T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARALEL AKIŞLI DİKEY ŞAFT FIRINLARINDA YANMA OLAYININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SAYISAL MODELLEMESİ

MİRAY SARDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. HAKAN DEMİR

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARALEL AKIŞLI DİKEY ŞAFT KİREÇ FIRINLARINDA YANMA OLAYININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SAYISAL MODELLEMESİ

Miray SARDOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 19.11.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ş.Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan BÖKE

İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda yardımını esirgemeyen, daima anlayışlı olan tez danışmanım Prof. Dr. Hakan Demir'e teşekkürlerimi sunarım.

Otto-von-Guericke University'de bu çalışmayı yapma fırsatını bana veren ve yaptığım çalışma süresinde bilgi ve yardımlarıyla destek olan Prof. Dr. Ing. Eckehard Specht'e teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmalarım sürecinde ihtiyaç duyduğum her anda bana destek olan Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü' nün değerli öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine ve tez savunmamda yer alan değerli jüri üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Hayatta daima yanımda olan, beni destekleyen aileme tüm içtenliğimle minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Kasım, 2018

Miray SARDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xiii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 5
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Hipotez 7

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER 8

2.1 Yanmanın Termodinamiği 8
2.1.1 Yanma Stokiyometrisi 8
2.1.2 Alev Çeşitleri 9
2.2 Kireçtaşı 11
2.2.1 Kireçtaşı Döngüsü 11
2.3 Kireç Fırınları 13
2.3.1 Dikey Şaflı Kireç Fırınları 14
2.3.2 Şaflı Kireç Fırınlarında Yaygın Problemler 15
2.3.2.1 Yanmanın Gerçekleştiği Bölgelerdeki Yüksek Sıcaklık 15
2.3.2.2 Gaz Dağılımının Düzensizliği 15
2.3.2.3 Şaft Kireç fırınlarının modellenmesindeki problemler 16
2.4 Poroz Ortam Modeli 16

BÖLÜM 3

SAYISAL MODELLEME 21

3.1 Sayısal Modelleme Teorisi 21
3.1.1 Yanmanın Sayısal Modellemesi 22
3.2 Geometri ve Mesh 26
3.3 Model ayarları 27
3.4 Sınır Koşulları 28

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER 31

4.1 Sonuçlar 31
4.1.1 Farklı Hava Fazlalık Katsayılarının Etkisi (λ = 1-2) 31
4.1.2 Farklı Porozite Değerlerinin Etkisi (φ=0,32-0,8) 35
4.1.3 Farklı Fırın Ölçülerinin Etkisi (D=2-6 m) 40
4.1.4 Farklı Nozul Ölçülerinin Etksi (d_L=30-70 mm) 44
4.1.5 Değerlendirme ve Öneriler 48

KAYNAKLAR 51

ÖZGEÇMİŞ 54

SİMGE LİSTESİ

a	Yüzey alanı vektörü
A	Alan
C	Karbon
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyumoksit
CH_4	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
d	Parçacık çapı
d_L	Nozul çapı
D	Fırın çapı
E	Toplam entalpi
f	Kuvvet vektörü
F_i	Difüzyon akısı
H_2O	Su
k_p	Geçirgenlik
L	Uzunluk
mmHg	Milimetre civa
NO_x	Azot oksitleri
N_2	Azot
P	Basınç
q''	Isı akısı
S_i	i için reaksiyon hızı
t	Zaman
O_2	Oksijen
v	Hız
V	Hacim
Y_i	i için kütle kesri
λ	Hava fazlalık katsayısı
φ	Porozite
ρ	Yoğunluk
μ	Akışkanın moleküler viskozitesi

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
EBU	Eddy-Break-Up
g	Gram
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
J	Joule
K	Kelvin
kcal	Kilokalori
kJ	Kilojoule
kg	Kilogram
mol	Mol
m^3	Metreküp
W	Watt
µm	Mikrometre

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Dünyada kirecin piyasaya göre yıllık milyon ton bazında dağılımı [3] 2
Şekil 1.2 2017 yılı dünya kireç üretimi [4] 3
Şekil 1.3 Yıllık dünya kireç üretimi ürün kategorisi (milyon ton) [3] 4
Şekil 1.4 Yanma sıcaklığına bağlı olarak sönmemiş kirecin (CaO) reaktivitesi [3] 4
Şekil 2.1 Kireçtaşı döngüsü [13] 13
Şekil 2.2 Kalsitin sıcaklık ile ayrışma basıncının değişimi [10] 13
Şekil 2.3 Tek şaftlı dikey fırın 14
Şekil 2.4 Yanma bölgesinde radyal sıcaklık dağılımı 16
Şekil 2.5 Partikül sistemleri 17
Şekil 2.6 Sabit yatakta poroz 19
Şekil 2.7 Dolgulu poroz yapı kategorileri 20
Şekil 3.1 Ergun atalet terimin Tanımlanması 25
Şekil 3.2 Ergun viskoz terimin Tanımlanması 25
Şekil 3.3 Star-CCM+' da çizilen kireç şaft fırını geometrisi 27
Şekil 3.4 Kullanılan modellerin seçim aşaması 28
Şekil 4.1 Farklı hava fazlalık katsayılarının alev boyuna etkisi 32
Şekil 4.2 Farklı hava fazlalık katsayılarının CH_4 mol kesrine etkisi (eksenel yönde) ... 32
Şekil 4.3 Hava fazlalık katsayısının CO mol kesrine etkisi (eksenel yönde) 33
Şekil 4.4 Hava fazlalık katsayısının sıcaklık üzerine etkisi (eksenel yön) 33
Şekil 4.5 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (eksenel yön) 34
Şekil 4.6 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (eksenel yön) 34
Şekil 4.7 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (radyal yön) 35
Şekil 4.8 Farklı Porozite Değerlerinin Alev Boyuna Etkisi 37
Şekil 4.9 Farklı porozite değerlerinin CH_4 mol kesri üzerine etkisi (eksenel yön) 37
Şekil 4.10 Farklı porozite değerlerinin CO mol kesri üzerine etkisi (eksenel yön) 38
Şekil 4.11 Farklı porozite değerlerinin sıcaklık üzerine etkisi (eksenel yön) 38
Şekil 4.12 Farklı porozite değerlerinin eksenel yönde hız üzerine etkisi 39
Şekil 4.13 Farklı porozite değerlerinin radyal yöndeki hız üzerine etkisi 40
Şekil 4.14 CH_4 mol kesrine farklı fırın ölçülerinin etkisi (eksenel yön) 41
Şekil 4.15 CO mol kesrine farklı fırın ölçülerinin etkisi (eksenel yön) 41
Şekil 4.16 Farklı fırın ölçülerinin sıcaklığa etkisi (eksenel yön) 42
Şekil 4.17 Farklı fırın ölçülerinin etkisi 42
Şekil 4.18 Farklı fırın ölçülerinin eksenel hız üzerine etkisi 43
Şekil 4.19 Farklı fırın ölçülerinin hız üzerine etkisi (radyal yönde) 43

Şekil 4.20 Fırın çapı 6 m ve 2 m olduğu durumda hız (radyal yönde) 44
Şekil 4.21 Farklı nozul ölçülerinin CH_4 mol kesrine etkisi (eksenel yönde) 44
Şekil 4.22 Farklı nozul ölçülerinin CO mol kesrine etkisi (eksenel yönde) 45
Şekil 4.23 Farklı nozul ölçülerinin sıcaklığa etkisi (eksenel yönde) 45
Şekil 4.24 Farklı nozul ölçülerinin radyal yönde sıcaklığa etkisi (eksenel yönde) 46
Şekil 4.25 Farklı nozul ölçülerinin radyal yönde CH_4 mol kesrine etkisi 46
Şekil 4.26 Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (eksenel yönde) 47
Şekil 4.27 Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (eksenel yönde) 48
Şekil 4.28 Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (radyal yönde) 48

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Yanmanın hava/yakıt karışımı ve akış türlerine göre sınıflandırılması [1] 10
Çizelge 3.1 Farklı hava fazlalık katsayılarına göre hesaplanan parametreler 29
Çizelge 3.2 Farklı nozul çapları göre hesaplanan parametreler 29
Çizelge 3.3 Farklı fırın çapları göre hesaplanan parametreler 29

ÖZET

PARALEL AKIŞLI DİKEY ŞAFT FIRINLARINDA YANMA OLAYININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SAYISAL MODELLEMESİ

