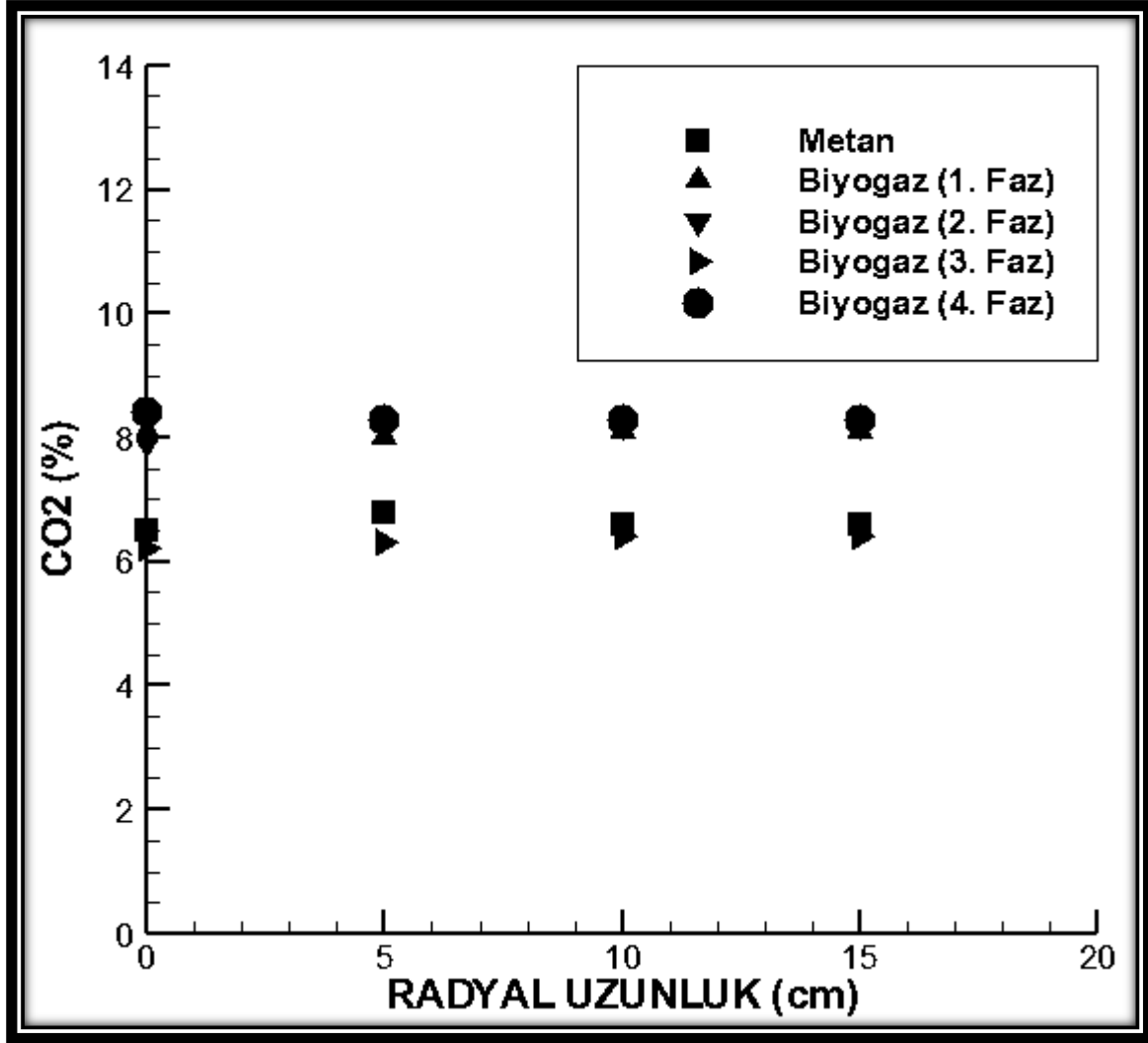
Şekil 6.35. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm'deki CO<sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.36. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm'deki CO<sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



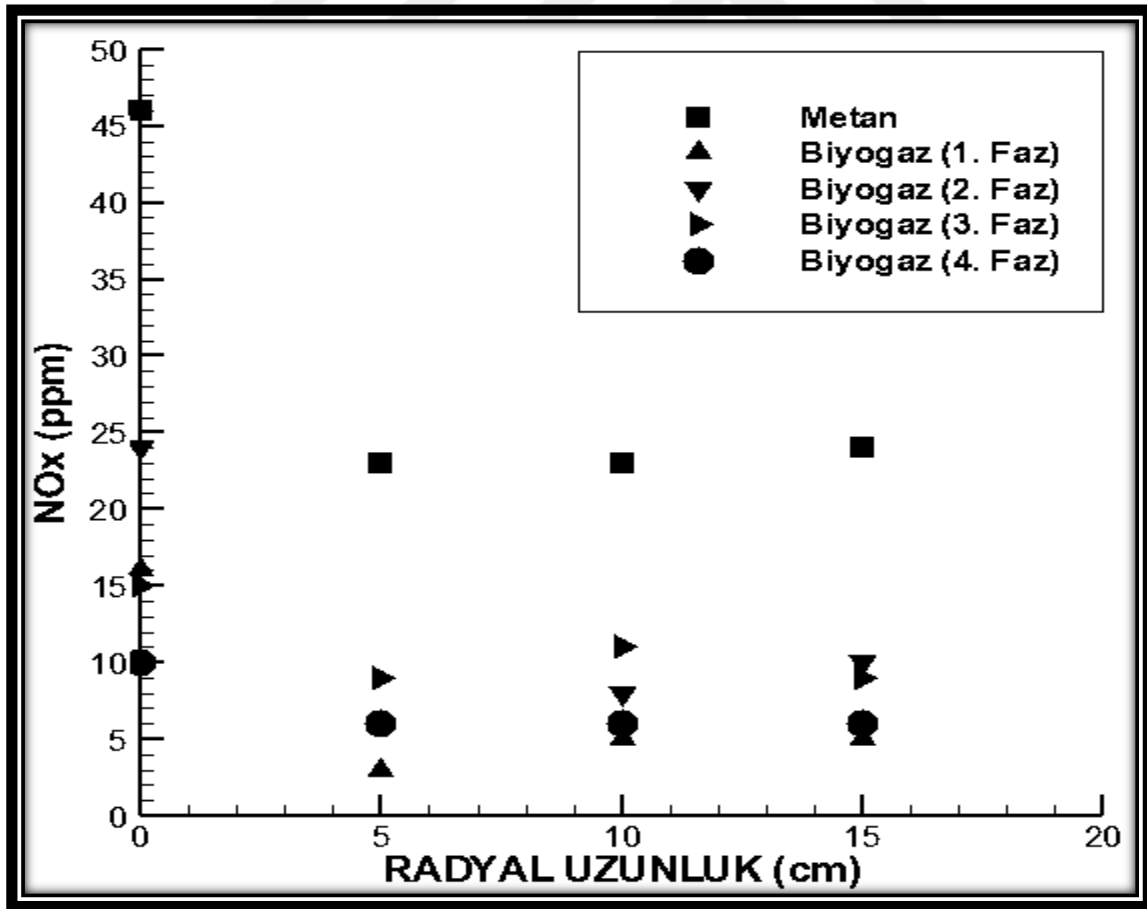
Şekil 6.37. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm'deki CO<sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



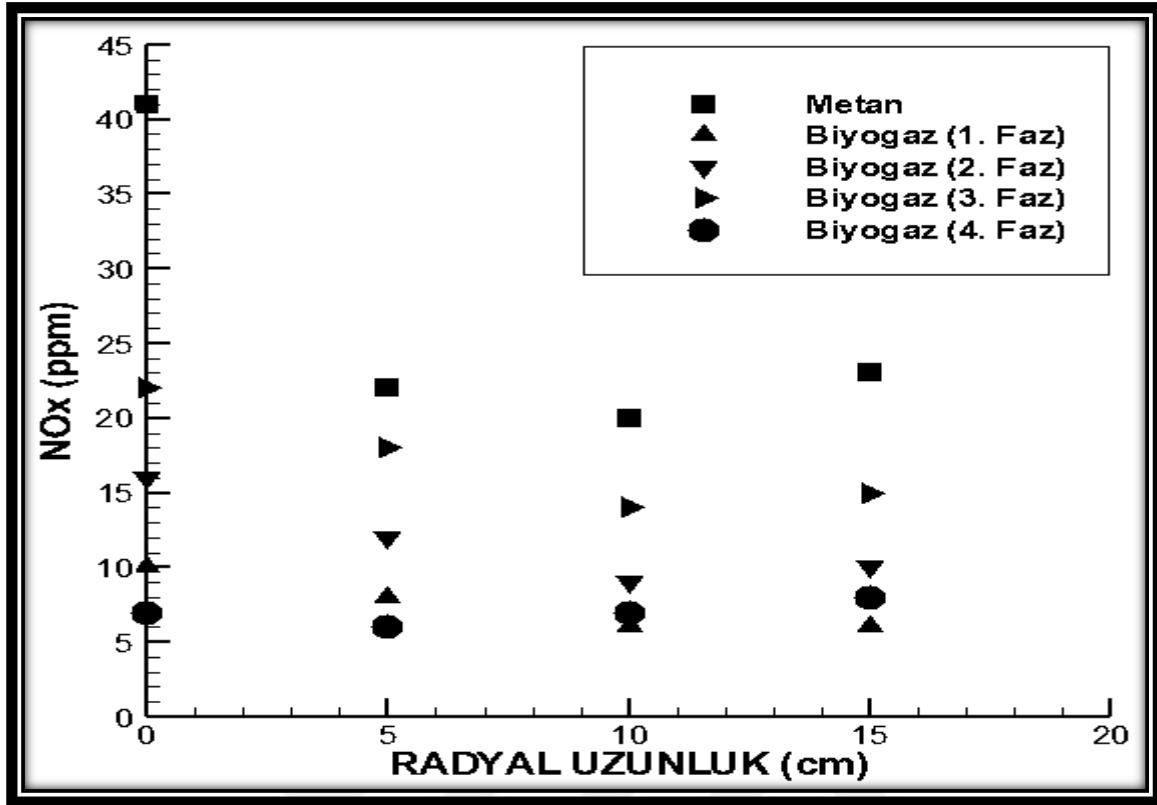
Şekil 6.38. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm'deki CO<sub>2</sub> (%) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Bu tez çalışmamda, deneysel sonuçlara geçmeden biraz Azotoksit ailesinden bahsetmek isterim. NO<sub>x</sub> sınıflandırmasında azotmonoksit (NO), azotdioksit (NO<sub>2</sub>), diazotoksit (N<sub>2</sub>O), diazottrioksit (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve diazotpentaoksit (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) olmak üzere beş kararlı gaz özelliğini içermektedir. Ancak, bunlardan sadece ilk üçü (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) hava kirliliğine önemli etkiye sahiptirler. Yanma reaksiyonlarında azotoksit oluşumuna katkı yapan azotun genel olarak iki temel kaynağı vardır. Birinci ve en önemli kaynak, hacimsel olarak % 79 azot içeren havadır. Diğer bir kaynak da, yapısında azot bulunduran yakıtlardır. Genel olarak, yakıt alevlerinde oluşan NO<sub>x</sub> emisyonları için bilinen üç farklı oluşum mekanizması bulunmaktadır. Genel olarak bunları sınıflandırmak gerekirse; ısıl NO<sub>x</sub>, ani NO<sub>x</sub> ve yakıt NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmalarıdır. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm deki NO<sub>x</sub> (ppm) alevinde oluşan NO<sub>x</sub> kirlitici emisyonlarının

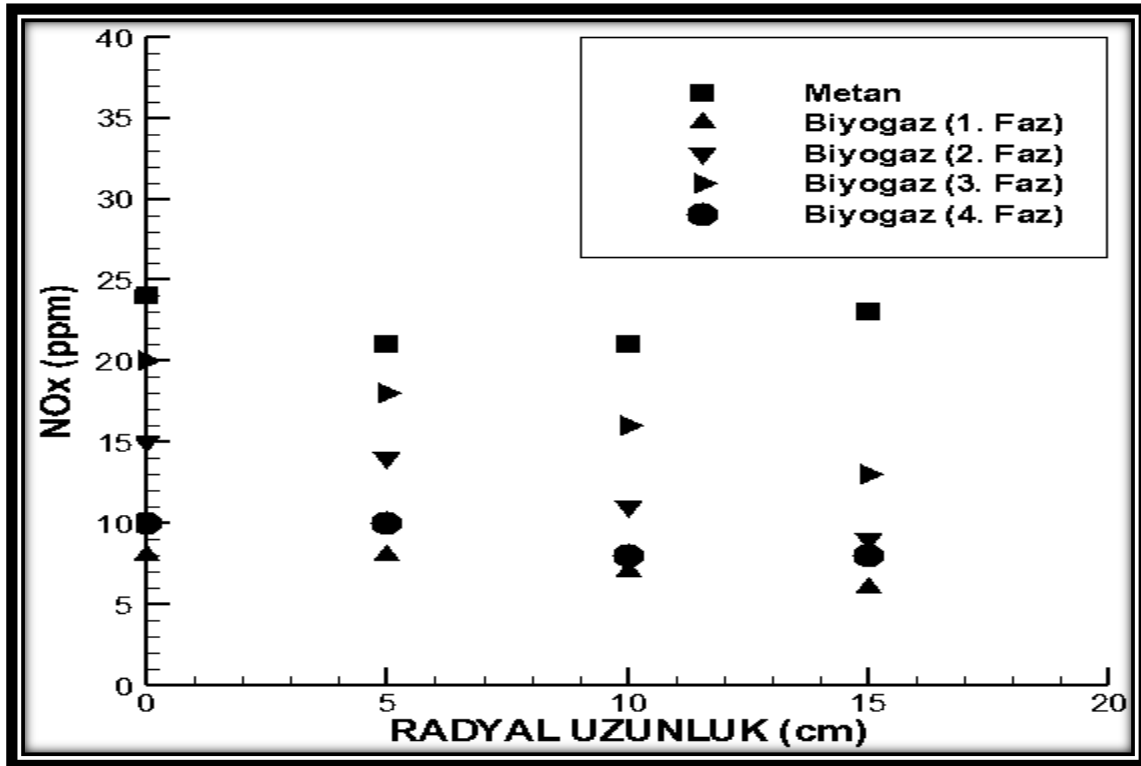
yanma odası boyunca ölçülen değerleri Şekil 6.39- Şekil 6.43’de gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, yüksek sıcaklık bölgelerinde (alev bölgesi) daha yüksek seviyelerde  $\text{NO}_x$  oluşmakta, sıcaklık, yanma odası çıkışına doğru azaldıkça, tüm yakıtların yanma sonucu ürünleri için de  $\text{NO}_x$  seviyelerinde azalma gözlemlenmektedir. En yüksek  $\text{NO}_x$  değerleri, metan ve biyogazlar için de alev bölgesinde oluşmuş olup, bu değerler, alev sıcaklığının yüksekten düşüğe doğru azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) için yanma alev sıcaklıkları sırasıyla, 1466,54 K, 1323,98 K, 1351,71 K, 1385,90 K ve 1312,61 K ’dır. Metan alevinin biyogazlara göre daha yüksek olmasından dolayı, metan yanma sonucu  $\text{NO}_x$  seviyeleri olarak da, yanma odası boyunca daha yüksek değerler ortaya çıkmaktadır. Biyogazların yanma alev sıcaklıklarına göre  $\text{NO}_x$  yayılımları benzer trendler göstermektedir. Radyal yöndeki dağılımlar değerlendirilecek olursa, tıpkı sıcaklık dağılımlarında olduğu gibi, yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, radyal yöndeki  $\text{NO}_x$  dağılımları da azalan değerler almaktadır.



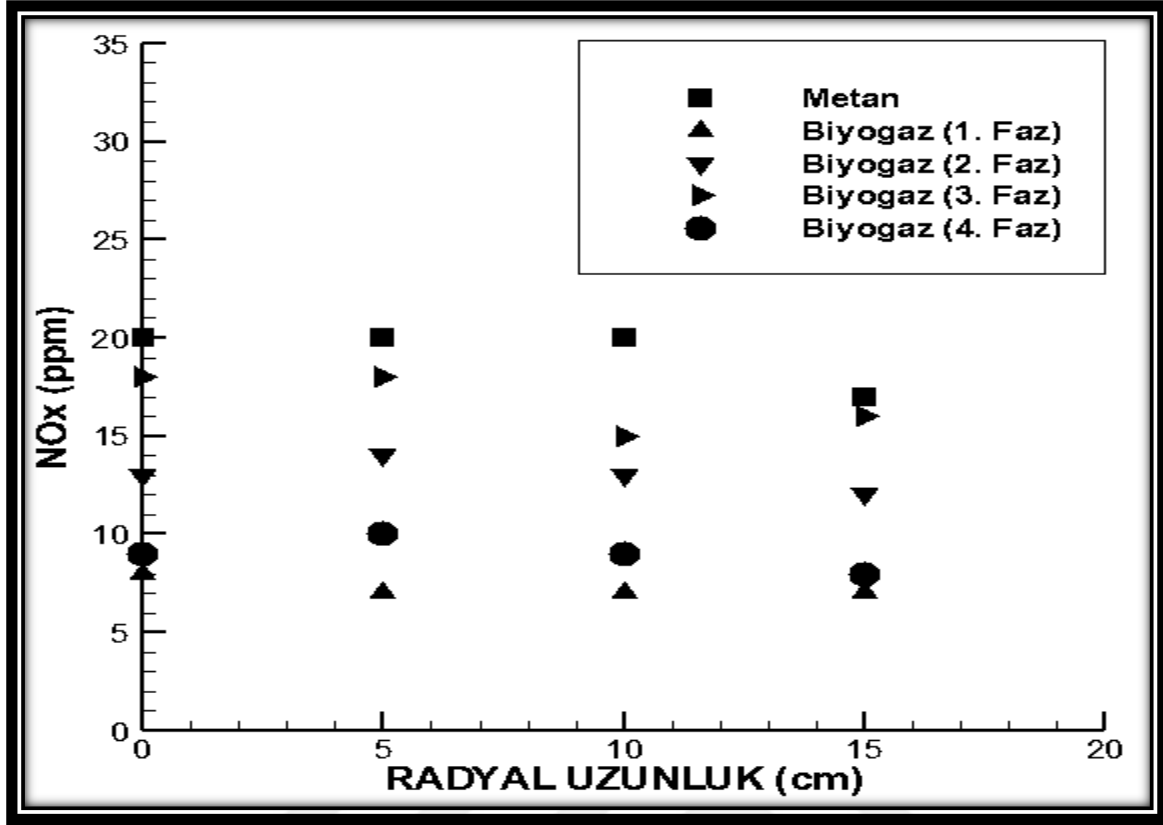
Şekil 6.39. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm deki  $\text{NO}_x$  (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