Miray SARDOĞAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Artan endüstriyel faaliyetler ve her geçen gün artan nüfus, üretim ve tüketimi günden güne artırmaktadır. Bu üretim-tüketim döngüsünün her adımında enerji vazgeçilmez bir unsurdur. Enerji fiyatlarının giderek artması da bunun uygun bir şekilde ve daha verimli kullanımını gerektirmektedir. Önemli bir enerji kaynağı da kireçtaşıdır. Kireçtaşının yakılması sonucu elde edilen kireç, endüstride önemli ve geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sebeple kireç üretim teknolojisinde kullanılan fırınların optimizasyonu ve iyileştirilmesi hem ekonomi açısından hem de kireç kalitesi ve çevre kirliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu alanda ilerlemek, yeni fırınlar oluşturmak veya var olan fırınları geliştirmek gerekmektedir. Deneysel yöntemler, problemleri çözmek ve sayısal simülasyon sonuçlarını doğrulamak için son derece önemlidir. Ancak gerçek şaftlı kireç fırınlarında deney yapmak oldukça karmaşıktır. Bu sebeple ilk olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sayısal analizleri ile simülasyonlar gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada kireçtaşı yanması, dikey şaftlı kireç fırınında poroz ortam kullanılarak ve Star-CCM+ programı ile yanma olayı modellenerek sayısal analizi yapılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmada farklı porozite değerleri (φ=0,32, 0,6, 0,8), hava fazlalık katsayıları (λ=1, 1,3, 1,5, 2,0) ve farklı çaplarda fırın ve nozul geometrisi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda sıcaklık dağılımı, CH_4, CO ve hız değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kireçtaşı, Kireç fırını, HAD, Poroz Ortam, Star-CCM+

ABSTRACT

NUMERICAL MODELING OF COMBUSTION WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN PARALLEL FLOW VERTICAL SHAFT KILNS

Miray SARDOĞAN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Rising industrial activities and rising population have been increasing production and consumption day by day. Energy is an indispensable element in every step of this production-consumption cycle. Rising energy prices require an appropriate and more efficient use of it. An important source of energy is limestone. Lime obtained by burning of limestone has an important and wide usage area in industry. For this reason, the optimization and improvement of the kilns used in lime production technology is of great importance both for economy and for lime quality and environmental pollution. It is necessary to progress in this area, to create new kilns or to develop existing kilns. Experimental methods are extremely important to solve problems and validate numerical simulation results. However, it is very complicated to experiment in real shaft lime kilns. For this reason, firstly, simulations are performed by using numerical analysis for Computational Fluid Dynamics (CFD).

In this study, numerical analysis of limestone combustion modeled in vertical shaft lime kiln was made by using porous media within Star-CCM + program. For this purpose, different porosity parameters (φ = 0.32, 0.6, 0.8), air excess number (λ = 1, 1.3, 1.5, 2.0) and different diameters of the kiln and nozzle were analyzed. Temperature distribution, CH_4, CO and velocity values were compared.

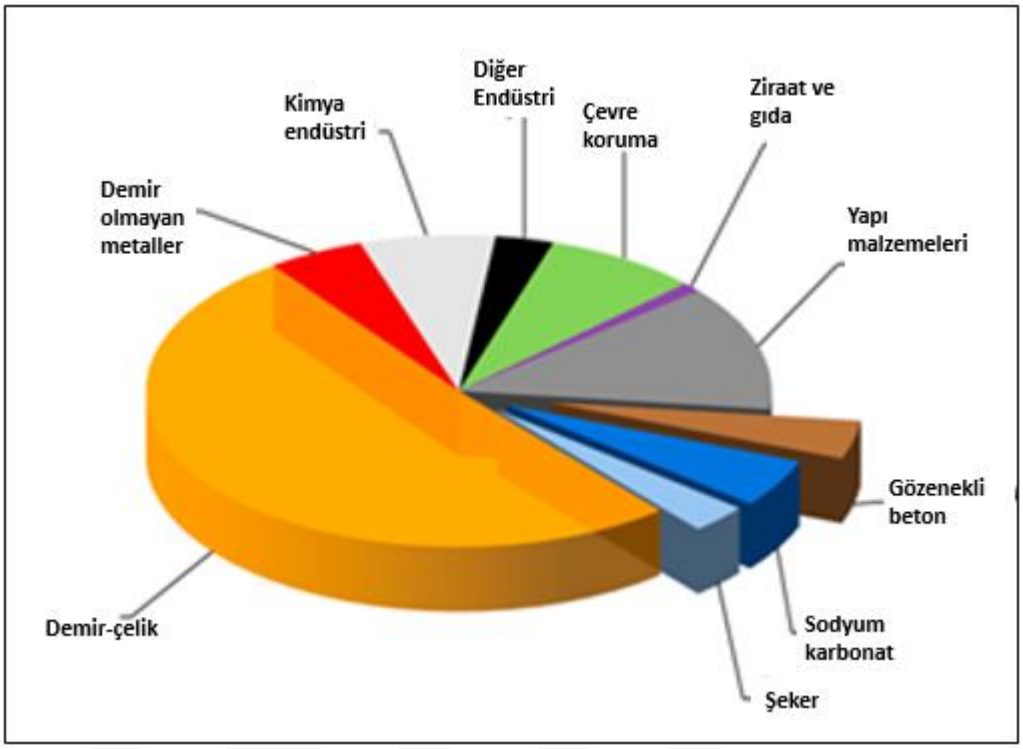
Keywords: Limestone, Lime kiln, CFD, Porous Media, Star-CCM +

BÖLÜM 1

GİRİŞ

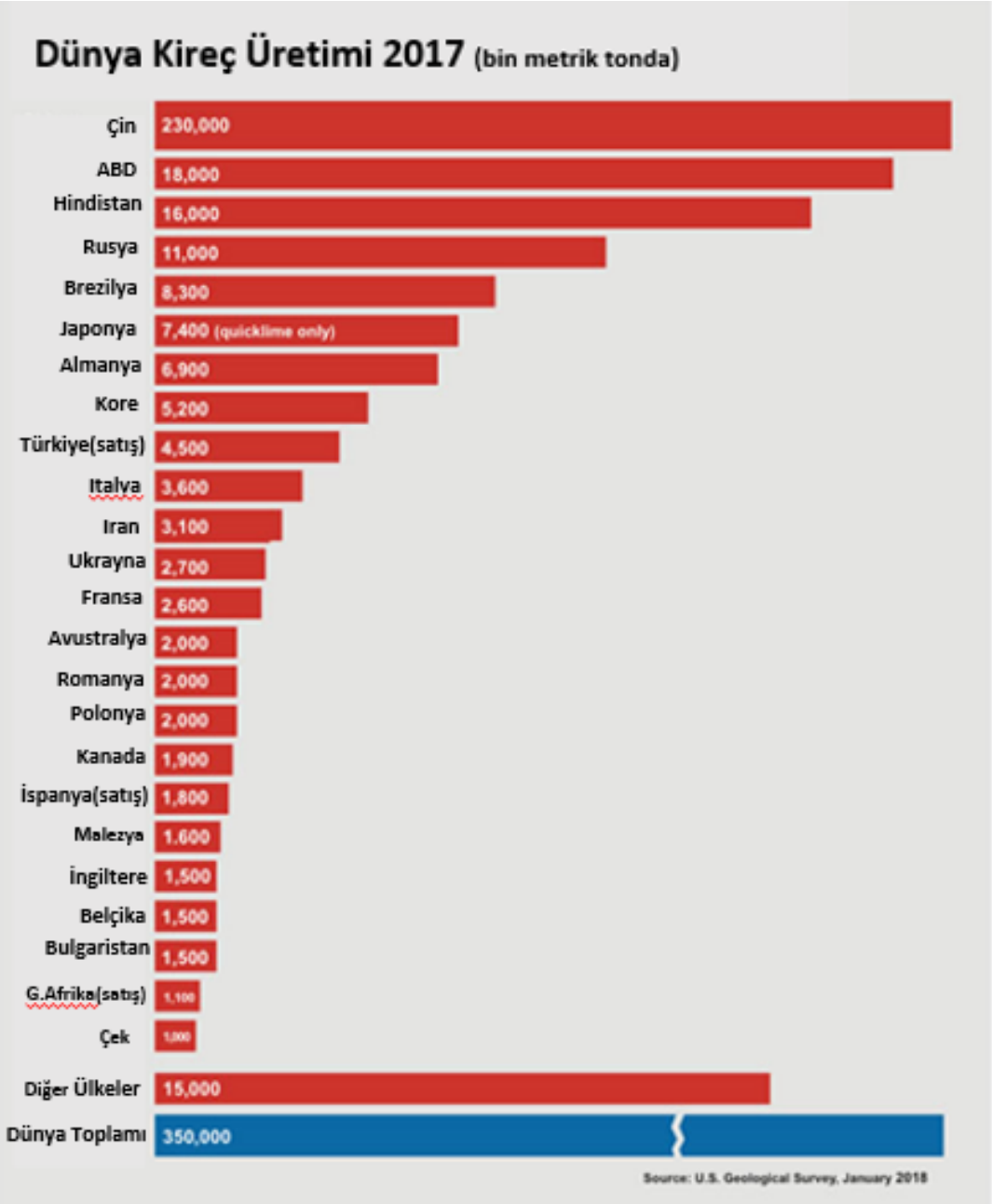
Yanma, insanlık tarihindeki çok eski bir teknolojidir ve bir milyon yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Dünya genelindeki enerjinin yaklaşık %90' ı yanmadan sağlanmaktadır (örneğin; ısıtmada, elektrik enerjisi üretiminde, trafikte, vs). Geçmişte, yanma konusu araştırmaları kimyasal reaksiyonla ısı salınımını da içeren akışkanlar mekaniği alanına yönlendirildilmişti. Bu ısı açığa çıkması olayı, temodinamik ile tanımlanmıştı. Yanma sırasında, fosil yakıtların çevre kirliliğine yol açan madde oluşturması, gelecekte de devam edecektir ve tartışılacak önde gelen konulardan biri olacaktır [1].

Önemli bir enerji kaynağı olan kireçtaşı yanması bu çalışmada incelenmiştir. Kireç %80 inşaatta, %10 kimya endüstrisinde, %10 da ziraatte kullanılıyordu. 1980'lerde ise, yapılarda %3, kimyasal endüstride %84, otoyollarda %6, refrakter endüstrisinde %6, ziraatte %1 oranında kullanılmaktaydı [2]. Son yıllardaki veriler incelendiğinde ise dünyada yıllık kireç üretimi yaklaşık 350 milyon tondur. Şekil 1.1' de dünyada kullanılan kirecin piyasa dilimleri gösterilmiştir.



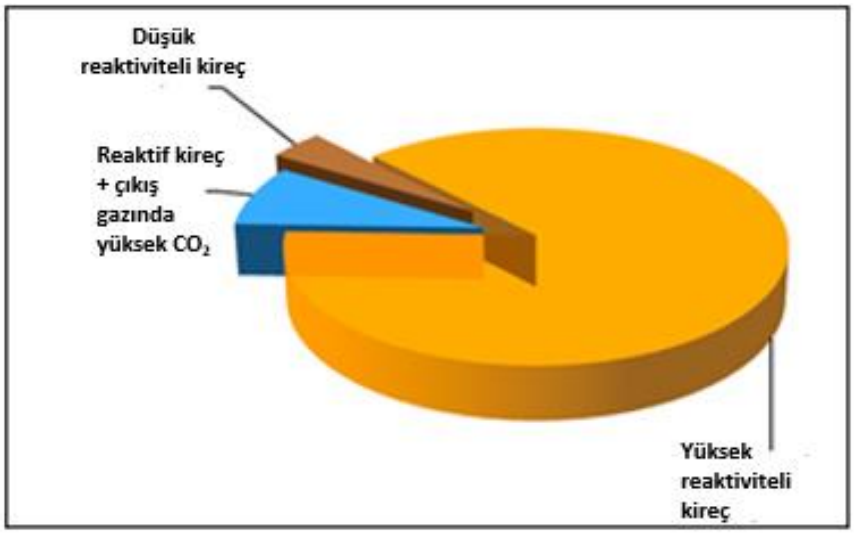
Şekil 1.1 Dünyada kirecin piyasa dilimlerine göre yıllık milyon ton bazında dağılımı [3]

Şekil 1.1' de dünyadaki ana pazar dilimlerine göre kireç kullanımı gösterilmiştir. Bu miktarlar ürün gereksinimlerinin yanısıra yeni fırın tasarımları için de temel oluşturmaktadır. Şekil 1.1' den de görüldüğü gibi demir ve çelik endüstrisinde toplam kireç üretiminin yaklaşık %50' si kullanılmaktadır. Bununla birlikte; kireç endüstrisi eski, tarihsel geçmişi olan bir endüstri olduğundan tüm çeşitlerdeki kireç fırınları kireç üretimi için kullanılmaktadır. Kireçtaşı kalsinasyonunda tartışılan konulardan biri de kalsinasyonun ne kadar ekolojik ve verimli olduğudur. Mevcut kireç fırınlarının çoğu ürün ve/veya emisyon gereksinimlerini karşılamamktadır. Genellikle eski fırın tiplerinin termal verimliliği de yeterince iyi değildir. Bu durumda kullanılan kalsinasyon fırını özellikleri de önemlidir. Bunlar endüstrinin hala daha modern kireç fırınlarına ihtiyaç duymasının önemli nedenleri arasındadır [3].



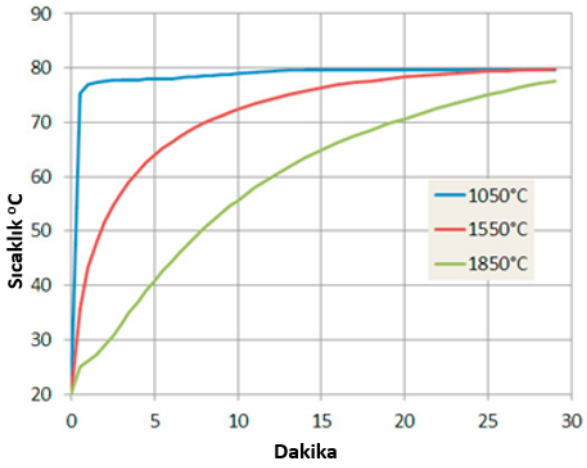
Şekil 1.2 2017 yılı dünya kireç üretimi [4]

Şekil 1.2' de 2017 yılı ülke bazlı dünya kireç üretim miktarları yer almaktadır. Dünya çapında en fazla üretim yapan Çin, ABD ve Hindistan olduğu şekilde görülmektedir.



Şekil 1.3 Yıllık dünya kireç üretimi ürün kategorisi (milyon ton) [3]

Şekil 1.3, üç ana ürün kategorisinde tahmini bir ayrım göstermektedir. Buna göre; %88'inin yüksek derecede kalsinasyona ve yüksek reaktiviteye ihtiyacı vardır. Daha düşük kalsinasyon derecesine sahip, sodyum karbonat ve şeker endüstrisinde %8 oranında üretilmektedir. %4' lük kısma ise yüksek derecede kalsinasyon ve düşük reaktivite ile inşaat endüstrisinde kumlu kireç tuğlası ve gözenekli beton üretiminde ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.4 Yanma sıcaklığına bağlı olarak sönmemiş kirecin (CaO) reaktivitesi [3]

Şekil 1.4' te yanma sıcaklığına bağlı olarak sönememiş kireç numunelerinin reaktivitesi gösterilmektedir. Şekil 1.4' e göre hedef sıcaklıkta yanma süresinin uzatılması, ürünün reaktivitesini daha da azaltmaktadır (ancak önemli ölçüde değil).

1.1 Literatür Özeti

Gutierrez ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda kireçtaşı ve kullanımının iyileştirlerek atık üretiminin azaltılması üzerine olan çalışmada kalsinasyon aşamasına odaklanılmıştır [5]. Diğer bir çalışmalarında ise dikey fırınlardaki kalsinasyon işlemi sırasında yakıt tüketimini etkileyen faktörleri belirlemek için enerji tüketimi ve ekserji analizleri yapmışlardır. Enerji tüketimi, ekserji ve kayıpların verileri kalsinasyon prosesi süresince iki şaft fırınından alınmıştır. İşlemlerde enerji verimliliği ekserji verimliliğinden daha yüksek çıkmıştır ve değerler sırasıyla %71,6 ve %40,8 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar aynı zamanda fırında meydana gelen geri dönüşümsüz süreçlerin; yakıtın yanmasından kaynaklanan ekserji tahribatı ve iç ısı-momentum aktarımından kaynaklanan ekserji yıkımında, her iki durumda da verim kaybının yaklaşık %40 olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca hem enerji hem ekserji verimliliği üzerindeki iyileştirmeler, fırının işletme parametrelerinin daha iyi bir şekilde kontrol edilmesiyle elde edilebilir. Bu parametreler; kireçtaşı oranı / yakıt beslemesi, yanma havasının fazlalığı, fırına verilen kireçtaşının boyut ve boyut dağılımı ve kirecin çıkış sıcaklığıdır [6].