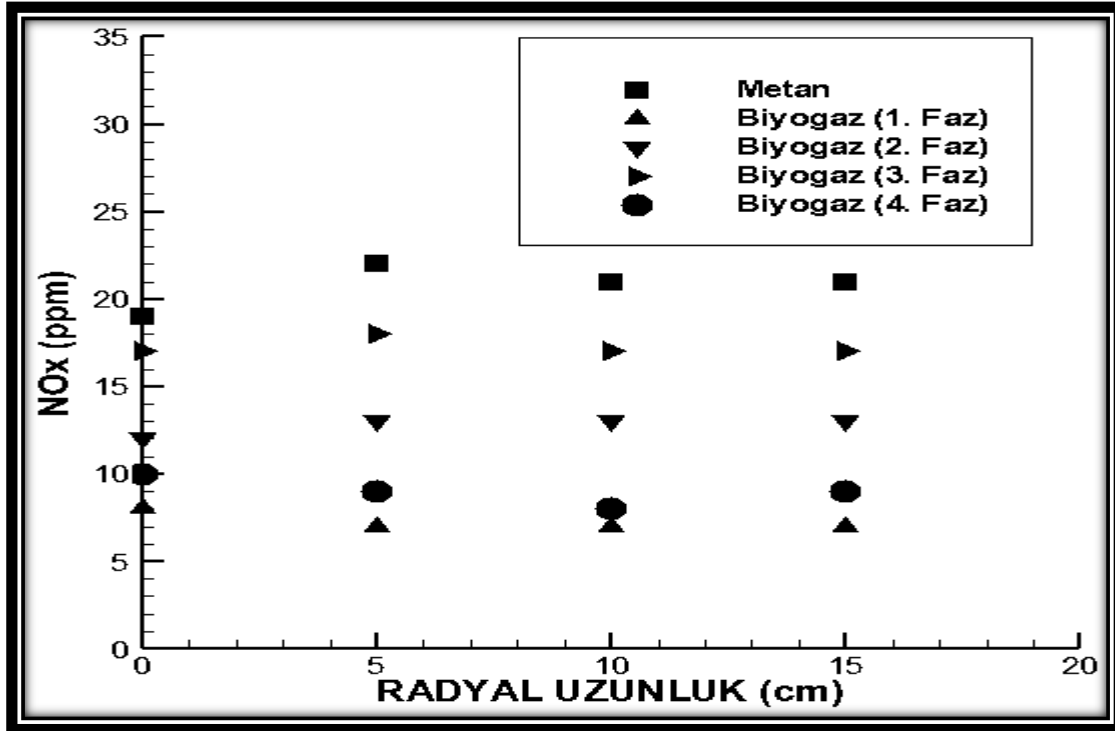
Şekil 6.40. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm deki  $\text{NO}_x$  (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.41. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm deki  $\text{NO}_x$  (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

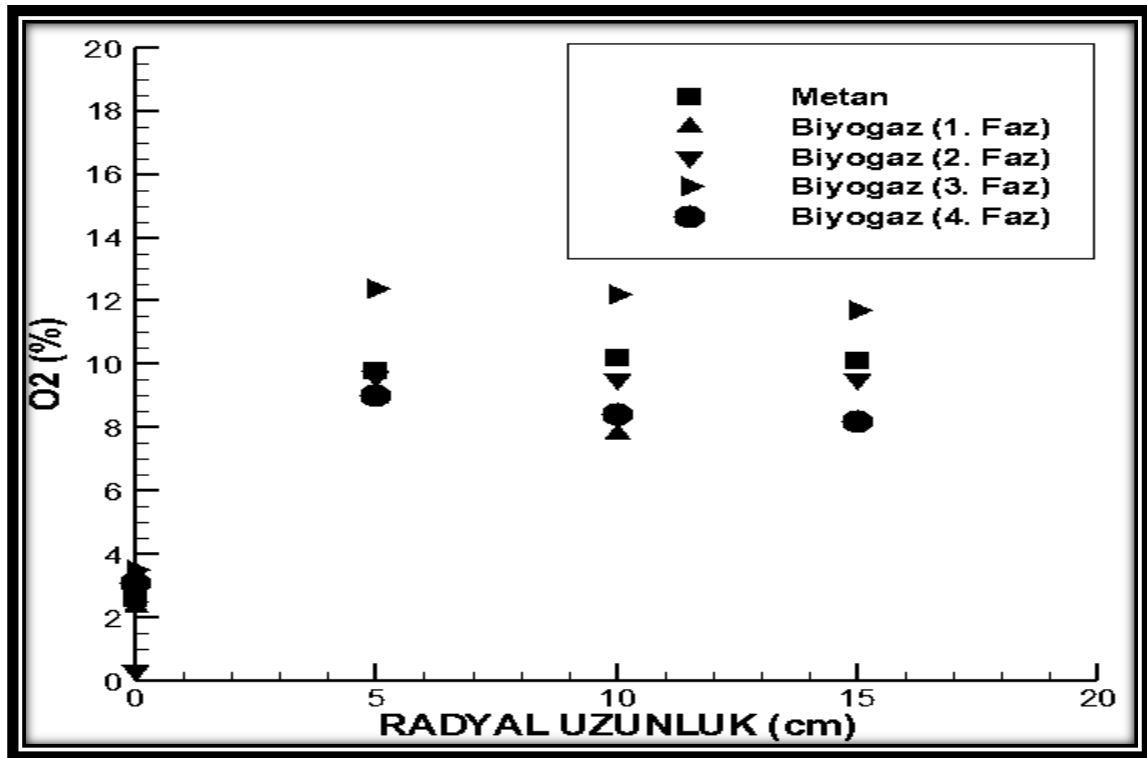


Şekil 6.42. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm deki  $\text{NO}_x$  (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



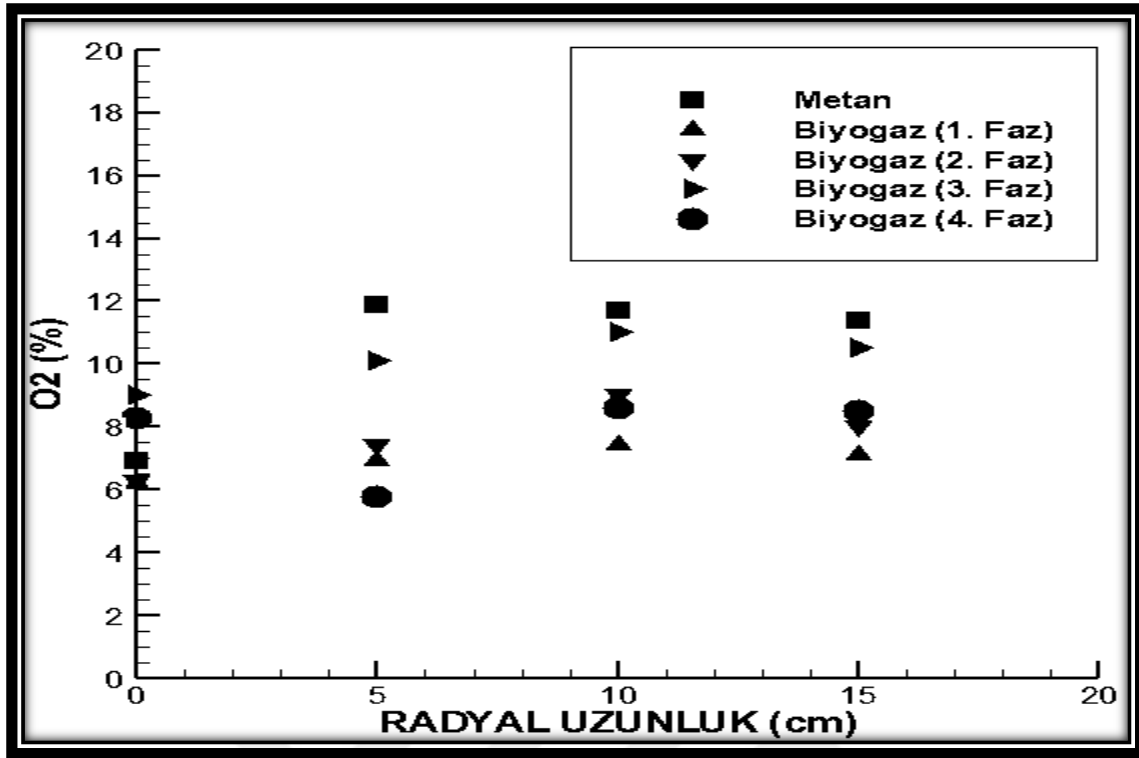
Şekil 6.43. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm deki  $\text{NO}_x$  (ppm) deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) yanma odası O<sub>2</sub> (%) dağılımı Şekil 6.44, - Şekil 6.48'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) yanma odasının alev bölgesindeki O<sub>2</sub> değerleri oldukça düşük iken, yanma odası çıkışına doğru O<sub>2</sub> seviyelerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. Yanma odasında yanmanın, alev bölgesinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, bu durumun normal olduğu söylenebilir. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) alevleri için O<sub>2</sub> seviyeleri değerlendirildiğinde, özellikle 0,3 m'den itibaren, metan alevinden ölçülen O<sub>2</sub> değerlerinin, biyogazların alevlerinden ölçülen O<sub>2</sub> değerlerine nispeten fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun temel nedeni ise yakıcı olarak kullanılan havanın bünyesindeki O<sub>2</sub>'nin daha fazla tüketilmesidir. Yanma odası boyunca, özellikle radyal bölgelerdeki eksenel mesafeler değerlendirildiğinde, genellikle O<sub>2</sub> seviyelerinin metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) içinde benzer trendler görülmektedir. Yanma tamamlandıkça O<sub>2</sub> tüketilmekte ve azalmaktadır. Yanma odası duvarına doğru alınan O<sub>2</sub> değerlerinde özellikle 30 cm'den sonra metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz), O<sub>2</sub> değeri sırasıyla % 12, % 6,7, % 6,8, % 10, % 6,4 civarı olduğu gözlenmiştir.

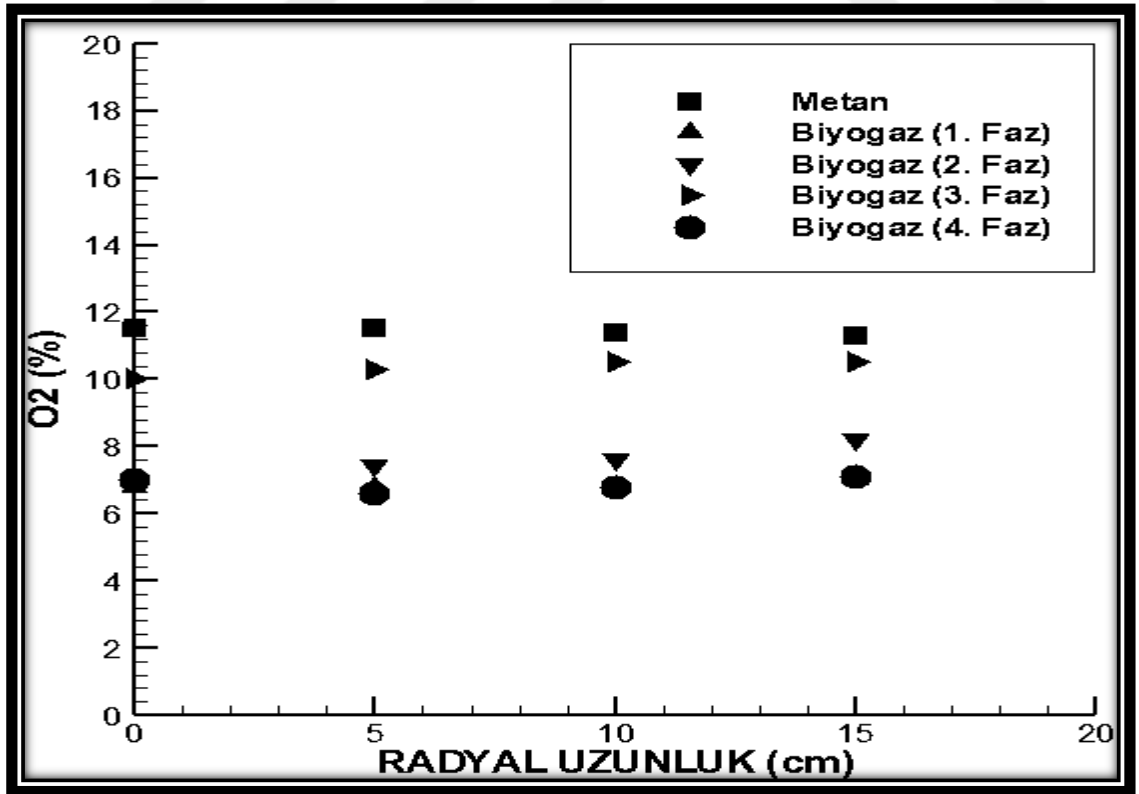


Şekil 6.44. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 10 cm'deki O<sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

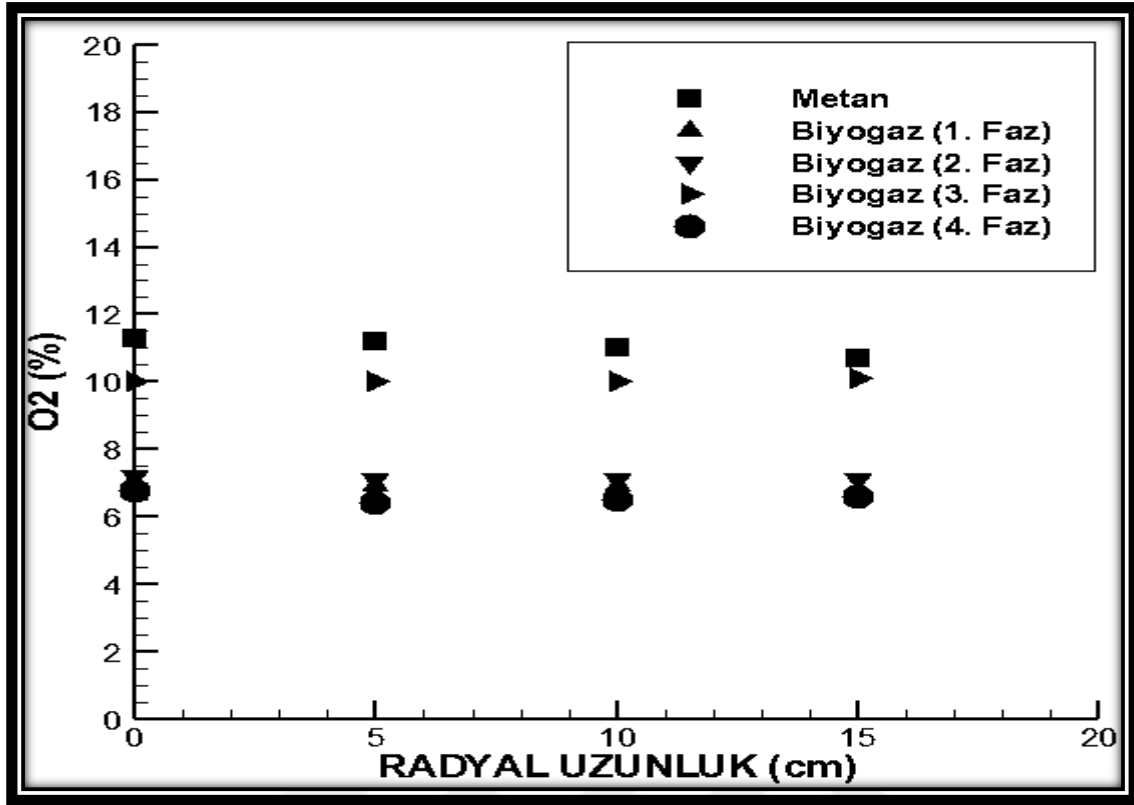




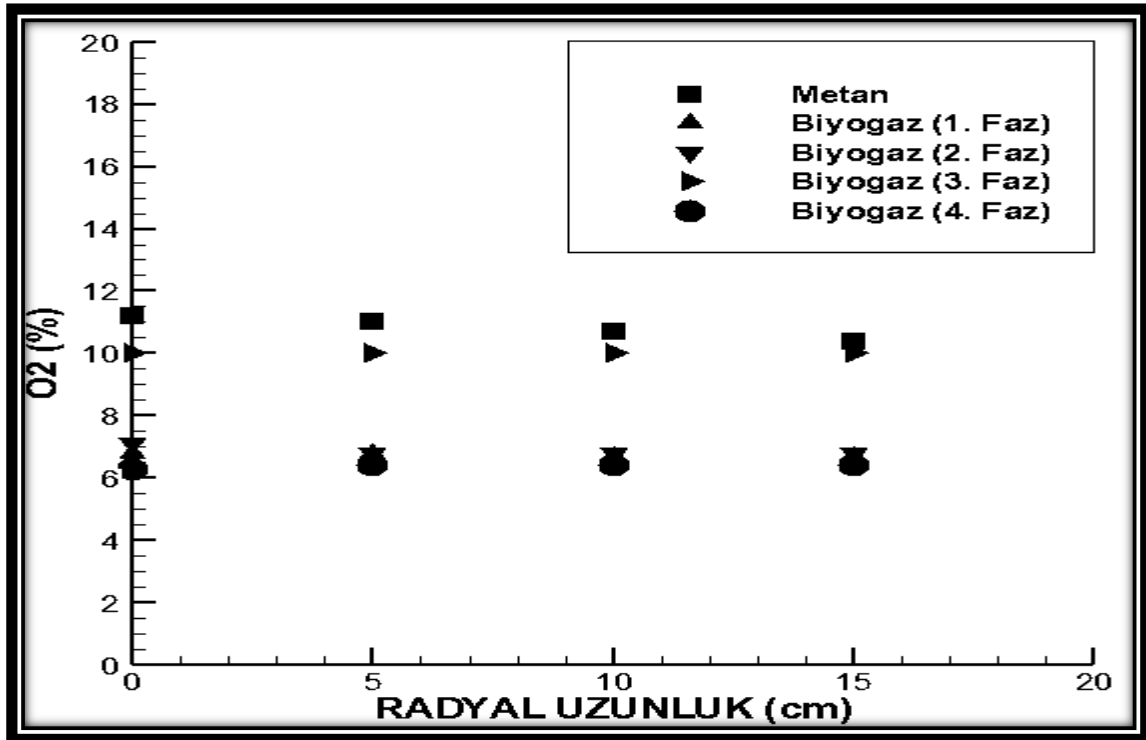
Şekil 6.45. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 30 cm deki O<sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