Saotayanan ve Rasul (2007) tarafından yapılan çalışmada bir Magnesia tesisisnde dikey şaft fırınının termodinamik süreçlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile modellenmesi ve simülasyonu sunulmaktadır. Model olarak 2D steady-state model kullanılmıştır. Çalışmanın yapıldığı Magnesia tesisinde dikey şaft fırında gerçekleşen yanma parçacık-gaz dinamiği ve ısı transferi işlemleri 'Eulerian multiphase' modeli, 'Species Transport' ve sonlu hacim kimyasal reaksiyon modeli ile modellenmiştir. Fırın yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak gaz ve granüler yatak sıcaklıklarında simüle edilen sonuçlar tartışılmış ve tasarlanan verilerle karşılaştırılmıştır. Şaft fırınının içerisindeki tahmini gaz sıcaklık profilleri referans tesis tarafından sağlanan-tasarlanan verilerle iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır [7].

Bluhm-Drenhaus, T., et al.(2010) tarafından yapılan çalışmada, bir şaft fırında kireç taşının sönmemiş kirece kimyasal dönüşümüne bağlı ısı ve kütle transferi, gaz ve katı faz taşınımı ile birleştirilmiş sayısal şema aracılığıyla incelenmiştir. Gaz fazındaki kütle, momentum ve enerjinin üç boyutlu taşınması, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile

modellenirken, mekanik hareket ve katı malzemenin dönüşüm reaksiyonları için (DEM) simülasyon programı kullanılmıştır. Bu çalışmada modellenen kalsinasyon reaksiyonunun, gaz halindeki ürününün (CO_2) iç parçacık ısı iletiminin ve gözenek difüzyonunun eş zamanlı etkileridir.

Bu çalışmada, ayrıca yarı endüstriyel dikey şaft fırınının simülasyonu için dolgulu bölümdeki parçacık hareketi ve basınç düşüşünün hesaplanması üzerine çalışılmıştır. Ayrıca, kalsinasyon prosesi için Matlab kullanılarak çeşitli kodlar uyarlanmıştır.

Çalışmalar sonunda, tepkimeye giren kürelerin laboratuvar ortamındaki deneylerinin simülasyonu, ölçülen dönüşüm oranları ile iyi bir uyum göstermiştir. Basınç düşüşü hesaplamaları dahil idealleştirilmiş dikey şaft fırınının simülasyonları endüstriyel ölçekli sistemlerin modellenmesi için önerilen yaklaşımın uygunluğunu göstermiştir [8].

Krause ve ark. (2017) birbiriyle bağlantılı iki dikey ve pararlel akışlı kireç fırının zamana bağlı DEM-CFD analizlerini yapmışlardır. Sıcaklık dağılımları ve parçacık sıcaklık durumları incelenmiştir [9].

Senegačnik ve ark. (2007) kireç yakma işlemi için kullanılan eski anüler fırınlarla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Fırının uygun hava fazlalık katsayısı kullanımında yüksek sıcaklıklara çıkması durumunu farklı hava fazlalık katsayıları ile nasıl değiştirilebileceği ve enerji verimliliğini nasıl etkilediği sunulmuştur [10]. Diğer bir çalışmalarında ise (2007) sıcaklık profili ve fırın gazı bileşiminin deneysel ölçümleri tartışılmaktadır. Kalsinasyonun başladığı sıcaklık derecesi belirlenerek ısı transfer katsayısı ve fırındaki kalsinasyon dağılımı ile ilgili sonuçlara varılmıştır. Ayrıca kısmen kalsine olmuş bölgelerden de taş örenleri alınarak incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır [11].

Diğer bir anüler fırınlarla yapılan çalışmada ise Rong ve ark. (2017) zıt yönlü brülörlerin kullanıldığı bir fırında enerji ve ekserji analizlerini içeren bir çalışma yapmışlardır [12].

Ayrıca, kirecin yakılarak verimli bir şekilde elde edilmesiyle ilgili genel ve temel bilgilerin yer aldığı kitaptan da referans olarak yararlanılmıştır [13].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı farklı hava fazlalık katsayısı, farklı porozite(gözeneklilik), farklı fırın ve brülör (enjektör) çapının CH_4 ve CO mol kesri; radyal ve eksenel doğrultudaki sıcaklık ve hız dağılımına etkisini incelemektedir.

Bu amaçla, gözenekli ortam kullanılarak farklı verilerle HAD modellemesi ve simülasyonu uygulanmıştır. Analiz sonuçlarının kireç fırınında yanma sonundaki sıcaklık, yakıt ve gaz dağılımını belirlemeye yardımcı olacağı ve diğer çalışmlara yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

1.3 Hipotez

Kireçtaşının yakılması sırasında fırına verilen havanın hava fazlalık katsayısının, porozite ve fırın-nozul çapının değişmesiyle sıcaklık, hız, yakıt ve CO dağılımı da değişmektedir. Bu değişimin verim, kireç kalitesi ve termal verimliliği etkilediği düşünülerek nümerik analizler yapılmıştır. Böylece hem ekonomiye katkı sağlayarak hem de daha kaliteli ürün elde edilebileceği düşünülmektedir.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

Yanma, yakıt ve oksitleyicinin bu süreçteki temel bileşenlerin olduğu kimyasal bir prosestir. Reaksiyon sırasında yakıttaki kimyasal enerji açığa çıkmaktadır. Yakıttaki enerjinin büyük kısmı ısıya dönüşmekte ve kalan küçük miktardaki enerji ise elektromanyetik dalgalar (ışık), elektriksel ve mekanik (ses) şekilde etrafa yayılmaktadır. Ancak reaksiyon sonunda bunlar ihmal edilmektedir [14, 15].

Kimyasal reaksiyonlarda denklik, kütlenin korunumu prensibine dayalıdır. Kütle korunum prensbine göre; reaksiyon ürünlerinde her elementin toplam kütlesi, reaktantların toplam kütlesine eşit olmak zorundadır [16].

2.1 Yanmanın Termodinamiği

Maddelerin termodinamik özellikleri her bileşene tanımlanabilir, örneğin iç enerji *u,* entropi *s,* entalpi *h*, özgül ısı $c_{p,}$ gibi termodinamik özelliklerdir. Yanma sistemleri çeşitli gazlar içerir, bu sebeple karışımların termodinamik özellikleri, karışımdaki tüm gaz bileşenlerinin özelliklerinin birleşmesi sonucu elde edilmektedir. Termodinamiğin temel yasaları makineler ve motorlara dayalı olarak ortaya çıkmasına rağmen, bu kanunlar fizik, kimya, biyoloji gibi alanlarda da oldukça yaygın uygulamalara sahiptir [1, 14].

2.1.1 Yanma Stokiyometrisi

Teorik olarak, bir yanma prosesi yakıtın tam yanması için gerekli minimum hava miktarı ile yanıyor ise bu tür yanmalar stokiyometrik yanma olarak adlandırılmaktadır. Bu

karışım (yakıt ve hava) kesin miktarlar içermektedir ve yanma sonunda tümü, ürünleri oluşturacak şekilde harcanmaktadır. Bu tür yanmada hava fazlalık katsayısı λ=1' dir. Örnek olarak Eşitlik 2.1' de hidrokarbon yanması verilmiştir;

$$C_xH_y + (O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow xCO_2 + (y/2)H_2O + 3{,}76aN_2 \quad (2.1)$$

$$a = x + y/4 \quad (2.2)$$

Burada hava, %79 N_2 ve %21 O_2 içerdiği kabul edilmiştir. Düşük miktarlardaki helyum, neon, hidrojen, argon ve karbondioksit ihmal edilmiştir [14].

Gerçek yanmma prosesinde, stokiyometrik hava her zaman prosesin tamamlanması için yeterli değildir. Tam yanma şansını artırmak için teorik havadan daha fazla hava kullanmak yaygın bir uygulamadır. Bu hava, fazla hava olarak adlandırılmaktadır (λ>1).

Bunun tam tersi olarak, eğer yanma prosesindeki ürünler herhangi bir yanmamış bileşen veya yakıt içeriyor ise, bu proses eksik yanmadır. Bu prosesin sebebi yetersiz oksijen veya yetersiz karışmadır. Eksik yanmanın bir diğer nedeni ise yüksek ısıda meydana gelen ayrışmadır (λ<1) [17].

2.1.2 Alev Çeşitleri

Yakıt ve oksitleyici (genellikle hava) karıştırılır ve bu karışım yanmaya başladığında yanma prosesi de başlamış olur. Yakıt ve hava karışımı baz alınarak yakıt ve havanın karşımına göre yanma kategorileri tanımlanmıştır. Yakıt, yanma odasına girdikten sonra atmosfere açılana kadar hava ile temas etmeyip atmosfere açıldıktan sonra hava ile birleşip tutuşturuluyorsa buna ön karışımsız yanma denir. Ancak enjekte edilen yakıt, çıkışta atmosfere açılmadan önce hava ile birleşip karışıyorsa buna da ön karışımlı yanma denir.

Çizelge 2.1 Yanmanın hava/yakıt karışımı ve akış türlerine göre sınıflandırılması [1]

Yakıt/Yakıcı Madde Karışımı	Akış Hareketi	Örnek
Ön Karışımlı Yanma	Türbülanslı	Benzinli motorlar, Sabit gaz türbinleri
	Laminer	Düz alevli bekler, Bunsen alevi
Ön Karışımsız Yanma	Türbülanslı	Dizel motorlar, Pulverize(toz) kömür yanması
	Laminer	Odun yanması, Mum

- Laminer Ön-karışımlı Alev: Bu alev türünde, yakıt ve hava yanmadan önce karışır ve akış laminerdir.
- Türbülant Ön-karışımlı Alev: Bu alev, kıvılcım ateşlemeli motorlarda görülür. Örneğin; Otto motorunda. Akış türbülanslıdır.
- Laminer Ön-karşımsız Alevler: Yakıt ve hava yanma prosesi sırasında karıştırılır ve akış laminerdir.
- Türbülanslı Ön-karışımsız Alev: Ön karışımsız alev türbülanslı akış alanında yakılır.
- Hibrit Ön karışımlı – Ön karışımsız Laminer Alev: Su ıstma ve ev ısıtma sistemlerindeki alev türüdür.

Alev olarak adlandırılan ve yanmanın gerçekleştiği bölge, bir kaç bölgeden oluşmaktadır:

➢Karışımın yakıtça fazla zengin olduğu ve bu nedenle yanmanın gerçekleşmediği karışım bölgesi. Bu bölgedeki yakıt, yanabilirlik sınırına girebilecek şekilde yeterli hava ile buluşmamıştır. Alevin rengi koyu laciverttir.

➢ Karışımın yakıtça biraz fakirleşmesi sonucu yakıtın yanabilirlik sınırına girmesiyle yanmanın başladığı ve yakıtça zengin yanma bölgesi.

➢ Yakıt - hava karışımının yanma için ideal orana ulaşmasıyla meydana gelen stokiyometrik yanma bölgesi. Bu bölgedeki yanma tamdır. Bu yüzden alevin en sıcak ve en verimli bölgesidir. Alevin rengi parlak açık mavidir.

➢ Yakıt - hava karışımının yakıtça fakirleşmesiyle oluşan eksik yanma bölgesi. Karışımın etraftaki hava ile daha çok temas etmesi sonucunda karışım oksijence zenginleşmekte, yakıtça da fakirleşmektedir. Eksik yanma bölgeleri diğer bölgelerle karşılaştırıldığında oldukça fazla yer kaplamaktadır [1].

2.2 Kireçtaşı

Kireçtaşı doğal olarak meydana gelen bir mineraldir ve kalsiyum karbonat içermektedir. Yüksek kalsiyumlu kireçtaşları %97-99 oranında $CaCO_3$ içerirler. Çoğu kireçtaşı saftır ve çok çeşitli formda bulunabilmektedirler. Kaynağı, yapısı, kimyasal kompozisyonu ve jeolojik formlarına göre sınıflandırılırlar. Dünya çapında çoğu endüstride kullanılmaktadırlar [18].

Kireçtaşı kalsinasyonu, sönmemiş kireç (kireç) ve karbondioksitin termal bozunma sürecini ifade etmektedir [19]. Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), kireçtaşının ana bileşenidir, ayrıca kalsit olarak da bilinir. Bu yapı, bitki kalıntılarından ve okyanus dibindeki mercanlardan meydana gelmektedir. Mermer gibi çok sert bir maddeden tebeşir gibi yumuşak beyaz bir maddeye kadar çeşitli formlarda bulunmaktadır. Kireçtaşının hacimsel yoğunluğu 2,45-2,85 g/cm^3 arasındadır. Kireçtaşı porozitesi (gözenekliliği) %2 - %8 arasında değişmektedir. Saf kireçtaşının bazı termofiziksel özellikleri: Isıl iletkenlik katsayısı 2,72 W/mK, özgül ısısı 0,84 kJ/kgK, Molar entropi 93 J·mol−K, Genleşme katsayısı 0,00001-0,0000351^o C (100-150^o C) [20, 21, 22].

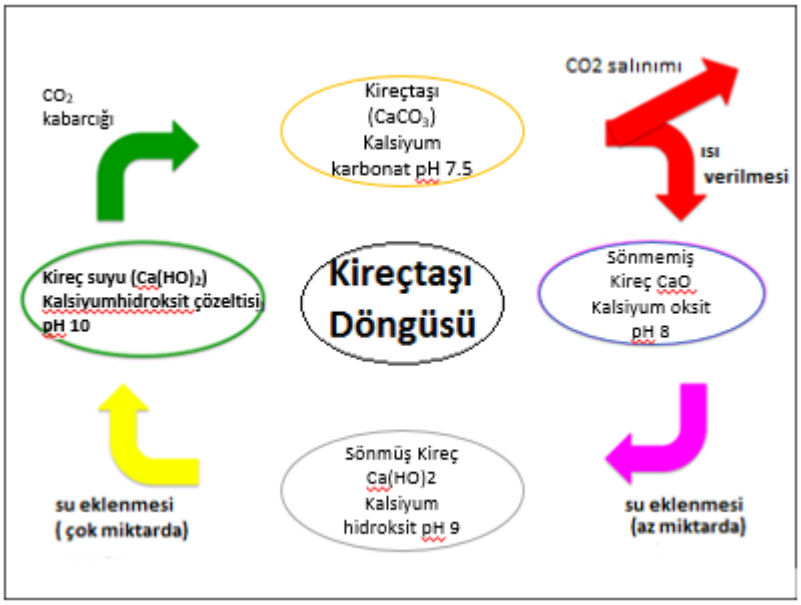
2.2.1 Kireçtaşı Döngüsü

Kireçtaşı, kalsiyum karbonatın ($CaCO_3$) yeraltından çıkarılması ile elde edilmektedir. Kireçtaşı, ilk olarak parçalanmış halde kireç üretimi için bir kireç fırınına gönderilir. Burada kirece dönüştürülür ve bu proses kalsinasyon olarak adlandırılır (Eşitlik 2.3).