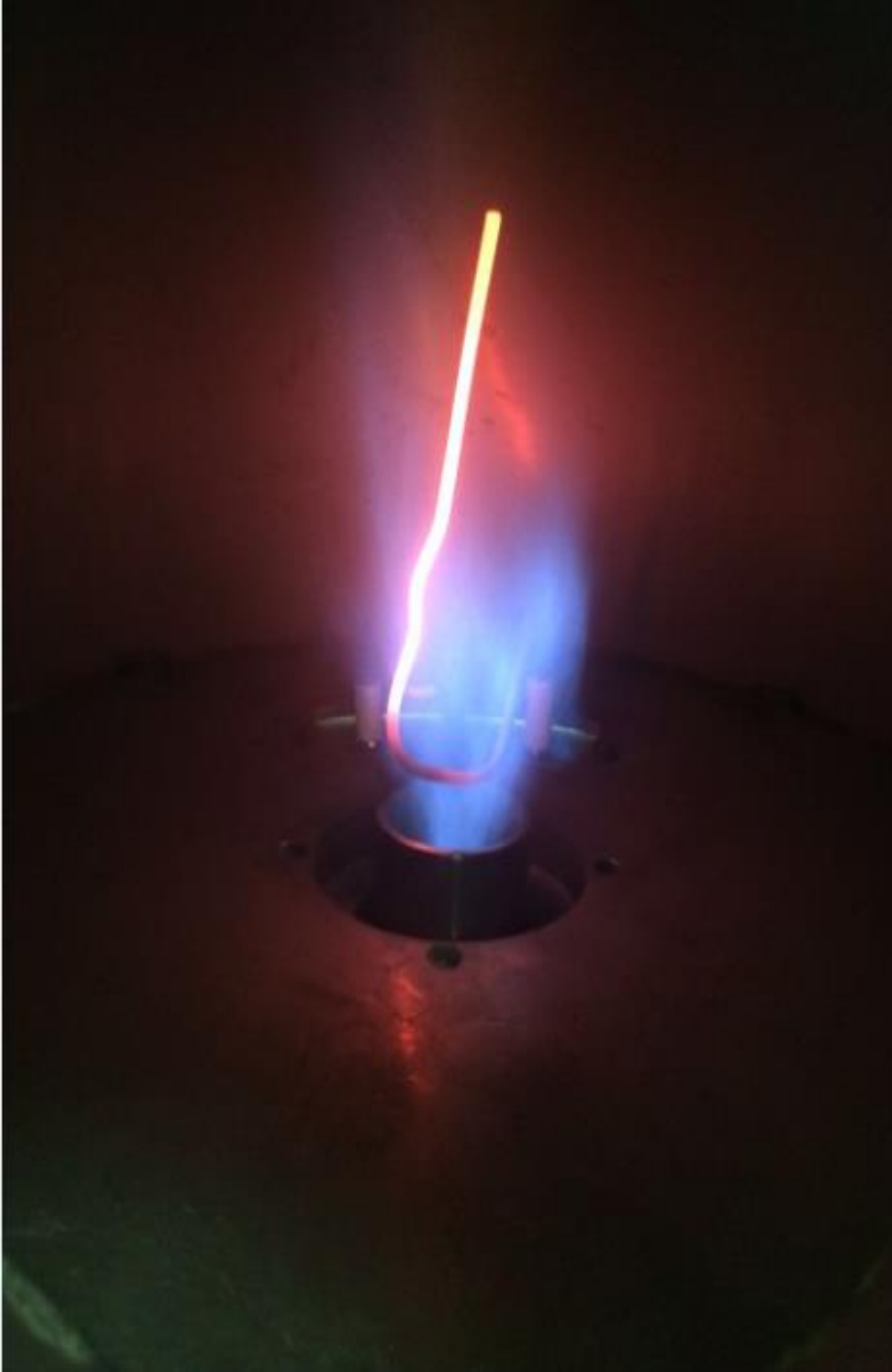
Şekil 6.46. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 50 cm deki O<sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.47. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 70 cm deki O<sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

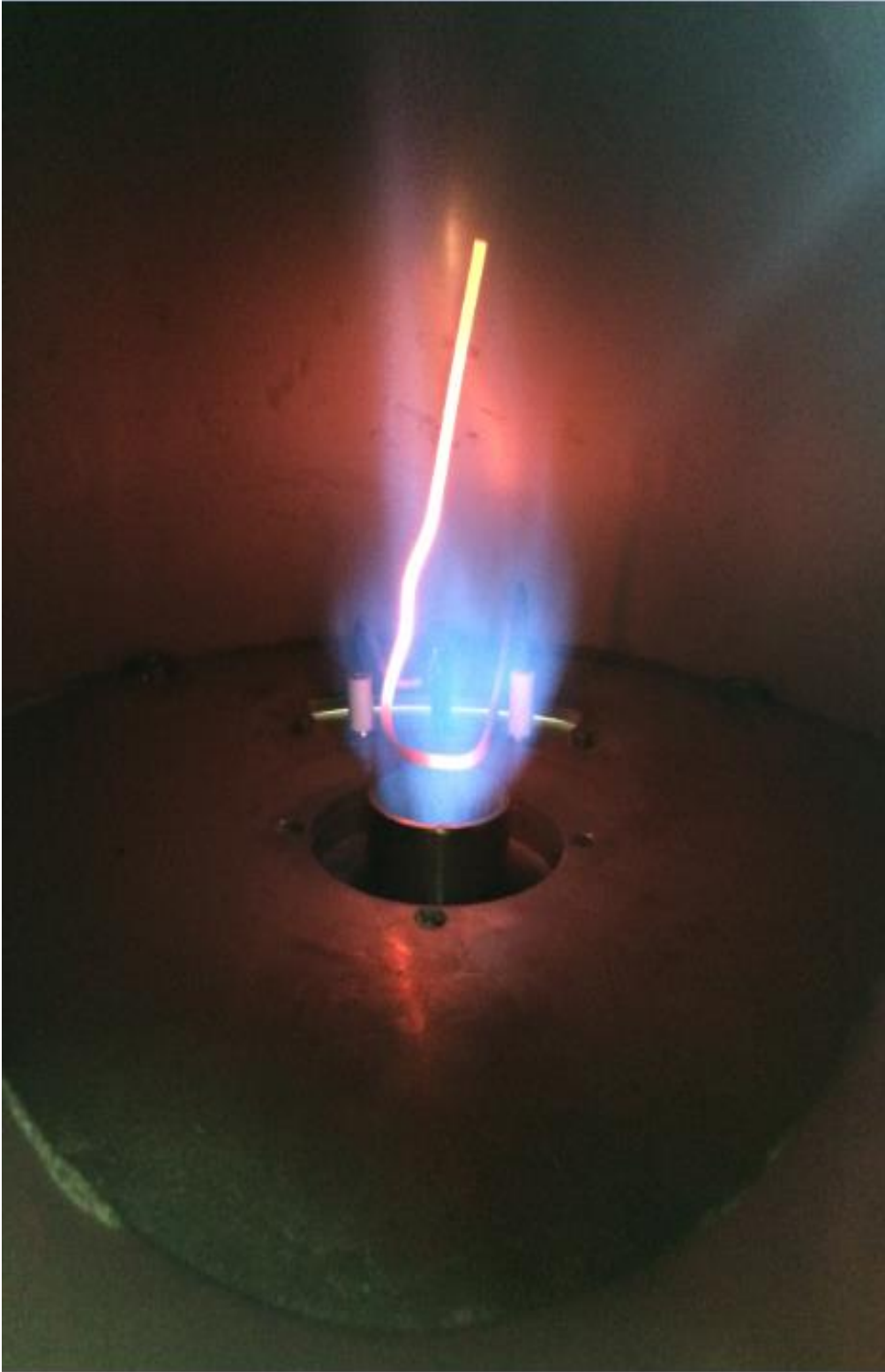


Şekil 6.48. Metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) 90 cm deki O<sub>2</sub> (%) dağılımının deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



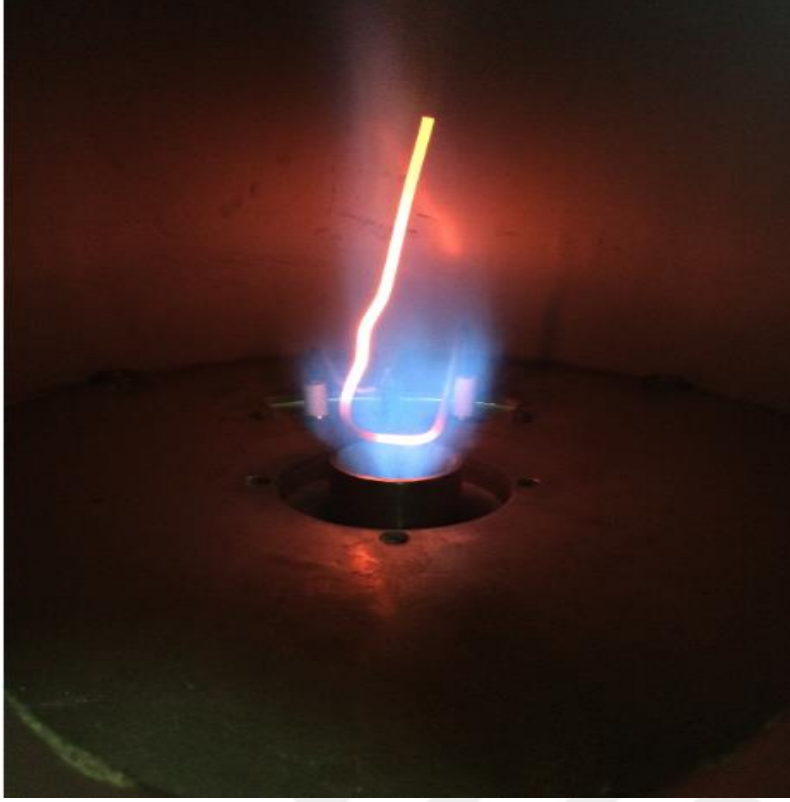
Şekil 6.49. Biyogaz (1. Faz) alev görünüşü

Biyogaz (1. Faz) yanma alev sıcaklığı Şekil 6.49 'de gösterilmiştir.



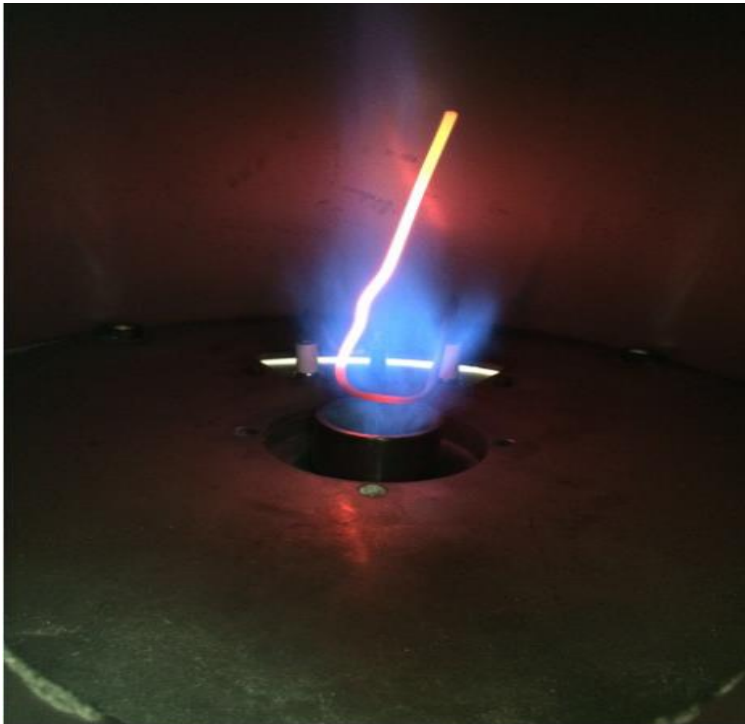
Şekil 6.50. Biyogaz (2. Faz) alev görünüşü

Biyogaz (2. Faz) yanma alev sıcaklığı Şekil 6.50 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.51. Biyogaz (3. Faz) alev görünüşü

Biyogaz (3. Faz) yanma alev sıcaklığı Şekil 6.51 'de gösterilmiştir.



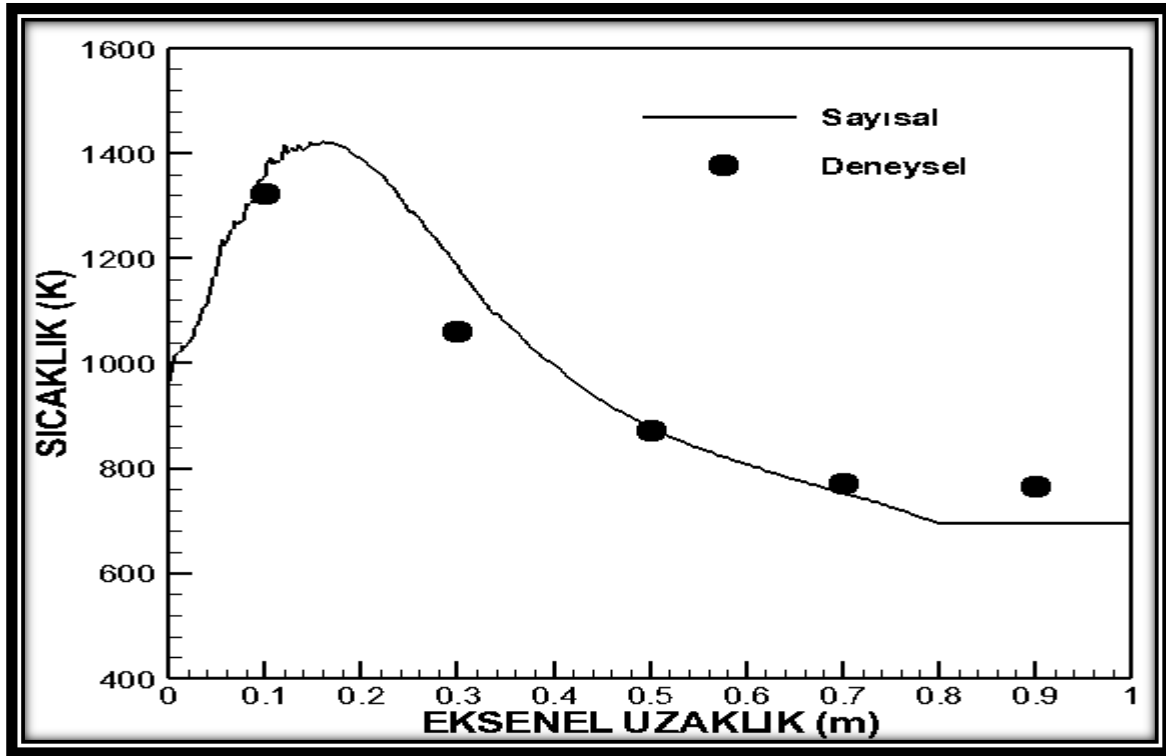
Şekil 6.52. Biyogaz (4. Faz) alev görünüşü

Biyogaz (4. Faz) yanma alev sıcaklığı Şekil 6.52’de gösterilmiştir.

### 6.3. Deneysel Ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

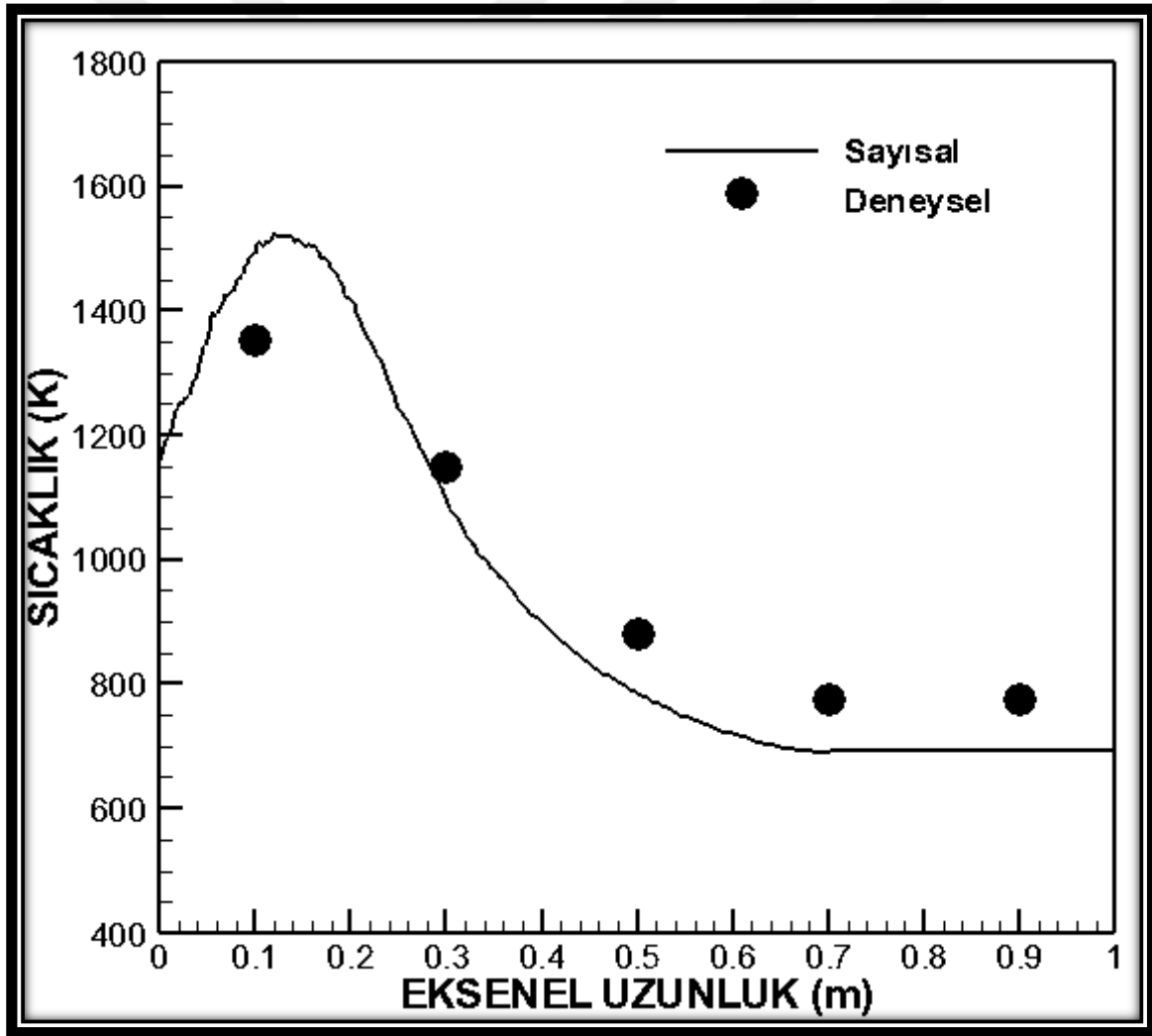
Bu tez çalışmasında metan gazı brülörü kullanılarak 10 kW ısı güç ve 0,83 eşdeğerlilik oranı için yapılan deneyler neticesinde, aksenal ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Bu deneylerden sonra, tez çalışmamda da belirtildiği gibi, bu brülör kullanılarak metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) biyogazlarının yanma performanslarının sayısal ve deneysel olarak araştırılması yapılmıştır.

Deneysel havanın ve yakıtın giriş basınçları 21 mbar olarak ayarlanmıştır. Yanma deneyleri gerçekleştirilirken, metan, biyogaz (1.Faz), biyogaz (2.Faz), biyogaz (3.Faz) ve biyogaz (4.Faz) gazlarının 10 kW ısı güç sağlayacak şekilde, 0,83 eşdeğerlilik oranı ile yakılmıştır. Yanma performanslarını doğru bir şekilde karşılaştırabilmek için ısı güç ve eşdeğerlilik oranı tüm deneylerde aynı alınmıştır. Yapılan tüm deneylerde, herhangi bir alev kararsızlığına rastlanmamıştır.