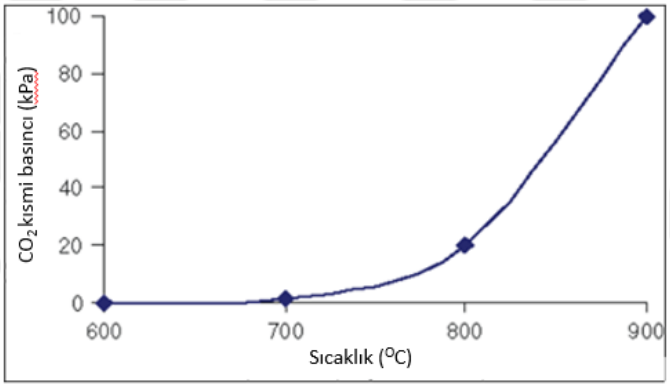
$$CaCO_3 + 3180\ KJ \rightarrow CaO + CO_2 \quad (2.3)$$

Termal dekompozisyonun tamamlanması için kireçtaşının, karbonatların bozunma sıcaklığına ısıtılmış olması gerekmektedir. Kireçtaşı kireç fırınında yakıldığı zaman veya kalsine edildiğinde, sönmemiş kireç (kalsiyum oksit-CaO) üretilmektedir. Sonrasında sönmemiş kireç, sulu kireç (kalsiyum hidroksit) üretmek için suyla reaksiyona sokulur ve sonucunda sönmüş kireç-kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) oluşmaktadır. Sönmemiş kireç, $CaCO_3$ ile karşılaştırıldığında daha yüksek kalsiyum karbonat eşdeğer yüzdesine; sulu kireçle karşılaştırıldığında ise biraz daha yüksek bir değere sahiptir. Bu sürdürülebilir döngü kireç-döngüsü olarak adlandırılır [23]. Kirecin endüstride, tarımda ve diğer farklı bir çok sektördeki gittikçe artan kullanım alanı, kullanım yerlerine yakınlığı, kireç üretim yerlerinin yaygın oluşu, üretim teknolojisnin geliştirilmesine ve bu sayede fiyatının diğer kimyasallara oranla daha ucuz olmasına neden olmuştur [24]. Şekil 2.1' de kireçtaşı döngüsü şeması gösterilmiştir.

Kalsinasyon sıcaklığı, karbondioksit gazının kısmi basıncına bağlı olarak değişir. $CaCO_3$, %100 CO_2 atmosferinde ve 760 mmHg basıncında yaklaşık 900^oC' de bozunur. Bozunma her zaman dış kabuktan içeri doğru oluşur. Kireçtaşının boyutu arttıkça kalsinasyon sıcaklığının artırılması gerekmektedir. Dış kabuğun kalsinasyon sıcaklığı ile iç kısmın kalsinasyon sıcaklığı arasında 150 ile 350 ^oC fark oluşabilir. Pratikte kalsinasyon işlemi 1050 – 1200 ^oC arasında olmaktadır. Kiraçtaşının gerekli olan minimum sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmesinin sebebi kalsinasyon hızının sıcaklık ile doğru orantılı olarak artmasıdır. Ancak, bu durumda kalsinasyonda elde edilecek kirecin reaktivitesi azalacağından 1200 ^oC'den yüksek sıcaklıklar, özel durumlar dışında tercih edilememektedir [19, 25].



Şekil 2.1 Kireçtaşı döngüsü [26]



Şekil 2.2 Kalsitin sıcaklık ile ayrışma basıncının değişimi [19]

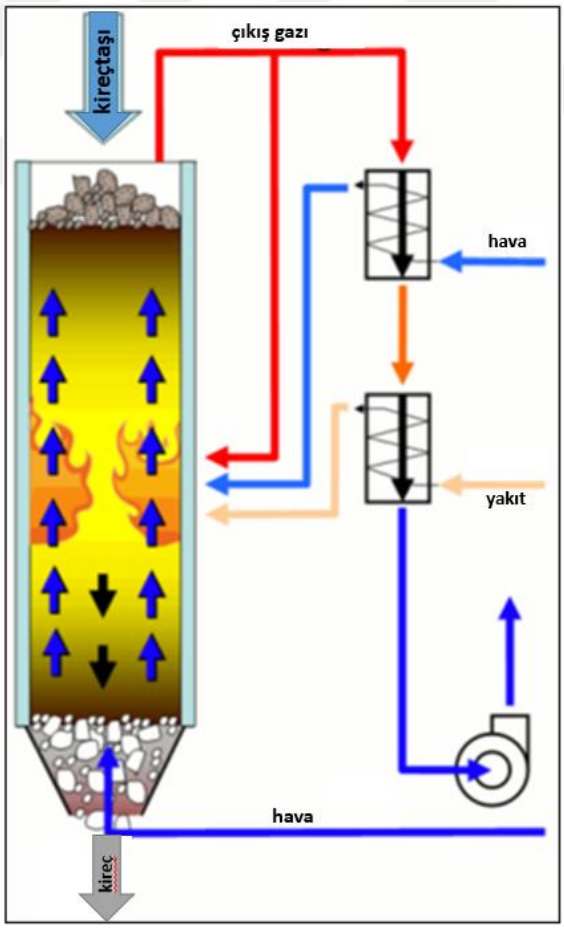
2.3 Kireç Fırınları

Kireç üretiminde ülkemizde ve Avrupa'da genellikle değişik tiplerdeki dik kireç fırınları kullanılmaktadır. Dik fırın tiplerinin bir kısmında sıcak gazlar ve kireç taşının akış yönleri zıt yönlüdür (ters akımlı fırın). Bu fırınların enerji tüketmi 950-1700 kcal/kg kireç civarındadır. Diğer dik fırın tipi parallel akımlı fırınlardır ve bunların en tanınmış olanı Maerz fırınlarıdır. Bu fırınlar birbirlerine bağlı iki veya üç fırın gövdesinden oluşabilir. Maerz fırınlarında yakıt bir fırına 13-15 dk süre ile verilir. Bu fırından çıkan sıcak gazlarla diğer fırındaki kireçtaşı ön ısıtmaya tabi tutulur. Maerz fırınlarının ısı verimi daha iyi olup yakıt tüketimi 850-950 kcal/kg kireç düzeyindedir.

Kireç üretiminde ayrıca modern döner fırınlar da kullanılmaktadır. Bunların çeşitli tipte önısıtma ekipmanları bulunmaktadır. Döner fırınlarda da dik fırınlarda olduğu gibi katı, sıvı veya gaz yakıtlar kullanılabilmekteir. ABD' de neredeyse kullanılan tüm kireç fırınları bu tiptedir. Döner fırınların yakıt üretim 1250-2000 kcal/kg civarında olup oldukça yüksektir ve toz tutma sistemleri büyük ve masraflıdır. Maerz ve döner fırınlarda yumuşak, pişmiş, yüksek reaktiviteli kireç üretilebilirken ters akımlı dikey fırın türleri ile yüksek reaktiviteli kireç üretimi zordur [25].

2.3.1 Dikey Şaflı Kireç Fırınları

Dikey fırınlar; ısıya dayanıklı ağır metal silindirle kaplı fırınlardır. Bu fırınlara kireçtaşı üstten yüklenir ve fırının altına doğru yavaşça inerek kalsine olur. Bu tür fırınların döner fırınlara göre ana avantajı; ortalama yakıt verimliliği daha yüksektir. Dikey fırınların dezavantajı ise kömür kullanıldığında kireç-üretim kalitesi ve üretim oranı düşer [27].



Şekil 2.3 Tek Şaftlı Dikey Fırın

2.3.2 Şaflı Kireç Fırınlarında Yaygın Problemler

Geçmiş yıllarda, optimal fırın tasarımına ulaşmak için şaftlı kireç fırınları geliştirilmiştir. Günümüzde, endüstriyel alanda gelişmiş bölgelerdeki enerji fiyatları yüksek rekabet koşulları ile artmaktadır. Bu alanda ilerlemek, yeni fırınlar oluşturmak veya var olan fırınları geliştirmek gerekmektedir. Yakıt uygulaması, fırın işletiminin iyileştirilmesi, kapasitenin artırılması, taş tane boyutunun artırılması, çevresel sorunlar ve artan kullanılabilirlik ve güvenlik durumları üzerinde iyileştirmeler yapılabilir. Bu nedenlerden dolayı, bu faktörlerden herhangi birinin eksikliği problemlere yol açmaktadır.

Kötü gaz dağılımı ve kalsinasyon bölgelerinin (hot spots) yüksek sıcaklığı dikey fırınlardaki ana problemdir. Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), kireç fırınında CO_2 atmosferine bağlı olarak yaklaşık 900 ^oC civarında bozunur.