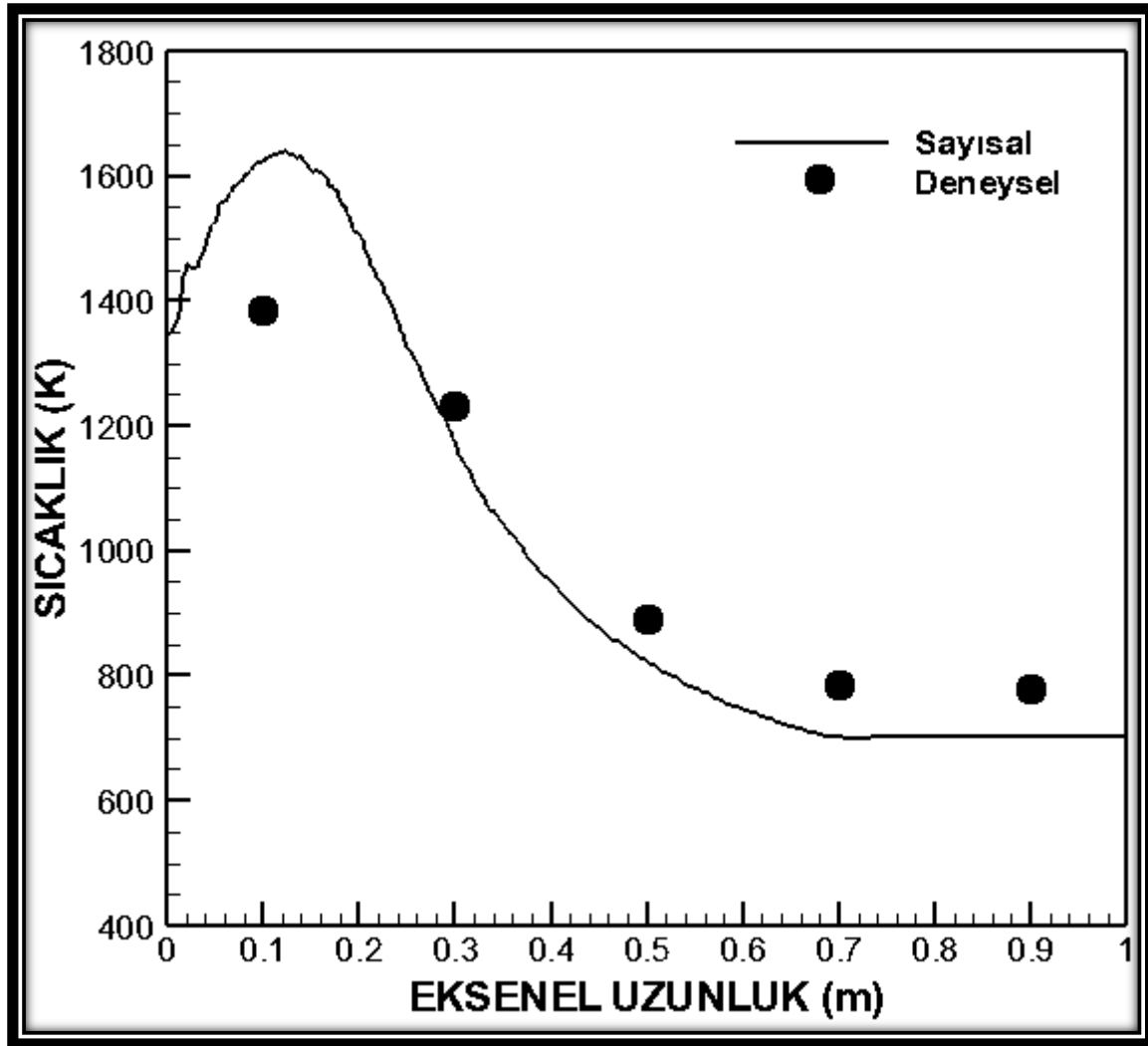
Şekil 6.53. Biyogaz (1.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

Biyogaz (1.Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması Şekil 6.53 'de gösterilmiştir. Ölçülen alev sıcaklıkları, Şekil 6.53'de incelendiğinde prob ile ölçümler aksende 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde alınmıştır. Biyogaz (1.Faz) yanma alev sıcaklığı 1323,98 K olarak ölçülmüştür. Aksende 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde sırasıyla 1062,42 K, 871,36 K, 771,55 K ve 766,45 K sıcaklıkları ölçülmüştür. Biyogaz (1.Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal sonuçlar ile deneysel ölçülen alev sıcaklıkları yanma odası boyunca benzer trendler gösterdiği söylenebilir. Genel olarak, tüm modelleme sonuçları deneysel ölçüm sonuçları ile en yüksek % 5-10 arasında bir sapma göstermektedir. Bunun yanında Biyogaz (1. Faz) gazının yakma işleminde kullanılan brülör seçiminin doğru tespit edildiği gözlenmektedir.



Şekil 6.54. Biyogaz (2.Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

Biyogaz (2. Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması Şekil 6.54 'de gösterilmiştir. Ölçülen alev sıcaklıkları, Şekil 6.54'de incelendiğinde ölçümler aksende 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde alınmıştır. Biyogaz (2.Faz) yanma alev sıcaklığı 1351,71 K olarak ölçülmüştür. Aksende 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde sırasıyla 1149,92 K, 882,57 K, 775,93 K ve 774,77 K sıcaklıkları ölçülmüştür. Biyogaz (2.Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal sonuçlar ile deneysel ölçülen alev sıcaklıkları yanma odası boyunca benzer trendler gösterdiği söylenebilir. Bunun yanında biyogaz (2. Faz) gazının yakma işleminde kullanılan brülör seçiminin doğru tespit edildiği gözlenmektedir.

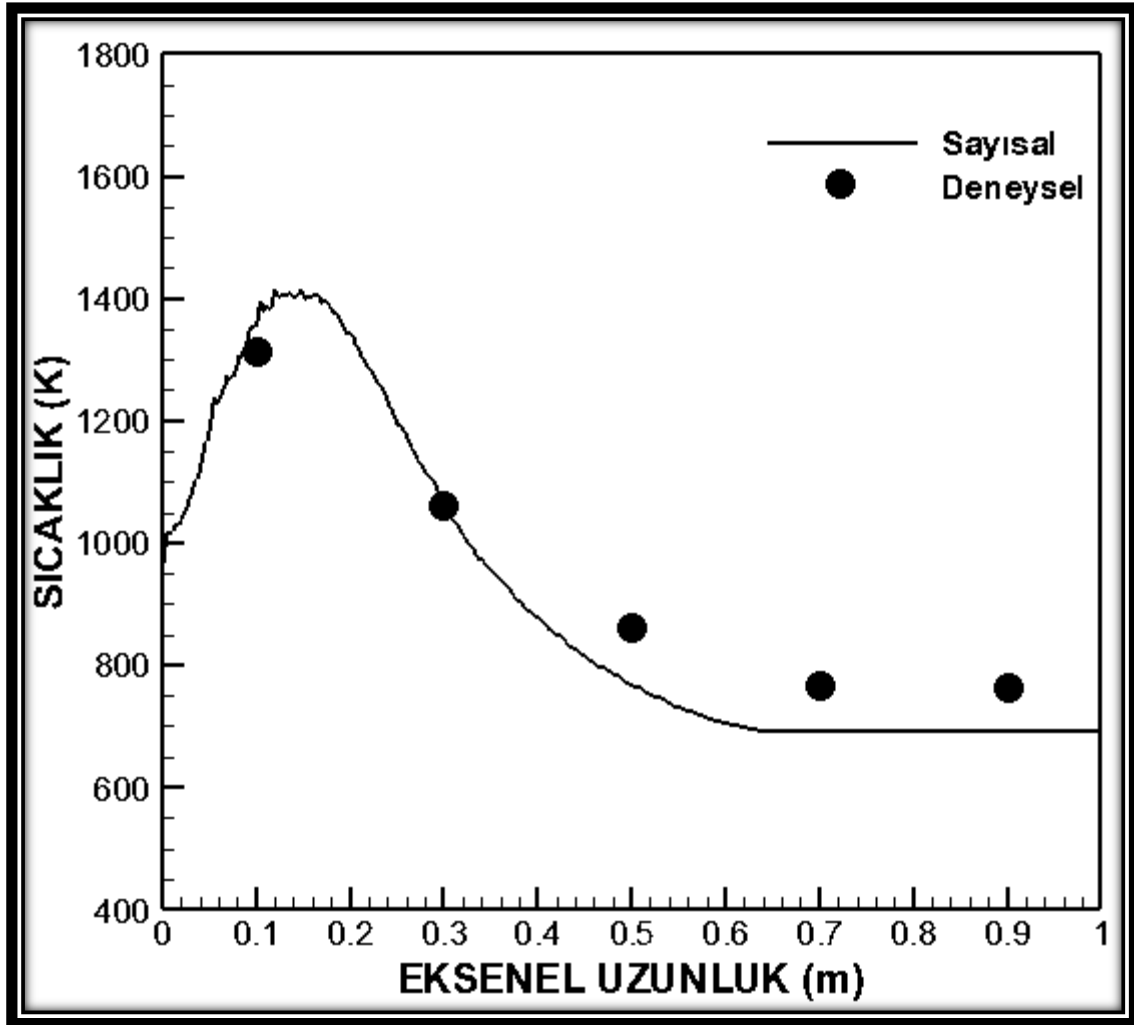


Şekil 6.55. Biyogaz (3.Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

Biyogaz (3. Faz) aksenel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması Şekil 6.55 'de gösterilmiştir. Ölçülen alev sıcaklıkları, Şekil 6.55'de incelendiğinde yanma odasındaki



ölçüm noktaları aksanelde 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde alınmıştır. Biyogaz (3.Faz) yanma alev sıcaklığı 1385,90 K olarak ölçülmüştür. Biyogaz (3.Faz) yanma alev sıcaklığı ile diğer biyogaz yakıtların alev sıcaklığından yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi bünyesinde ihtiva ettiği %65 metan olduğu söylenebilir. Aksanelde 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde sırasıyla 1231,34 K, 891,46 K, 785,65 K ve 779,05 K sıcaklıkları ölçülmüştür. Biyogaz (3.Faz) aksanel sıcaklıklarının sayısal sonuçlar ile deneysel ölçülen alev sıcaklıkları yanma odası boyunca benzer trendler gösterdiği söylenebilir. Bunun yanında biyogaz (3. Faz) gazının yakma işleminde kullanılan brülör seçiminin doğru tespit edildiği gözlenmektedir.



Şekil 6.56. Biyogaz (4.Faz) aksanel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

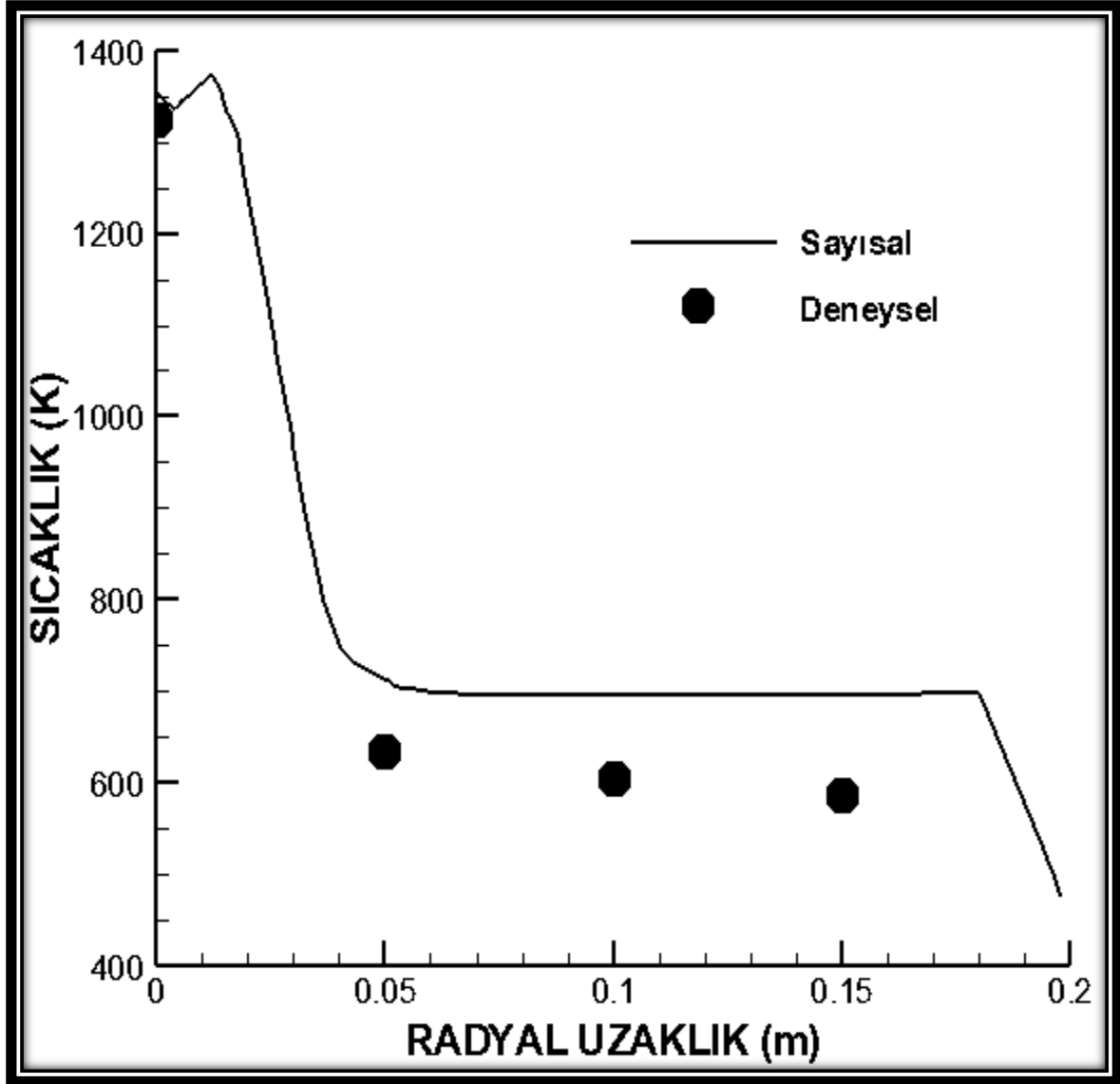
Biyogaz (4. Faz) aksanel sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması Şekil 6.56 'da gösterilmiştir. Ölçülen alev sıcaklıkları, Şekil 6.56 'da incelendiğinde aksanelde alınan ölçümler 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde alınmıştır. Biyogaz (4.Faz)

yanma alev sıcaklığı 1312,61 K olarak ölçülmüştür. Eksenelde 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ve 0,9 m mesafelerde sırasıyla 1062,95 K, 863,57 K, 765,54 K ve 765,30 K sıcaklıkları ölçülmüştür. Biyogaz (4.Faz) aksenal sıcaklıklarının sayısal sonuçlar ile deneysel ölçülen alev sıcaklıkları yanma odası boyunca benzer trendler gösterdiği söylenebilir. Bunun yanında biyogaz (4. Faz) gazının yakma işleminde kullanılan brülör seçiminin doğru tespit edildiği gözlenmektedir. Biyogaz (1. Faz) ile biyogaz (4.Faz) yakıtların içerdiği gazların (%) olarak birbirine benzerdir, sadece Biyogaz (1. Faz) gazın içeriğinde 10 ppm H<sub>2</sub>S vardır. Bunun neticesinde biyogaz (1.Faz) yanma alev sıcaklığı, biyogaz (4.Faz) yanma alev sıcaklığından 11,37 K daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

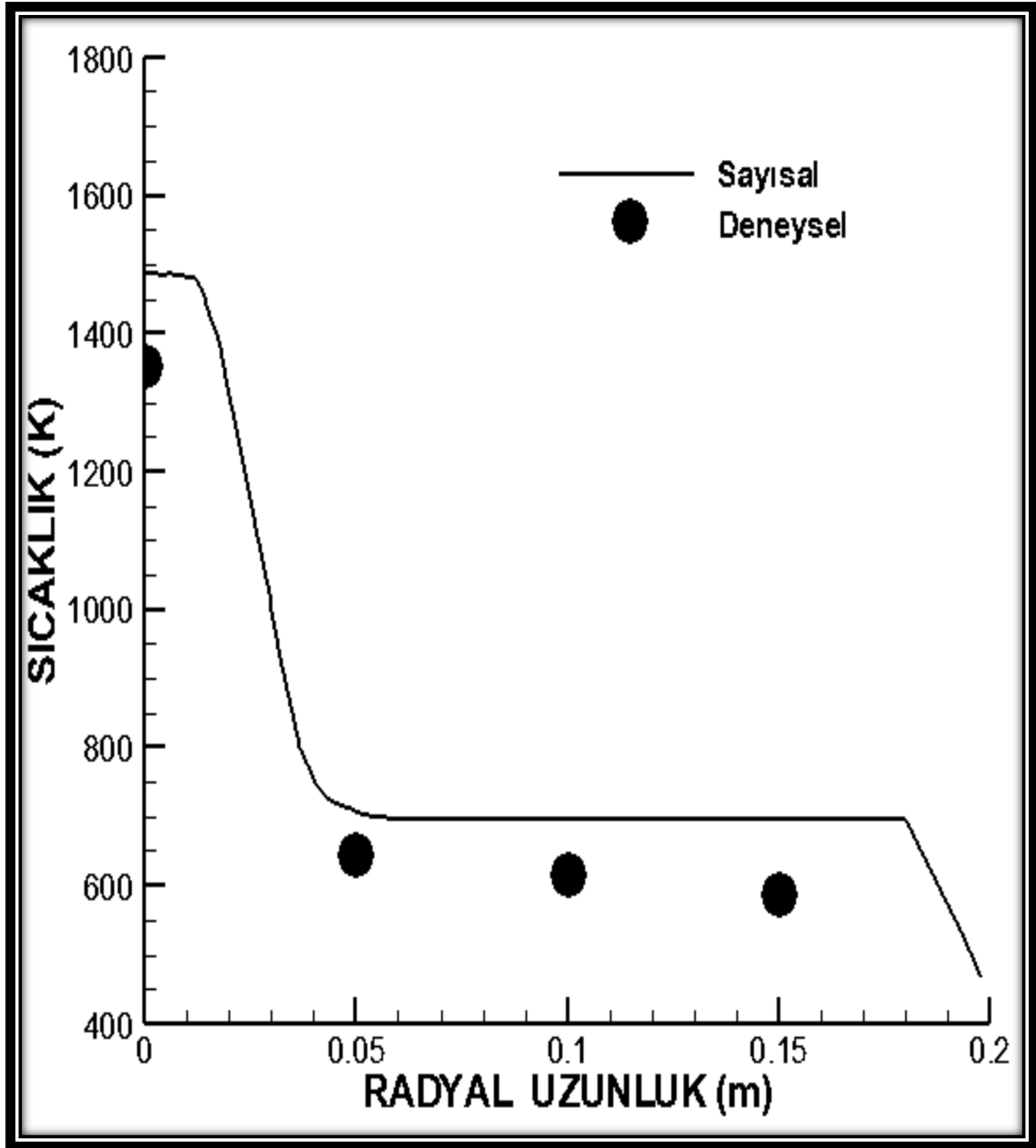
Biyogaz (4. Faz) yanma odası sıcaklığının aksenal olarak yanma odası çıkışına doğru yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen trend incelendiğinde, deneysel ölçümlerden elde edilen verilerle karşılaştığında, deneysel yöntem ve metodlar ile sayısal modelleme ve sınır şartlarının doğru tespit edildiği söylenebilir.