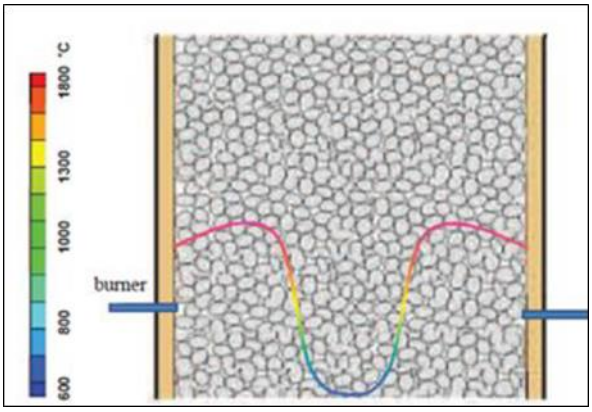
2.3.2.1 Yanmanın Gerçekleştiği Bölgelerdeki Yüksek Sıcaklık

Tam kalsinasyon için, kireç taşının belli bir süre boyunca bozunma (dekompozisyon) sıcaklığında yaklaşık 900-1000^oC' de tutulması gerekmektedir. Bozunma sıcaklığı, proseste bulunan CO_2' nin kısmi basıncına bağlıdır. Bir yakma işlemi atmosferinde (normal basınç ve %25 CO_2), kireçtaşının ayrışması 810 ^oC' de başlar. Kireçtaşının kalsinasyonunun tamamlanması için yaklaşık 900-1000^oC ayrışma sıcaklığına bırakılması gerekmektedir. Kalsinasyon bölgesi sıcaklığı 900 ila 1200 ^oC arasında olmalıdır.Böylece; ısı, kalsine edilmiş malzemeye iletimle ısı transferi yoluyla nüfuz edebilmektedir. Tam yakıt yanması sırasında gazların sıcaklıkları 1800 - 2000 ^oC'ye ulaşabilmektedir. Malzeme yüzeyinin sıcaklığı 1500-1600 ^oC'yi aşabilir. Bu dezavantaj, kireç aktivitesini azaltarak, ürünlerin uygulanmasını kısıtlayacak ve hatta termal NO_x oluşumuna neden olacaktır.

2.3.2.2 Gaz Dağılımının Düzensizliği

Bir diğer problem şaft fırınlarında eşit olmayan gaz dağılımıdır. Normal şaft fırınlarında, yakıt bir fırın duvarına enjekte edildiğinde, paketlenmiş malzemenin yüksek aerodinamik direncinden ötürü, 1 metreden fazla nüfuz edememektedir. Bu, sıcak noktalar (hot spots) olarak adlandırılan yüksek sıcaklıklı bölgelerin oluşumuna yol açar;

bu da düşük ısıl verim, yeterli ve eşit olmayan ürün kalitesi ile sonuçlanır. Radyal sıcaklık dağılımı, Şekil 2.4' teki diyagramda gösterilmiştir [28, 29].



Şekil 2.4 Yanma Bölgesinde Radyal Sıcaklık Dağılımı

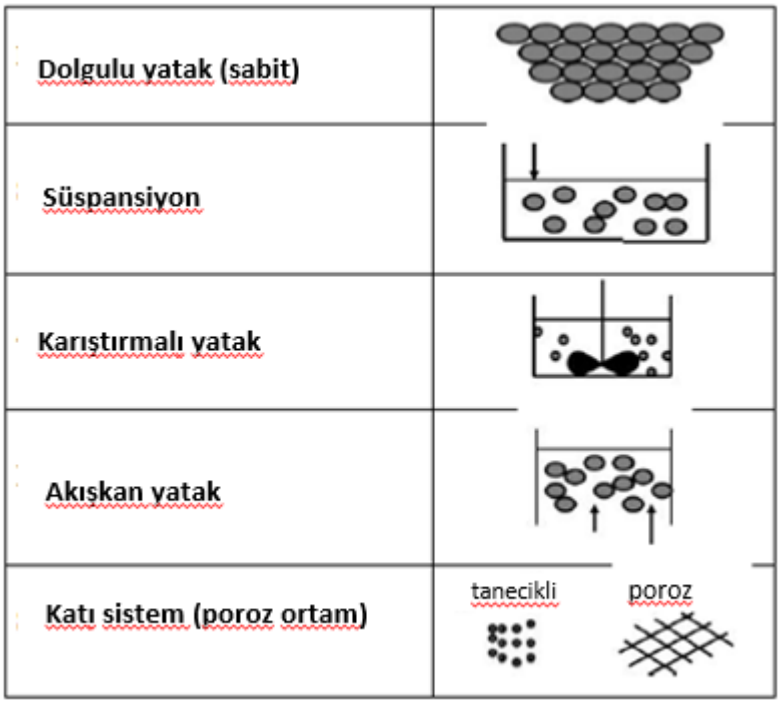
2.3.2.3 Şaft Kireç fırınlarının modellenmesindeki problemler

Deneysel yöntemler, problemleri çözmek ve sayısal simülasyon sonuçlarını doğrulamak için son derece önemlidir. Gerçek şaftlı kireç fırınlarında deney yapmak oldukça karmaşıktır. Çoğu durumda, büyük taşlar dikey yönde hareket ettiğinde ölçüm aletlerine zarar verirler. Ayrıca, şaftlı kireç fırınlarının modellemesi de kompleks olduğundan (ters akım modu, kimyasal reaksiyonlar, ısı ve kütle transferi, vb.) dolayı nispeten karmaşıktır. Şaftlı kireç fırın proseslerini karakterize etmek için çok sayıda matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modeller çoğunlukla gaz ve katı fazlar için enerji ve kütle korunumlarını tanımlayan tek boyutlu sayısal denklemlerdir. Ancak, bu modellerin hala birçok sınırlaması vardır. Örneğin; sıcaklık dağılımı ve gaz konsantrasyonları fırın boyunca radyal yönde tahmin edilememktedir. Sonuç olarak, şaft kireç fırınlarında fiziksel ve kimyasal süreçleri incelemek için CFD yaklaşımını uygulamak, fırınların işletilmesindeki etkili parametreleri araştırmak için gereklidir. Buna rağmen; CFD'yi kullanan modelleme fırınları, son derece karmaşık geometri ve proses tanımlamaları nedeniyle oldukça sınırlıdır [30].

2.4 Poroz Ortam Modeli

Gözenekli ortam; belirli bir katı kısım, katı matris ve bir veya daha fazla sıvı ile doldurulabilen boşluktan oluşur [31].

Parçacık Düzenlemesinde Katıların rolü: Katıların rolü çeşitli hammaddelerde (örneğin; kömür, mineraller, mısır, tahıllar ve meyvelerde), ürünlerde (örneğin; polimer granülleri, deterjanlar, şeker, tuz, gıdalar, farmasötikler ve gübreler) gözlenebilmektedir. Farklı şekillerde çeşitli parçacık sistemleri vardır.



Şekil 2.5 Partikül sistemleri

Porozite: Çeşitli porozite hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

Hacim bazlı porozite:

$$\varphi_V = \frac{V_{boşluk}}{V_{toplam}} = \frac{V_{toplam} - V_{katı}}{V_{toplam}} \quad (3.1)$$

Alan bazlı porozite:

$$\varphi_A = \frac{A_{boşluk}}{A_{toplam}} \quad (3.2)$$

Uzunluk bazlı porozite:

$$\varphi_L = \frac{L_{boşluk}}{L_{toplam}} \quad (3.3)$$

Yatak Gözenekliliğini Etkileyen Parametreler:

- paketlenme (dolgu) yöntemi (düzenli veya rastgele)
- parçacık şekli ve boyutu
- partikül boyutu dağılımı
- duvarların varlığı

Parçacık büyüklüğünün ve şeklinin etkisi: Parçacık şekli, yatak porozitesini (gözenekliliğini) etkilemektedir; büyük parçacıklarda bu etki çok fazla değildir, ancak küçük parçacıklarda ($d \leq 50$ μm), parçacıklar arasındaki itici kuvvetler nedeniyle daha gevşektir (gözeneklilik fazladır).

Çok fazlı bir sistemde boşluk alanı, birbirine karışmayan iki veya daha fazla madde ile doldurulur. Gözenekli ortamlarda akışkan akışı için matematiksel metodlar elde etmek amacıyla sistemdeki maddeler aralarında ayrı bir sınır oluştururlar. Ek olarak, bazı varsayımların yanı sıra sınırlamalar da gözenekli ortam geometrisinde yer almaktadır [32]:

(P1) Gözenekli ortamın boşluk alanları birbirine bağlıdır.

(P2) Boşluk alanı boyutları, büyük oranda sıvı moleküllerin ortalama serbest yol uzunluğundan oluşmalıdır.

(P3) Boş alan boyutları küçük olmalıdır, böylece akışkan akışı akışkan-akışkan arayüzünde (çok fazlı sistemlerde) Kohezif kuvvetler (cohesive forces) ve akışkan-katı arayüzlerdeki yapışkan kuvvetler (adhesive forces) tarafından kontrol edilir.