### **6.3.1. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 10 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması**

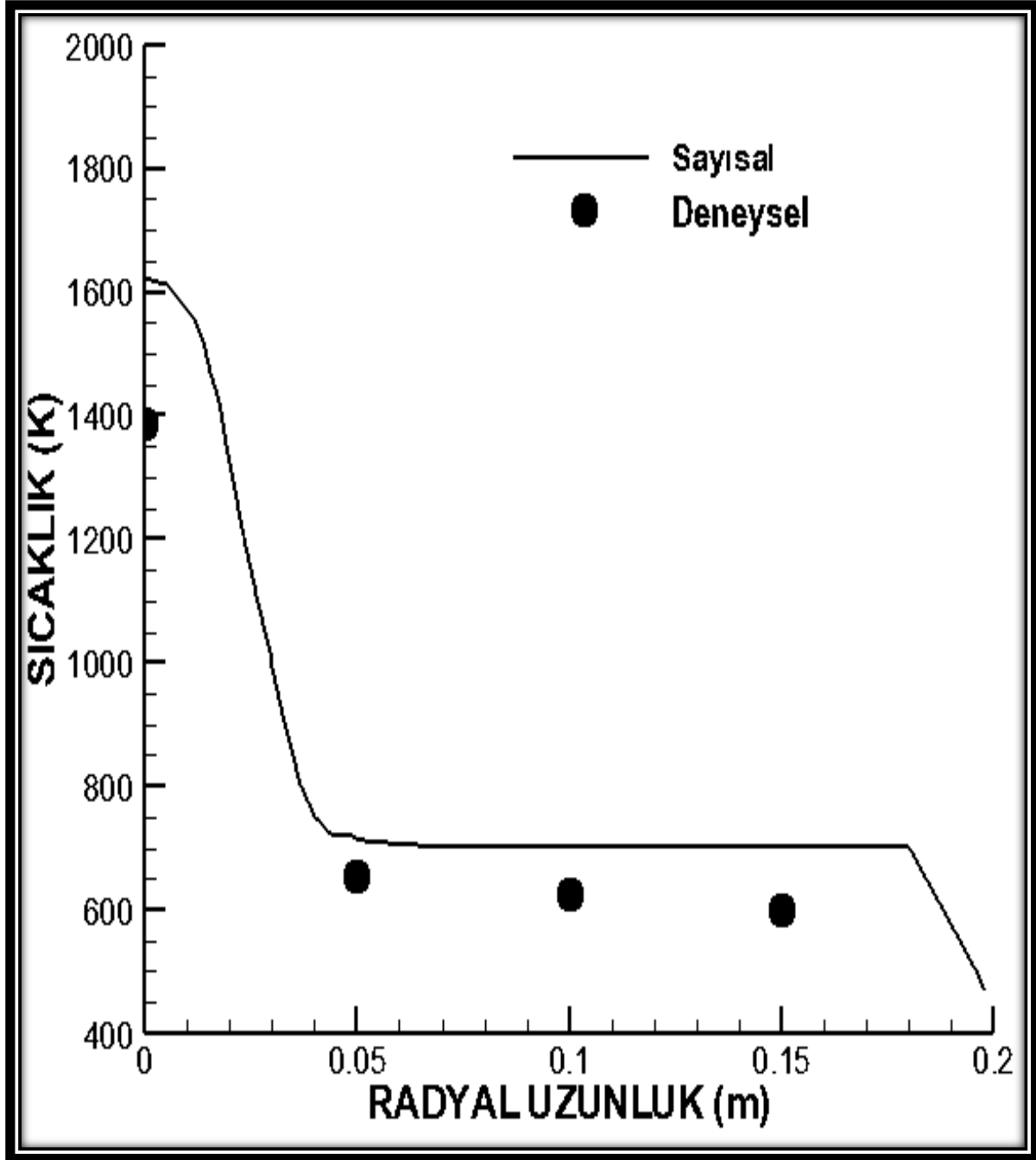
Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) gazların Şekil 6.57,- Şekil 6.60'de yanma şartları için 10 cm aksenal uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, alevin, yanma odası içerisinde yavaş yavaş yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yanma odası duvarına doğru gidildikçe, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları rahatlıkla söylenebilir.



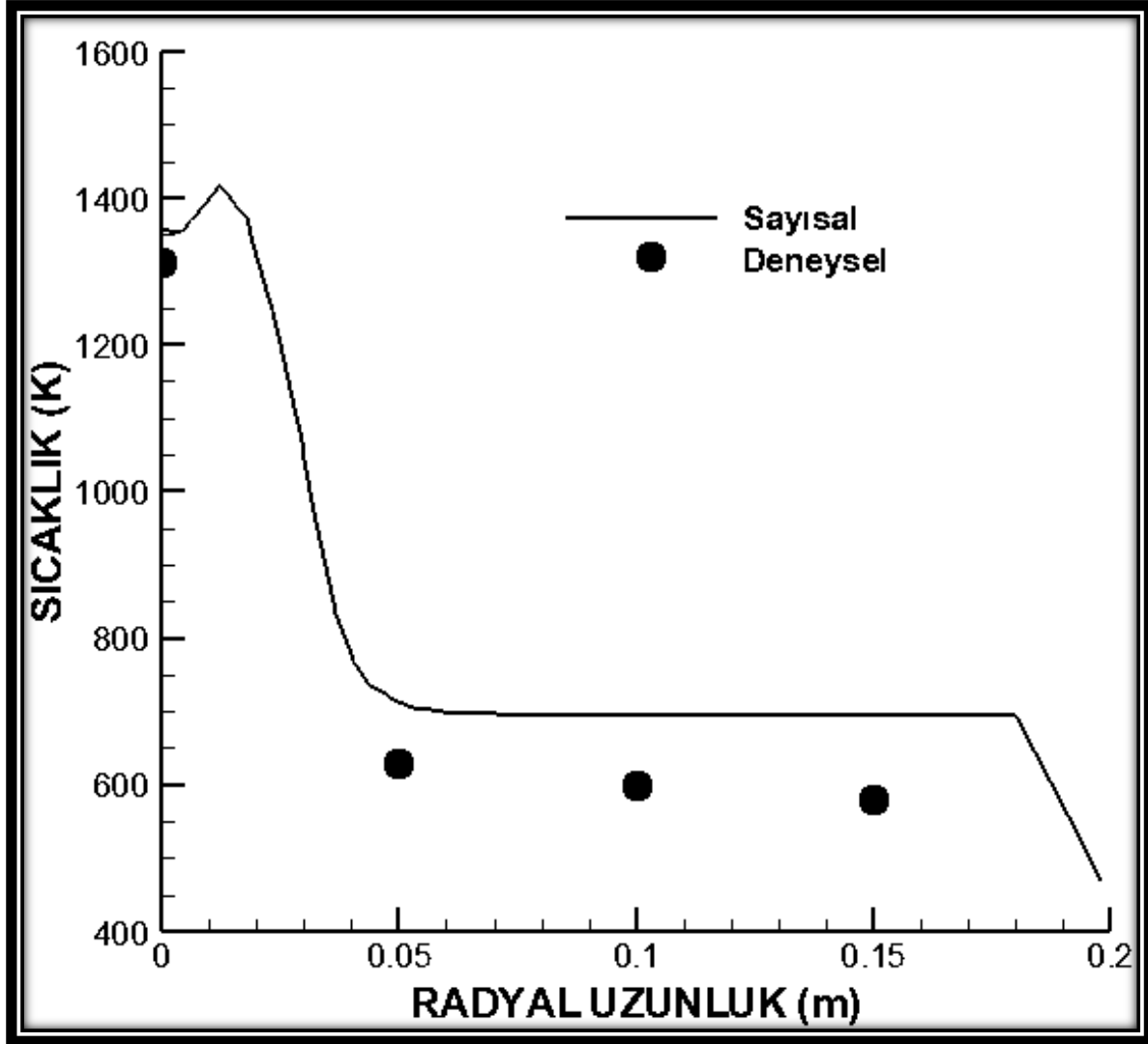
Şekil 6.57. Biyogaz ( 1. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.58. Biyogaz (2. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



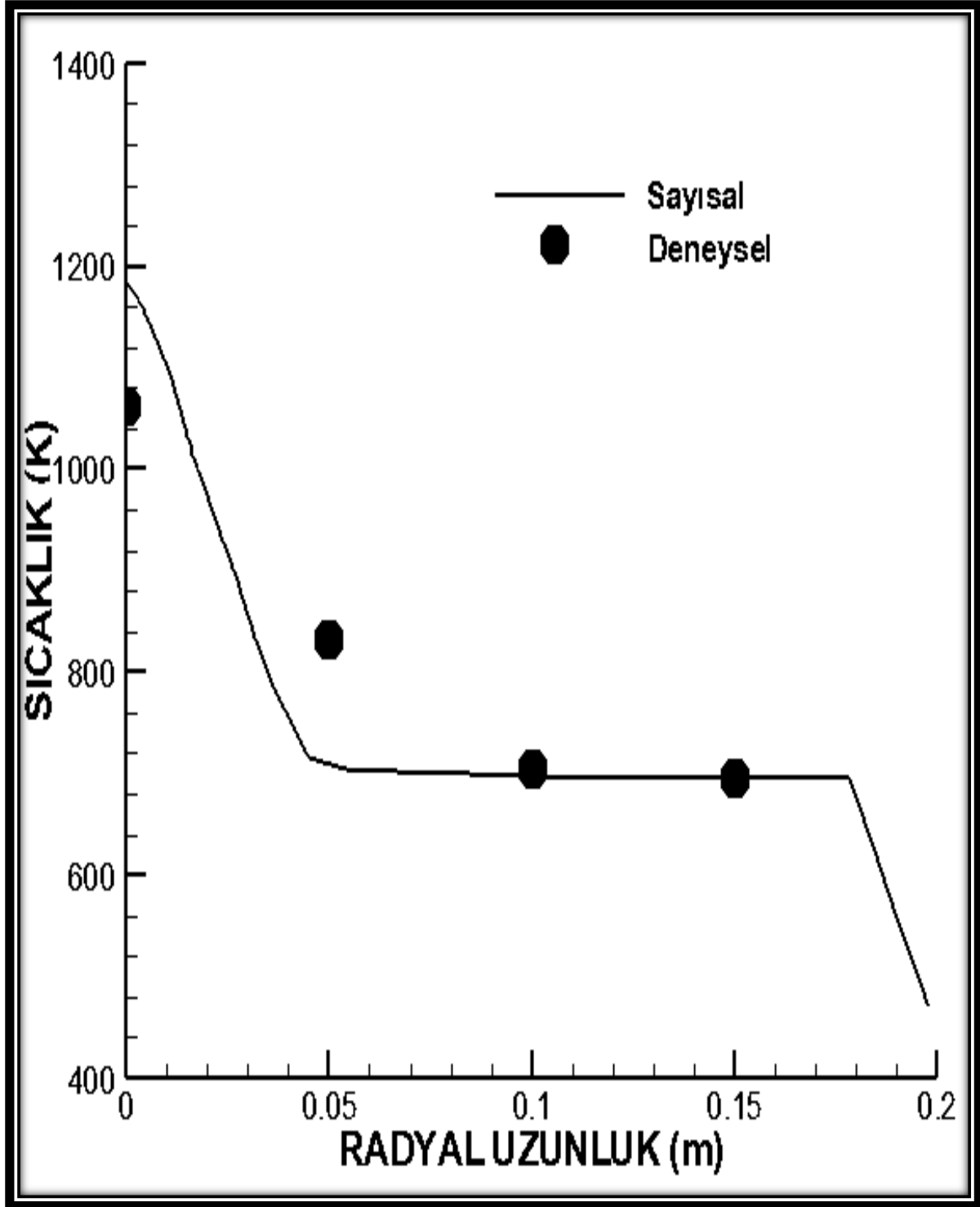
Şekil 6.59. Biyogaz (3. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



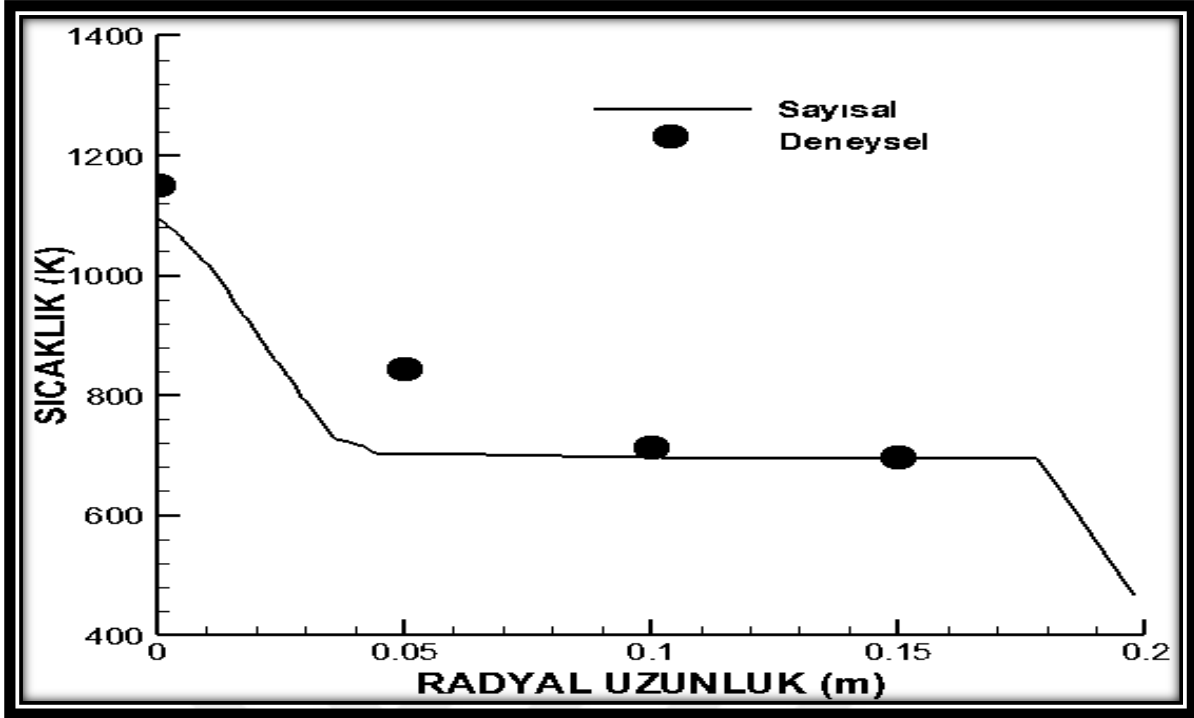
Şekil 6.60. Biyogaz (4. Faz) 10 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

### 6.3.2. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 30 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

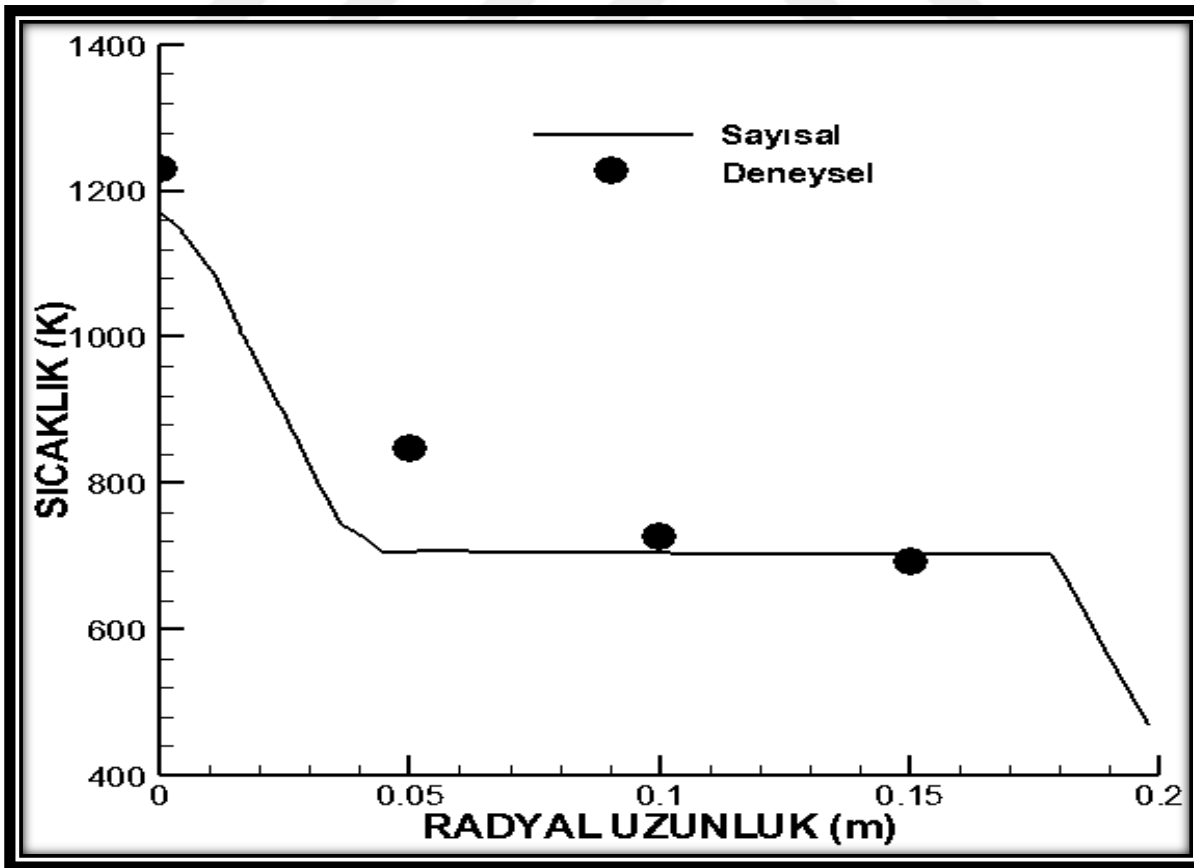
Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) gazların Şekil 6.61, - Şekil 6.64'de yanma şartları için 30 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, alevin, yanma odası içerisinde yavaş yavaş yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yanma odası duvarına doğru gidildikçe, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları rahatlıkla söylenebilir. Radyal sıcaklıkların deneysel ölçüm değerleri, sayısal analiz sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



Şekil 6.61. Biyogaz (1. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

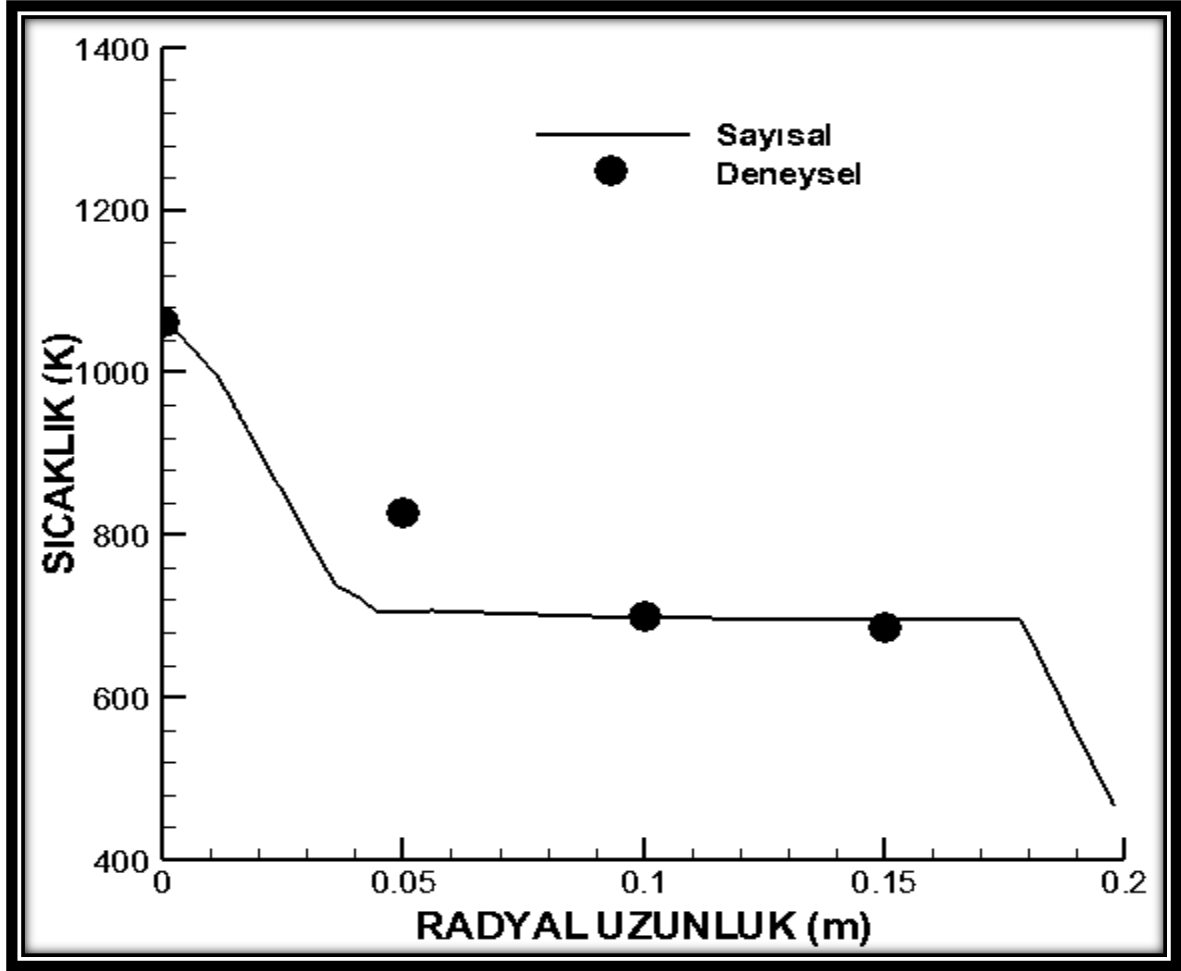


Şekil 6.62. Biyogaz (2. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.63. Biyogaz (3. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

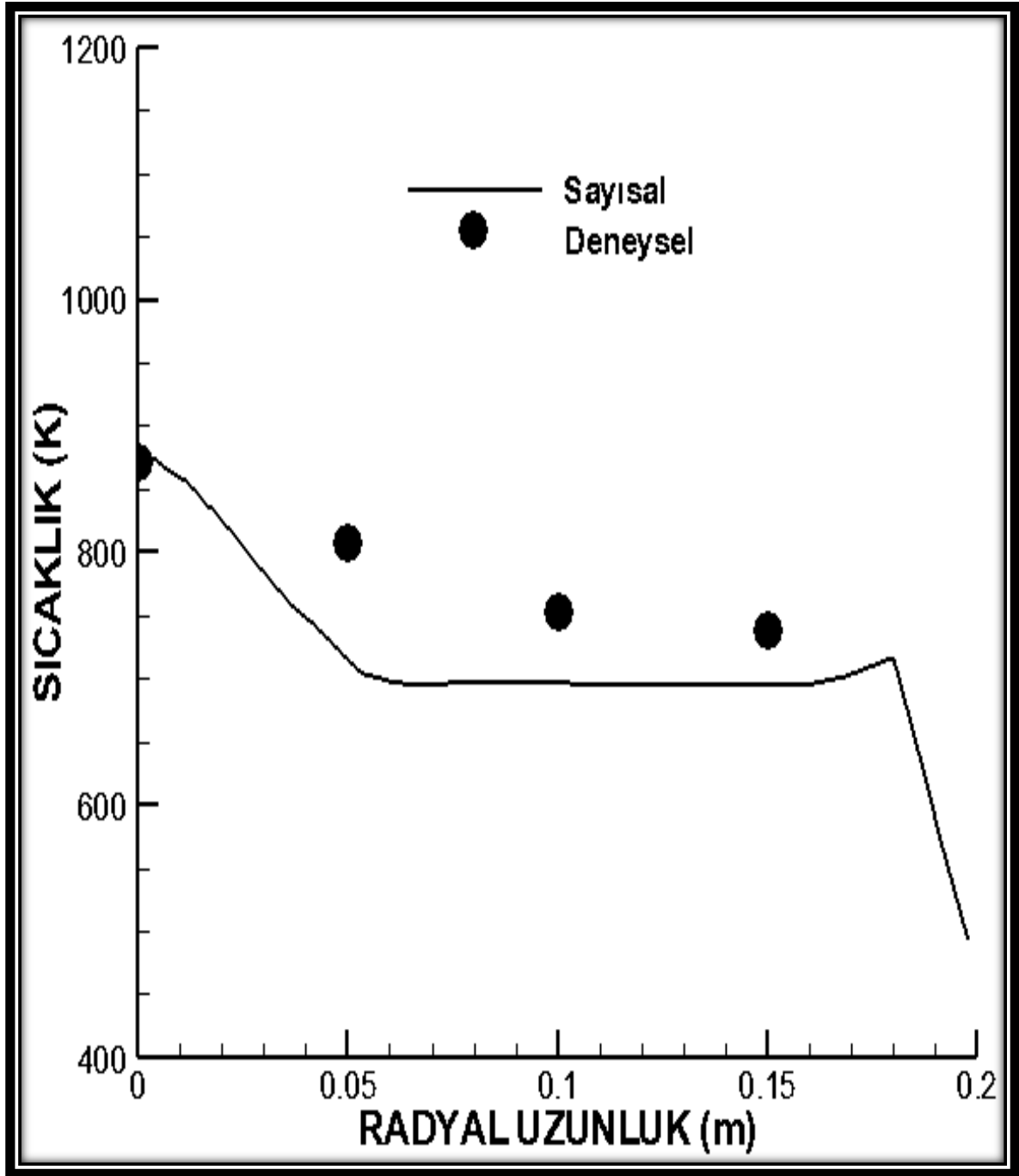




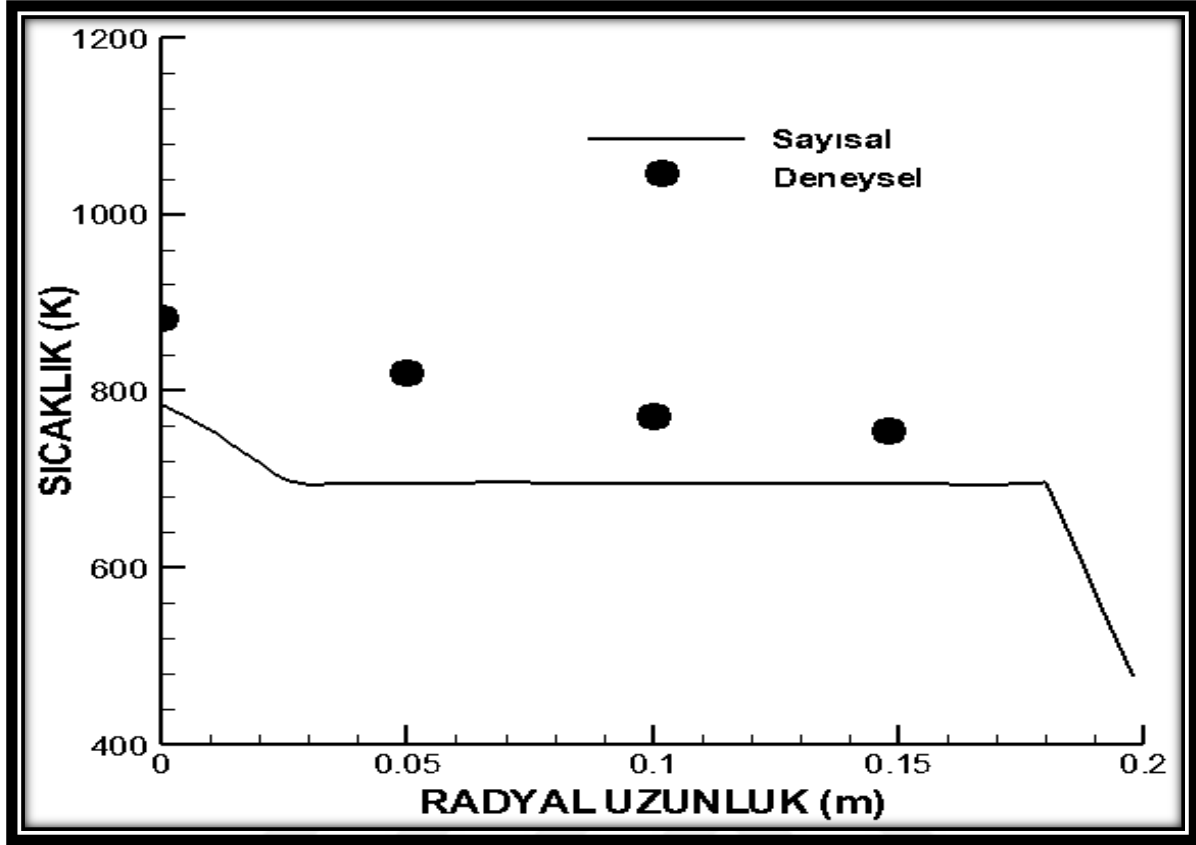
Şekil 6.64. Biyogaz (4. Faz) 30 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

### 6.3.3. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 50 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

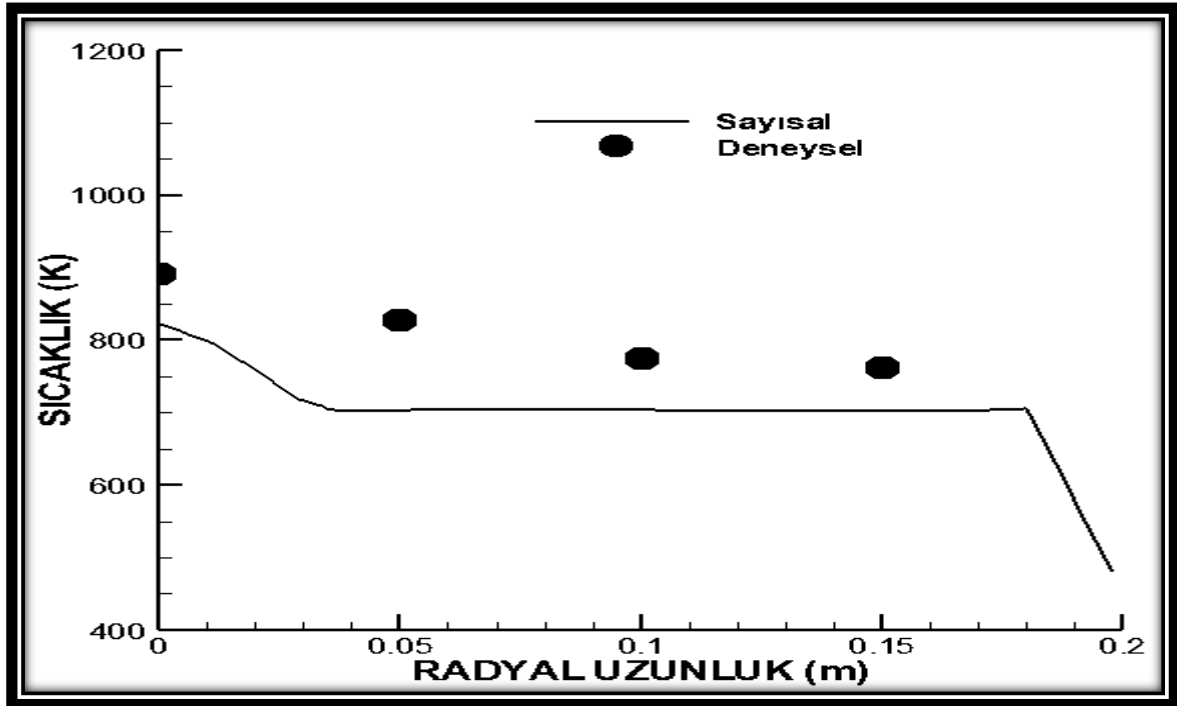
Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) gazların Şekil 6.65, - Şekil 6.68'de yanma şartları için 50 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, alevin, yanma odası içerisinde yavaş yavaş yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yanma odası duvarına doğru gidildikçe, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları rahatlıkla söylenebilir. Radyal sıcaklıkların deneysel ölçüm değerleri, sayısal analiz sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



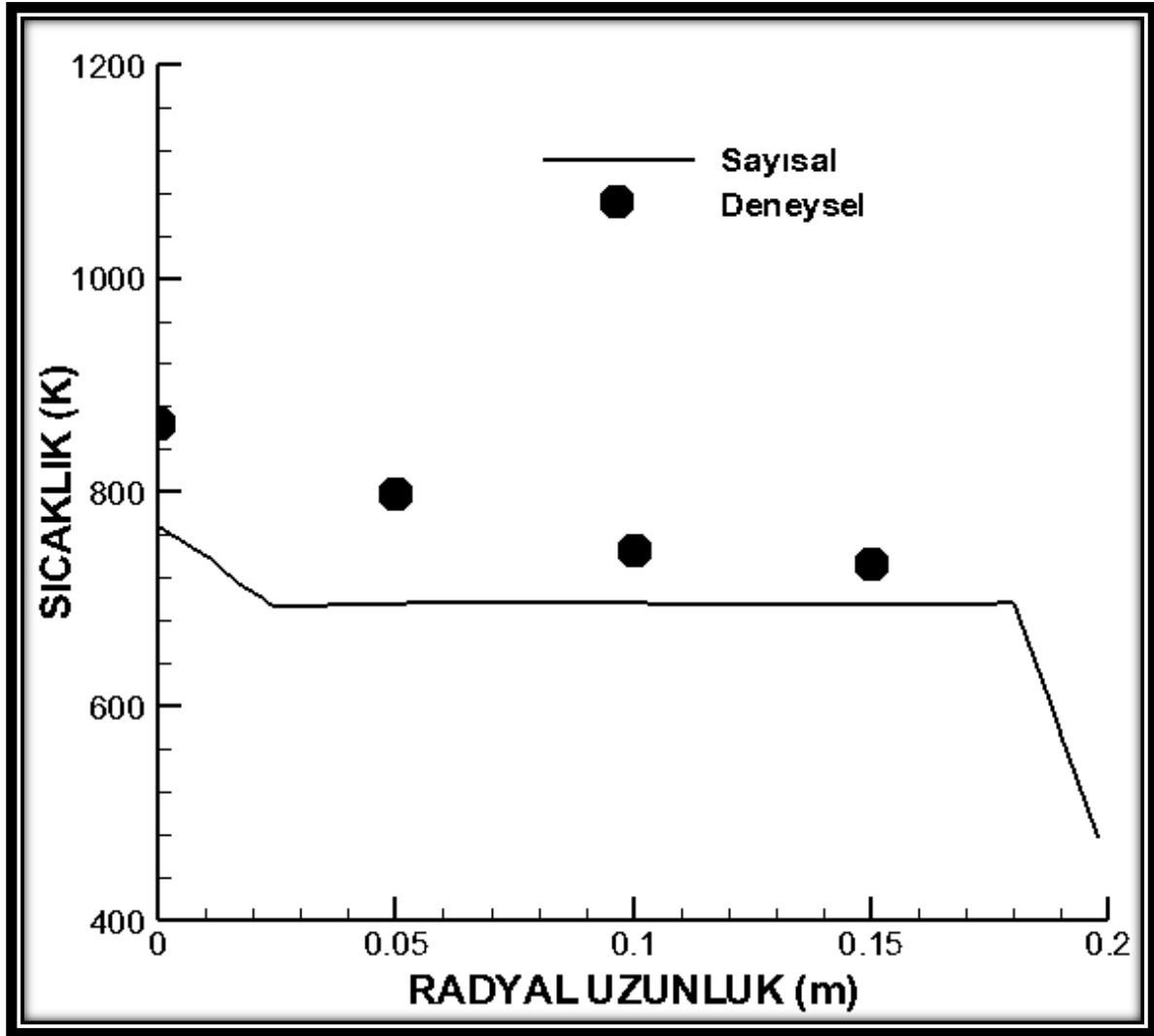
Şekil 6.65. Biyogaz (1. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.66. Biyogaz (2. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



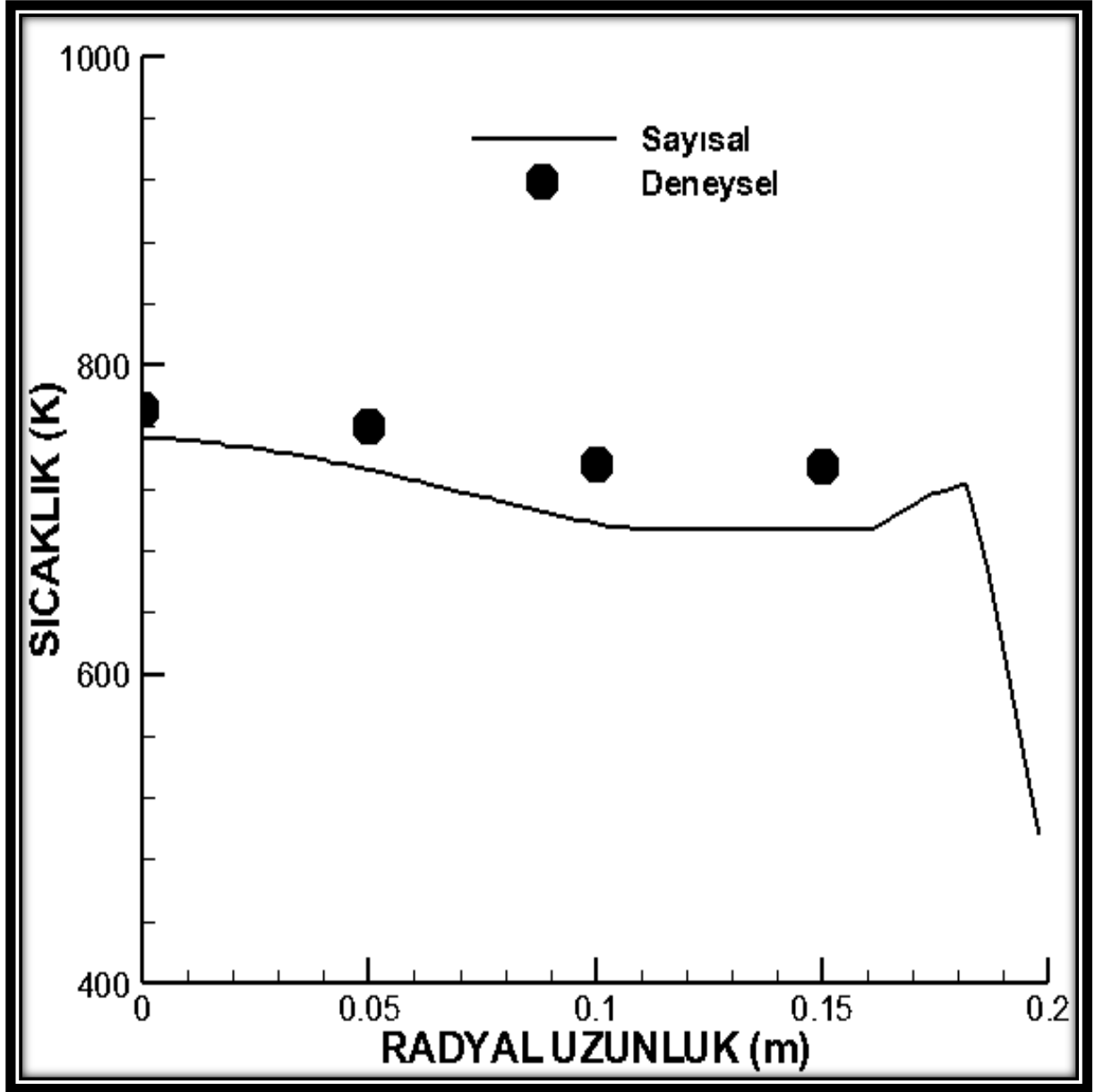
Şekil 6.67. Biyogaz (3. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



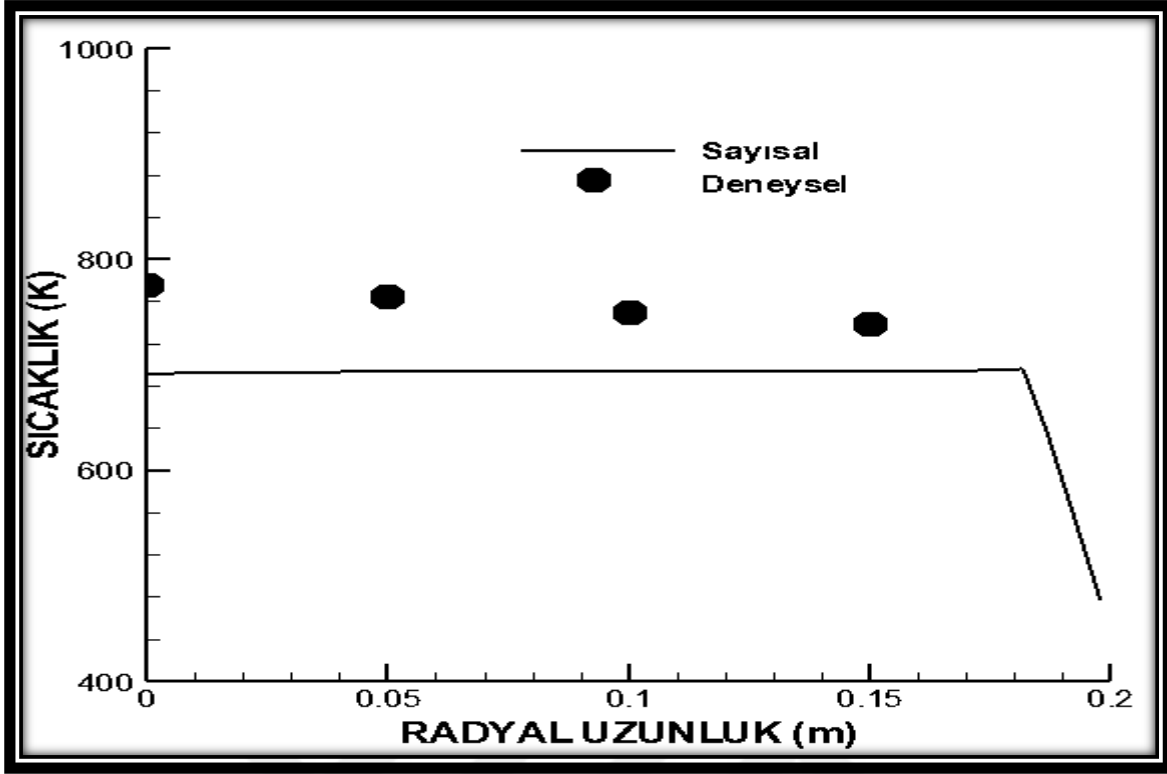
Şekil 6.68. Biyogaz (4. Faz) 50 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

#### 6.3.4. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 70 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

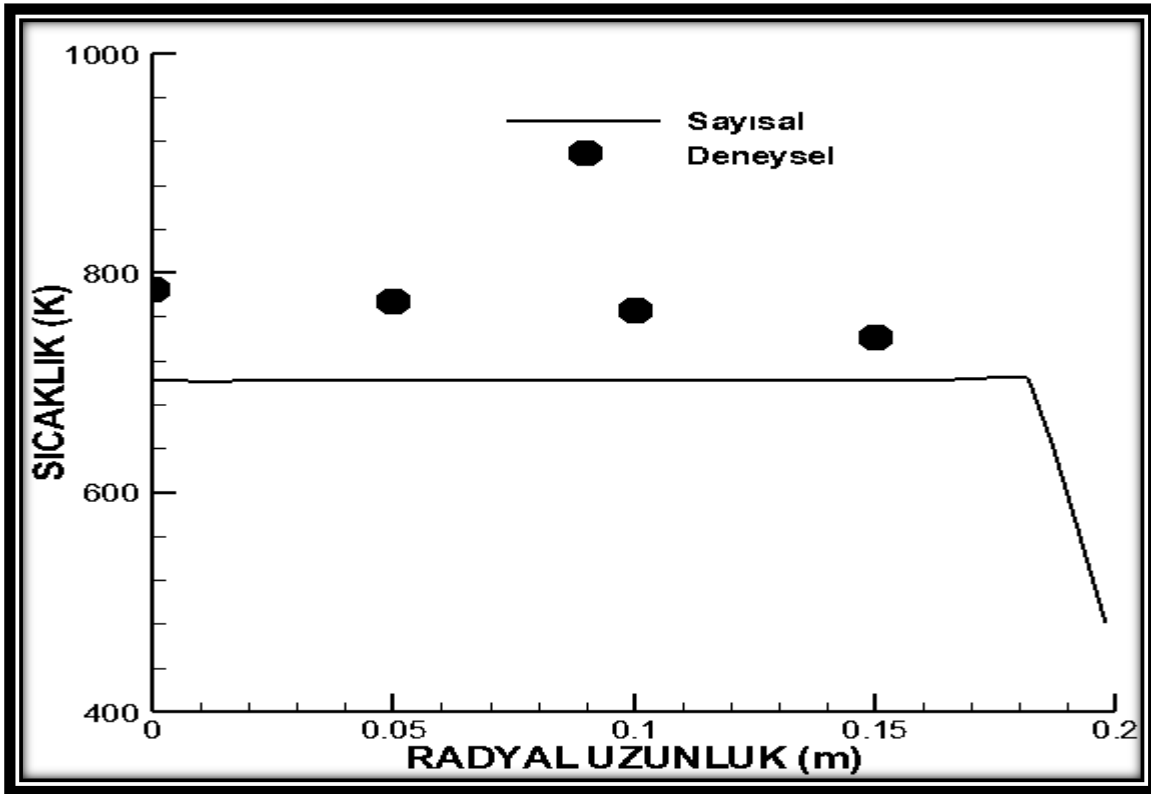
Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) biyogazların Şekil 6.69- Şekil 6.72'de yanma şartları için 70 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, alevin, yanma odası içerisinde yavaş yavaş yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yanma odası duvarına doğru gidildikçe, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları rahatlıkla söylenebilir. Radyal sıcaklıkların deneysel ölçüm değerleri, sayısal analiz sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında benzer trendler gösterdiği söylenebilir.



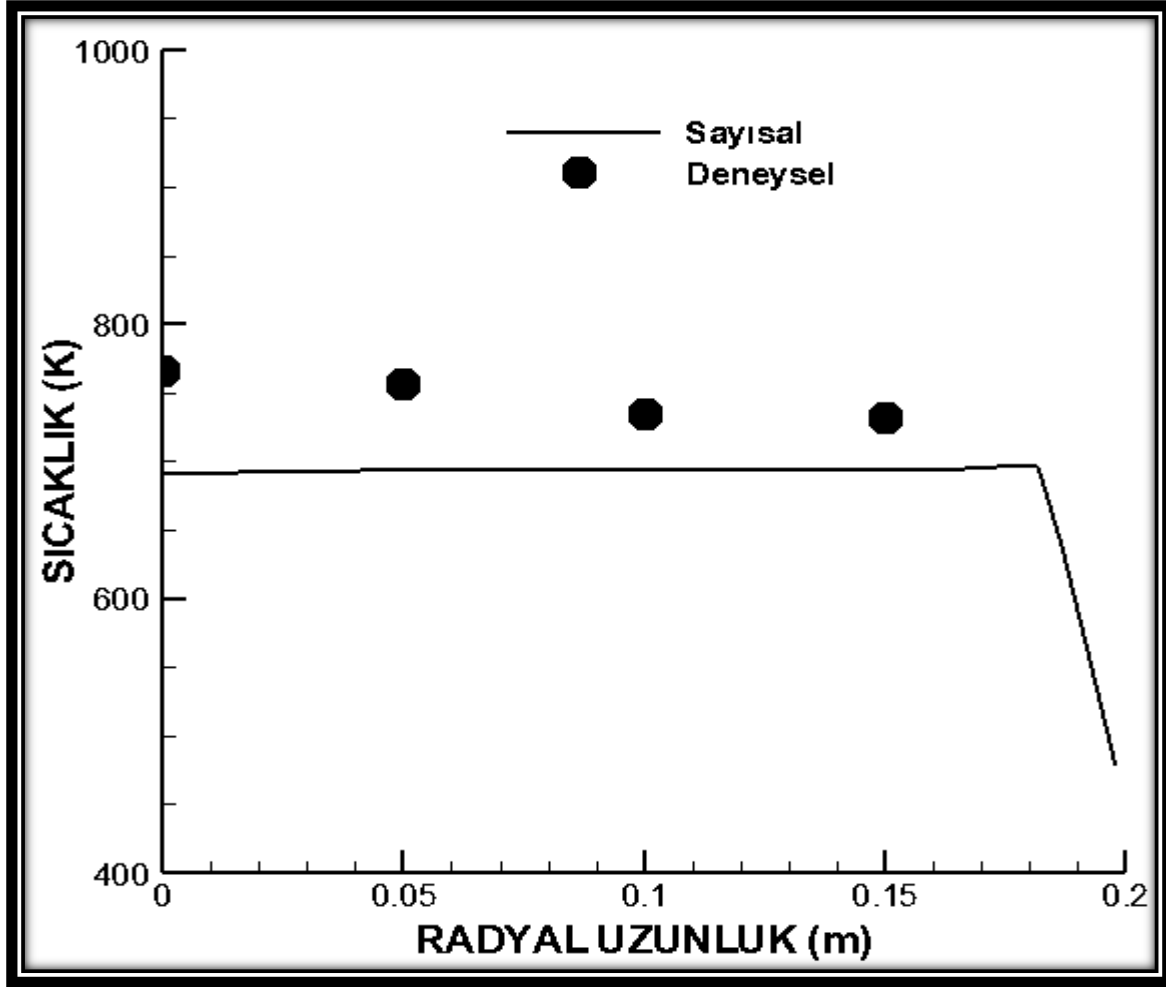
Şekil 6.69. Biyogaz (1. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.70. Biyogaz (2. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



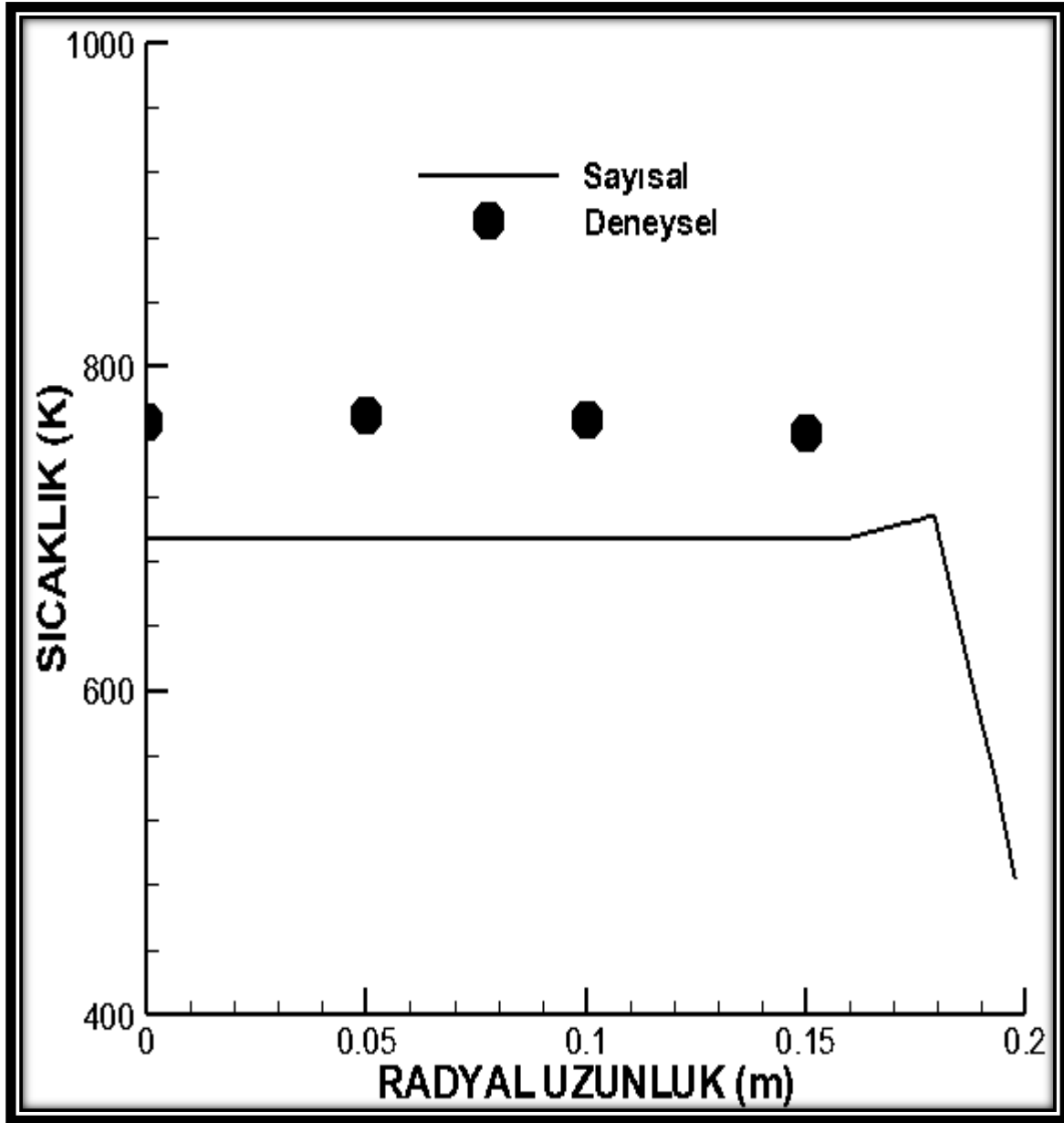
Şekil 6.71. Biyogaz (3. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.72. Biyogaz (4. Faz) 70 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

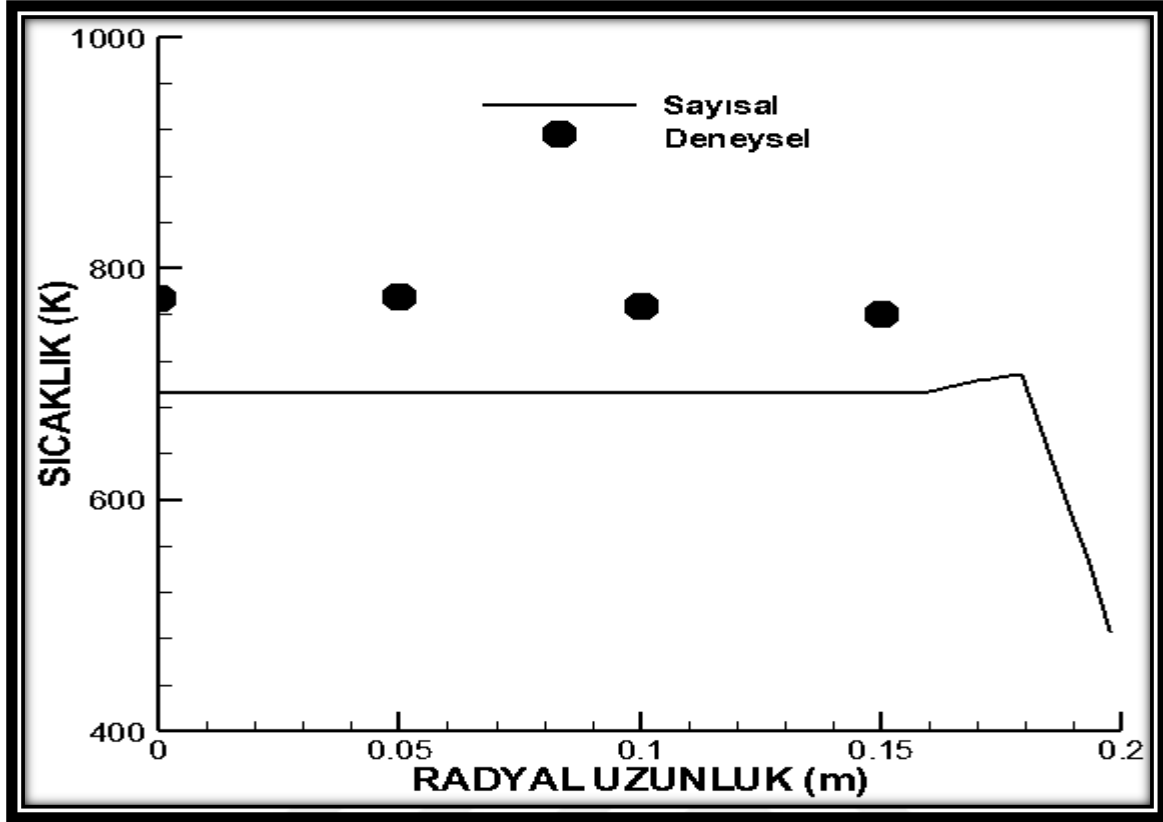
### 6.3.5. Biyogaz (1. Faz), Biyogaz (2. Faz), Biyogaz (3. Faz) ve Biyogaz (4. Faz) 90 cm deki Radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

Biyogaz (1. Faz), biyogaz (2. Faz), biyogaz (3. Faz) ve biyogaz (4. Faz) gazların Şekil 6.73,-Şekil 6.76'da yanma şartları için 90 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, alevin, yanma odası içerisinde yavaş yavaş yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yanma odası duvarına doğru gidildikçe, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları rahatlıkla söylenebilir. Radyal sıcaklıkların deneysel ölçüm değerleri, sayısal analiz sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında benzer trendler gösterdiği söylenebilir.

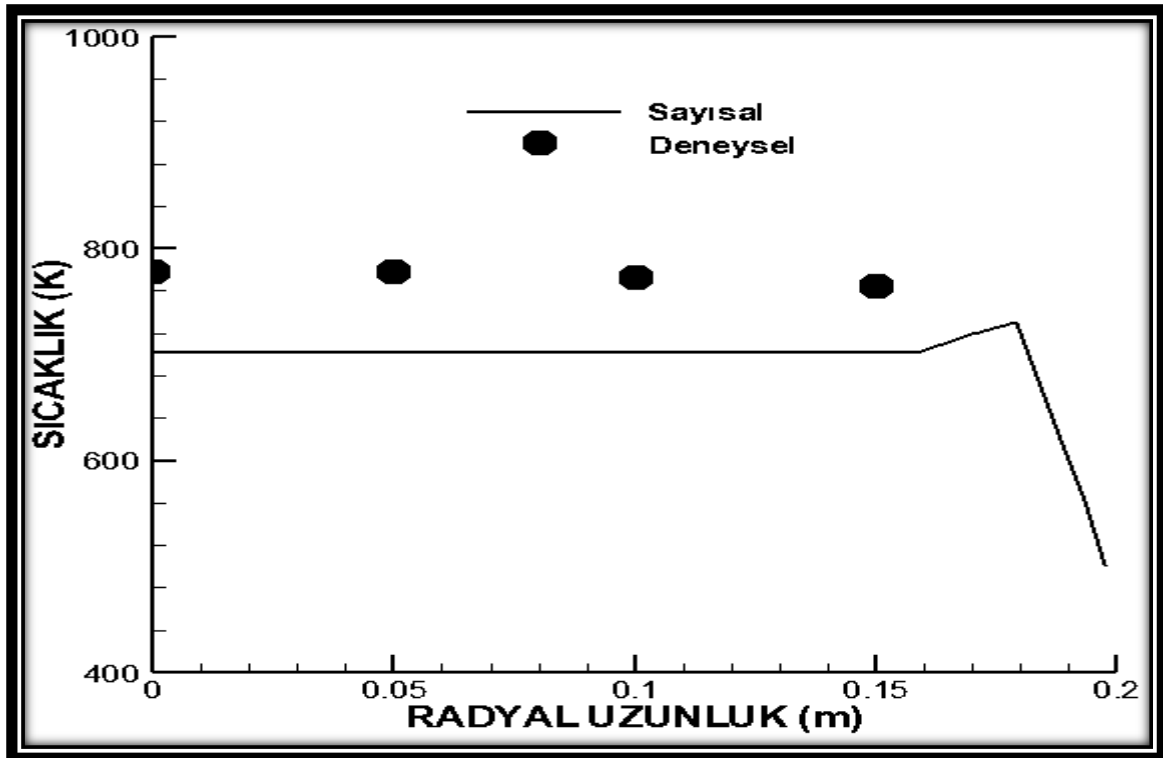


Şekil 6.73. Biyogaz (1. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

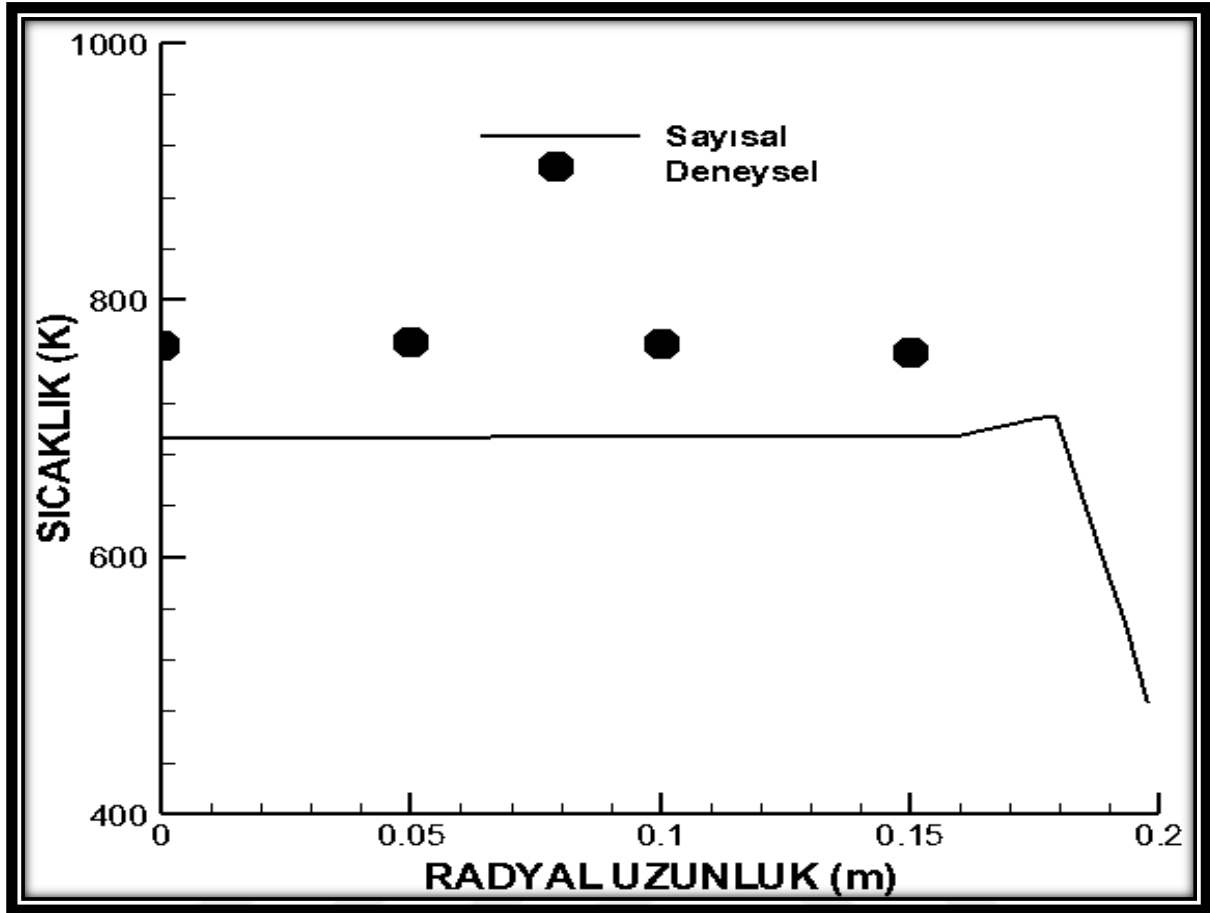




Şekil 6.74. Biyogaz (2. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.75. Biyogaz (3. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması



Şekil 6.76. Biyogaz (4. Faz) 90 cm deki radyal sıcaklıklarının sayısal ve deneysel karşılaştırılması

### 6.3.6. SO<sub>2</sub> Emisyon dağılımı

Yanma sonucu ürünlerden olan SO<sub>2</sub> (%) 'nin yanma odasındaki emisyon dağılımları incelenmiştir. Bu farklı içeriklere sahip olan biyogazlardan, H<sub>2</sub>S içeriğine sahip olan Biyogaz (1. Faz) 'ın yanma sonucu emisyonlarında ortaya çıkmıştır. Doğal gaz brülörü ile çalışan yanma odasında, SO<sub>2</sub> emisyonları yanma odası eksenini boyunca 10 cm mesafede 25 ppm ve alev merkezine 30 cm mesafelerde 8 ppm olarak ölçülmüştür. Bu çok düşük emisyon değeri nedeniyle, diğer eksenel ve radyal mesafelerde SO<sub>2</sub> emisyonları elde edilemedi.



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, farklı içeriklere sahip biyogazlarının yanma performansları ve emisyon parametreleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Mevcut doğalgaz brülörü kullanılarak biyogazlar verimli bir şekilde yakılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir;

### 7.1. Sonuç

Deneyle sırasında herhangi bir alev kararsızlığı ile karşılaşılmaş olup, geliştirilen brülörler ve yakma sistemi sayesinde tüm yakıtlar başarılı bir şekilde yakılmıştır.

Biyogazlar arasında en yüksek alev sıcaklığına biyogaz (3. Faz) yanmasında ulaşılmıştır.

Biyogaz (3. Faz) gaz yakıtın yanma performansları metana oldukça yakın seviyelerde seyretmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, doğalgaza alternatif teşkil edebilecek emisyon ve sıcaklık değerlerine sahip oldukları rahatlıkla söylenebilir.

Biyogazların emisyonları değerlendirilecek olursa  $NO_x$  seviyelerinin metana göre daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde metana göre oldukça iyi durumda oldukları rahatlıkla söylenebilir.

Biyogazların CO seviyeleri değerlendirilecek olursa, CO emisyonları bakımından da metana göre daha iyi bir durumda oldukları tespit edilmiştir.

Biyogazların yanma performansları, ısıl değerleri bünyelerinde ihtiva ettiği metan miktarına göre doğalgaza alternatif bir yakıt olduğu belirlenmiştir.

Biyogazlarının alev bölgesindeki yanma performanslarının metana yanma performanslarına yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Biyogazlarının alev bölgesindeki yanma sıcaklıkları karşılaştırıldığında biyogaz (3.Faz) gaz yakıtın alev sıcaklığının diğer biyogazlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiş (özellikle alev bölgesinde), bu durumunda  $NO_x$  seviyelerinin yükselmesine sebep olduğu

belirlenmiştir.

Biyogaz (3.Faz)'ın diğer biyogazlara göre yanma sıcaklık seviyeleri yüksek olmasından dolayı, metana göre düşük ama biyogaz fazlarına göre NO<sub>x</sub> seviyeleri de nispeten daha yüksek olmuştur.

Biyogaz bünyesinde %65 oranında metan içerdiğinde, doğalgaza daha uygun bir alternatif yakıt olabileceği tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda mevcut doğal gaz brülörü ile farklı bileşenlerdeki biyogazların yanma davranışlarını sonucu elde edilen sıcaklık ve emisyon değerleri metan ile karşılaştırıldığında, biyogazların doğalgaza alternatif bir enerji kaynağı olabileceği tespit edilmiştir.

Biyogazların yanma sonucu sıcaklık değerleri mevcut doğal gaz brülöründe metanın yanma sonucu sıcaklık değerlerine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Farklı içeriklere sahip biyogazların yanma odası ve yakıcı çıkışındaki NO<sub>x</sub> emisyonları seviyeleri metana göre daha azdır. Bu ölçümlere göre, kolayca biyogazların NO<sub>x</sub> emisyonları açısından doğal gaz brülörleri için çok uygun olduğu belirlenmiştir.

Yukarıdaki bulgulara göre, biyogazların(özellikle biyogaz 3.Faz) önemli bir değişiklik yapmadan konvansiyonel yakıcılarda kullanılabileceği tespit edilmiştir.

## 7.2. Öneriler

Biyogazların CO<sub>2</sub> emisyon seviyeleri, yanma odası boyunca ve çıkışında metanla kıyasla yüksek ölçülmüştür. Biyogazlar yanmadan kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyon seviyelerinin yüksek olması nedeniyle bir sistem geliştirilmesi ve geliştirilen bu sistemle CO<sub>2</sub> emisyon seviyelerinin düşürülmesi sağlanabilir. Bunun sonucu olarak mevcut doğalgaz brülöründe biyogaz fazlarının yakılmasının CO<sub>2</sub> emisyonu bakımından uygun olacağı önerilmektedir.

Bazı biyogazların CO emisyonlarının metan ile karşılaştırıldığında CO emisyonları daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bazı biyogazlar özellikle Biyogaz (3. Faz) CO

emisyollarının uygun bir absorpsiyon sistemi kullanılması ile kabul edilebilir seviyelere dūřürülebilir.

Biyogazlar, doğal gaz veya LPG ile karıştırılarak, konvansiyonel cihazlarda yanma karakteristikleri araştırılabilir.

Biyogazların daha etkin bir şekilde yakılmasını sağlamak için iğeriğine uygun olacak şekilde yeni tip brölörler geliştirilebilir.

Çalışmada kullanılan konvansiyonel yakıcının kapasitesi artırılarak çalışmada kullanılan biyogazlar daha yüksek kapasiteler için de kullanılabilir.

Çalışmada kullanılan biyogazlar yüksek basınç şartlarında yakılarak yanma ve emisyon davranışları araştırılabilir.

Biyogazların aerodinamik yanma karakteristikleri LDA ya da PIV akış görüntüleme teknikleri kullanılarak belirlenebilir.

Biyogazların modellenmesinde zamana bağlı çözüm gerektiren türbölans modelleri ve farklı yanma modelleri kullanılarak modellemeler yapılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Toklu, E., Güney, M. S., Isik, M., Comakli, O., Kaygusuz, K. (2010). Energy production, consumption, policies and recent developments in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1172 – 1186.
2. Yüksel, I. (2010). Energy production and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable Energy*, 35, 1469 - 1476.
3. Demirbas, A. (2001). Energy balance, energy sources, energy policy, future developments and energy investments in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 42, 1239 – 1258.
4. Tunc, M., Camdali, U., Parmaksizoglu, C., (2006). Comparison of Turkey's electrical energy consumption and production with some European countries and optimization of future electrical power supply investments in Turkey. *Energy Policy*, 34, 50–59.
5. Öztürk, İ., Dereli, R.K., Özabalı, A., Eriçyel, K. ve Karakaya, İ. (2009). Suluova(Amasya) Besiciler Birliği (SBB) Besi Organize Sanayi Bölgesi(OSB) Merkezi Biyometan Tesisi (MBT) Fizibilite Raporu Cilt II. T.C. Amasya Valiliği Amasya İl Özel İdare Müdürlüğü ve Biosfer Danışmanlık ve Mühendislik Ltd.
6. İnternet: IEA. Bioenergy Task 37. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.iea-biogas.net%2Fcountry-reports.html&date=2017-01-03>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2017.
7. Dirkse, E. H. M. (2007). Biogas Upgrading Using the DMT TS-PWS Technology Report, Page 2-12, DMT Environmental Technology.
8. Hosseini, S. E., Bagheri, G. and Wahid, M. A. (2014). Numerical investigation of biogas flameless combustion, *Energy Conversion and Management*, 81, 41 – 50.
9. Hamed M. R., Tsolakis A. and Lau C. S. (2014). Biogas upgrading for on-board hydrogen production: Reforming process CFD modelling, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(24), 12532 – 12540.
10. Birth, T., Heineken W. and He L. (2014). Preliminary design of a small-scale system for the conversion of biogas to electricity by HT-PEM fuel cell, *Biomass and Bioenergy*, 65, 20-27.
11. Teng, Z., Hua, J., Wang, C. and Lu, X. (2014). *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology* (First Edition) USA: Elsevier, 99-110.
12. Chen, S. and Zheng, C. (2011). Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(23), 15403 – 15413.
13. Xuan, J., Leung, M. K. H. and Leung D. Y. C. (2009). Integrating chemical kinetics with CFD modeling for autothermal reforming of biogas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(22), 9076 – 9086.



14. Ramirez-Minguela, J. J., Rodriguez-Munoz, J. L., Perez-Garcia, V., Mendoza-Miranda, J. M., Munoz-Carpio, V. D. and Alfaro-Ayala, J. A. (2015). Solid oxide fuel cell numerical study: modified MOLB-type and simple planar geometries with intrnal reforming, *Electrochimica Acta*, 159, 149 – 157.
15. Lindmark, J., Thorin, E., Fdhila, R. B., and Dahlquist, E. (2014). Effects of mixing on the result of anaerobic digesiton: Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviewes*, 40,1030 – 1047.
16. Sun, M., Song, W., Zhai, L. and Cui, Y. (2013). Effective sulfur and energy recovery from hydrogen sulfide through incorporating an air-cathode fuel cell into chelated-iron process, *Journal of Hazardous Materials*, 263(2), 643-649.
17. Coughtrie, A. R., Borman, D. J. and Sleigh, P. A. (2013). Effects of turbulence modelling on rediction of flow characteristics in a bench-scale anaerobic gas-lift digester, *Bioresource Technology*, 138, 297 – 306.
18. Wu, B. (2014). CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters, *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 278-286.
19. Wu, B. (2012). Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 195-208.
20. Fanelli, E., Viggiano, A., Braccio, G., Magi, V.(2014). On laminar flame speed correlations for H<sub>2</sub>/CO combustion in premixed spark ignition engines, *Applied Energy*, 130, 166-180.
21. Ariyaratne, W. K. H., Malagalage, A., Meleaen, M. C., Tokheim, L (2014). CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln- Investigation of fuel particle size and fuel feding position impacts, *Chemical Engineering Science*, 123,596-608.
22. Galletti, C., Ferrarotti, M., Parente A., Tognotti, L. (2015). Reduced NO formation models for CFD simulations of MILD combustion, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 4884-4897.
23. Kim, S., Bae, J. (2014). Numerical analysis of a 20-kWe biogas steam reformer in PEMFC applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 19485–19493.
24. Nikpeya, H., Assadia, M., Breuhausb B., P., and Mørkvedc, P., T., (2013). Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas, *Applied Energy*, 117, 30-41.
25. Šarapatka, B., (2003). Factors influencing biogas production during full-scale anaerobic fermentation of farmyard manure, *Bioresource Technology*, 49, 17-23.
26. Selim, H., Gupta, A. K., and Al Shoaibi, A., (2012) , Effect of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> concentration in acid gas stream on H<sub>2</sub>S combustion, *Applied Energy*, 98, 53-58.

27. Jatana, G., S., Himabindu, M., Thakur, H., S., and Ravikrishna, R.,V., (2014). Strategies for high efficiency and stability in biogas-fuelled small engines, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 189-195.
28. Hur, K., Rhim, and S., and Park J. (2009). Mechanical characteristics evaluation of biogas micro turbine power systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 1003-1009.
29. Adouane, B., de Jong, W., van Buijtenen, J.P., and Witteveen, G. (2010). Fuel-NOX emissions reduction during the combustion of LCV gas in an air staged Winnox-TUD combustor, *Applied Thermal Engineering*, 30, 1034-1038.
30. Huynh, C. V., Kong, S. (2013). Combustion and NOX emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam, *FUEL*, 107, 455-464.
31. Bhoi, P.R., Channiwala, S.A. (2009). Emission characteristics and axial flame temperature distribution of producer gas fired premixed burner, *Biomass and Bioenergy*, 33, 469-477.
32. Leung, T., Wierzba, I. (2008). The effect of hydrogen addition on biogas non-premixed jet flame stability in a co-flowing air stream, *International Journal of Hydrogen energy*, 33, 3859-3862.
33. Hosseini, S. E., Bagheri, G., and Wahid, M.A., (2014). Numerical investigation of biogas flameless combustion, *Energy Conversion and Management*, 81, 41-50.
34. Watson, G. M. G., Munzar, J. D., and Bergthorson, J. M., (2014). *NO formation in model syngas and biogas blends*, *FUEL*, 124, 113-124.
35. Somehsaraei, H. N., Majoumerd, M. M., Breuhaus, and P., Assadi, M., (2014). Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model, *Applied Thermal Engineering*, 66, 181-190.
36. Sethuraman, S., Huynh, C. V., Kong, S. C., (2011). Producer gas composition and NOX emissions from a pilot-scale biomass gasification and combustion system using feedstock with controlled nitrogen content, *energy&fuels*, 25, 813-822.
37. Ales Mühendislik İnş. Mad. Ve Danışmanlık Hiz. San. Tic. Ltd. Şti. Türkçe Rapor Temmuz 2012, Ankara.
38. Holm-Nielsen, J.B. , Seadi, T. Al, Oleskowicz-Popielc P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484. (38 olacak.)
39. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Fyenilenebilir%2Fbiyogaz.aspx&date=2017-01-03>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2017

40. Yılmaz, İ., (2006). *Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
41. FLUENT 6. Fluent incorporated. Vol. 2. 2002, LEI.
42. İlbaş, M., (1997). *Studies of Ultra Low NO<sub>x</sub> Burner*, Ph.D. Thesis, University of Wales, UK,
43. Anon, Fluent Manual V.4.2., Fluent Inc. (1993).
44. Anon, Fluent Manual V. 4.3., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA, (1994).



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞAHİN, Murat  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum Tarihi ve Yeri : 17.05.1982 Kırşehir  
 Medeni hali : Evli  
 E-Posta : murats@gazitto.com  
 Cep Telefonu : 90 (505) 757 98 17



### Eğitim Bilgileri

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Enerji Sist. Müh.	2016
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü	2012
Lisans	Erciyes Üniversitesi /Makine Mühendisliği	2005
Lise	Ankara Hasanoğlan Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesi	2000

### İş Deneyimleri

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi (TTO)	Proje Yürütücüsü/Uzman
2012-2014	OSTİM Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğü	Makine Mühendisi
2010-2011	Baştaş Hazır Beton A.Ş.,	İşletme Mühendisi
2006-2010	Lafarge Dalsan Alçı San.Tic. A.Ş	Makine Mühendisi
2005-2006	Sente Asansör İmalat ve San.Ltd.Şti.,	Makine Mühendisi
2004-2005	Erciyes Üniversitesi/Isı Santrali	Vardiya Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

## Yayınlar

1. Aktaş, M., İlbaş, M., Yalçın, A., Şahin, M. (2014). *Kızılötesi Işınımlı Bir Kurutucuda Kuruma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28 (4)(767-775).
2. Aktaş, M., İlbaş, M., Karyeyen, S., Şahin, M. (2014). *Energy Analysis of an Infrared Dryer for Different Drying Conditions*, 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, Uşak, Turkey, 2014.
3. İlbaş, M., Şahin, M., Karyeyen,S. (2016). *Combustion Behaviours of Different Biogases in an Existing Conventional Natural Gas Burner: An Experimental Study*. International Journal of Renewable Energy Research, 6 (3), 2016.
4. İlbaş, M., Şahin, M., Karyeyen,S. (2016). *3D numerical modelling of turbulent biogas combustion in a newly generated 10 KW burner*, Journal of the Energy Institute, In Press, available online.

## Bilimsel Araştırma Projesi(BAP)

- İnfrared Isıtıcı Bir Kurutucuda Isı ve Akış Analizi (2012) Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi
- Bir yakma sisteminde biyogaz yanma karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi(2016) Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi

## Hobiler

Tarih okumak, Yüzmek, Seyahat etmek



*GAZİ GELECEKTİR..*