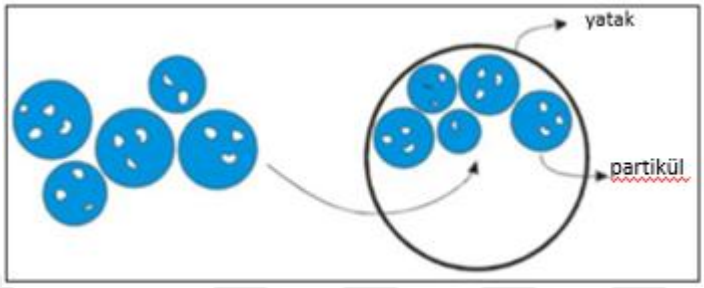
İlk varsayım (P1)'e göre, boş bir alanda herhangi bir akış gerçekleşemez. İkinci özellik (P2), hipotetik süreklilik özelliği sayesinde boşluktaki sıvı moleküllerin yer değiştirmesi sağlanmaktadır. Son olarak özellik (P3), bir boru ağı gibi durumları kapsamamaktadır. Örneğin; kumsaldaki kum, kumtaşı, çavdar ekmeği, odun ve insan akciğeri doğal gözenekli ortam olarak tanımlanır. 0.5 cm çaplı gözenekli küreler ve 1 cm'lik parçalanmış kireç taşı granüler gözenekli malzemeler olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, 10 cm çapında kireç taşı olan dolgulu yataktaki boşluğun boyutları normalden daha büyük olabilir.

Temel Porozite:

Partikül Porozitesi: φ_p=1 - (ρ_p / ρ_s)

Yatak Porozitesi: φ = 1 - (ρ_{bed}/ρ_p) } $\rho_{bed} = (1-\varphi) . (1- \varphi_p). \rho_s$ (3.2)

φ yatak porozitesi, φ_p partikül porozitesi, ρ_p partikül yoğunluğu (kg/m³ toplam), ρ_s katı yoğunluğu (kg/m³) ve ρ_{bed} yatak yoğunluğu (kg/toplam m³). φ ve φ_p kalite için değiştirilebilen değişkenlerdendir.



Şekil 2.6 Sabit yatakta poroz

Dolgulu yatağın gözenekliliğini değiştirmenin birkaç yolu vardır:

• Sabit yatak ya da yatak tipi

• Partikül şekli veya partikül şekli dağılımı

•Partikül boyutu dağılımı

• Partikül boyutu veya özel kuvvetler

• Duvarların ve sınırların varlığı

Dolgu yöntemi ve yatak tipi endüstride de önemlidir:

• Rastgele veya düzenli.

• Gevşek: Sedimantasyon, akışkanlığı azaltma.

• Yoğun olarak sıkıştırılmış [31, 33] şekilde endüstride rastlanabilmektedir.

2.4.1 Poroz (Gözenekli) Ortam Modeli Uygulamaları

Son yıllarda gözenekli ortam modeli, endüstride çeşitli mühendislik alanlarında ve dolgulu yataklarda akış dahil çeşitli problemlerin çözümü için doğal sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeli kullanacak olursak, gözenekli ortam modelinin uygulandığı bir hücre bölgesi tanımlanmalı ve akışta basınç kaybı; girdilerle, ortam ve

akışkan akışı arasındaki termal denge varsayımlarıyla belirlenmelidir. Araştırma alanında, gözenekli ortamdaki akışkan akışı, en çok tartışılan konudur ve ayrı bir çalışma alanı ortaya çıkarmıştır. Buna ek olarak, özellikle mühendislik sistemlerinin tasarımı için katı deformasyonunu içeren gözenekli ortamların genel davranışı için poromekanik adı verilen yeni bir dal vardır.

Geleneksel mühendislik uygulamalarında kullanılan gözenekli malzemelerin çoğu, çok küçük gözeneklere ve küçük geçirgenliğe sahiptir, bu nedenle sıvı hızı nispeten düşüktür. Bu malzemeler arasında, laminer akış ana rejimi açıklamaktadır. Akış hızı, yüksek bir seviyeye ulaştığında türbülanslı akış gözeneklerde meydana gelebilir. Dybbs ve Edwards, lazer anemometri ve akış görselleştirme tekniklerini kullanarak gözenekli ortamdan türbülanslı akış karakteristiklerini deneysel olarak elde etmişlerdir. Raporlarında, gözenekli ortamlarda meydana gelebilecek dört akış rejimi göstermişlerdir. Birinci akış türünde akış, viskoz kuvvetlerin egemen olduğu ve R_{ep}1 <1' de (ortalama parçacık boyutuna ve ortalama gözenek hızına bağlı olarak) gerçekleşen Darcy yasası veya taşınım olayı olarak adlandırılr. R_{ep} ~ 1' de, sınır tabakaları, gözeneklerin katı sınırları yakınında gelişmeye başlar. Ataletsel akış rejimi, sınır tabakaları daha belirgin hale geldiğinde ve bir "atalet çekirdeği" ortaya çıktığında, R_{ep} = 1-10' da olan ikinci akış türüdür. Sınır tabakalar dışındaki “çekirdek” akışının gelişmesi, basınç düşüşü ve akış hızı arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin sebebidir. Bu sabit doğrusal olmayan laminar akış rejimi R_{ep}~ 150 ye kadar devam etmektedir. Algılanan üçüncü akış rejimi, Reynolds sayıları 150 ila 300 arasında kararsız olan bir laminar akış alanıdır. Vorteksler R_{ep} ~ 250' de oluşur ve Rep ~ 300'e kadar devam eder.

Son olarak, Rep>300 olan ve türbülanslı akışa niteliksel olarak benzeyen oldukça kararsız ve kaotik bir akış rejimi, dördüncü akış rejimi olarak kategorize edilir [34].

BÖLÜM 3

SAYISAL MODELLEME

Kireç fırını dizaynında uygun bir tasarım elde edebilmek için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde, kullanılan programla ilgili temel bilgiler ve modelleme yer almaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli oluşturularak ve sayısal analizler yapılarak kireç fırınındaki yanma prosesinin fiziksel arka planını incelenmiştir. Bu modelleme sistemi (HAD), kireç fırınındaki prosesi tanımlayan kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerine göre hesaplama yapmaktadır. Geometrinin çizilmesi, modelleme ve simülasyonlar Star-CCM+ 10.04 programı kullanılarak elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında Star-CCM+ ile şu basamaklar takip edilmiştir:

Geometrinin Hazırlanması (3D-CAD) > Simülasyon Topolojisinin Tanımlanması > Meshin Oluşturulması > Modellerin Tanımlanması > Simülasyonun başlatılması > Sonuçların analiz edilmesi.

Star-CCM+, tek bir entegre pakette en kapsamlı mühendislik fiziği simülasyon programıdır. Bu yanma prosesi modellemesinde ve simülasyonunda 3D fırın geometrisi türbülans modelinin bu çalışma için uygun olduğu görülmüştür. Analiz için uygun model belirlendikten sonra, daha sonra verilecek olan çizelgelerdeki parametreler (Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1 Sayısal Modelleme Teorisi

Akışkan akışlarını temsil eden ana denklemler fiziğin korunum yasalarıdır. Akışkanın sürekli kabul edilir, bu da akışkanın özelliklerinin bir noktadan diğerine sürekli olarak

değiştiğini varsaymaktadır ve buna göre kütle korunumunun(süreklilik durumu), lineer momentum (Newton'un ikinci hareket kanunu) ve enerjinin (termodinamiğin birinci kanunu) yerine getirildiği belirtilir. Yanma ve sıkıştırılabilir akışlarla uğraşırken, lineer momentum yerine entalpi ifdesi kullanılır. Bunlar genellikle Navier-Stokes denklemleri ile gösterilmektedir. Eşitlik 3.1' de süreklilik ve momentum için Navier-Stokes denklemi gösterilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_V \rho\chi\right) dV + \oint_A \rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g)\cdot d\mathbf{a} = \int_V S_u\, dV \tag{3.1}$$

Eşitliğin sol tarafındaki terimler sonlu terim ve konvektif akıdır; sağ tarafta ise (*S*) basınç gradyanı terimi, viskoz akı ve kuvvet terimleri yer almaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho E\, dV + \oint_A \left[\rho H(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_g) + \boldsymbol{v}_g p\right]\cdot d\boldsymbol{a}$$

$$= -\oint_A \boldsymbol{q}''\cdot d\boldsymbol{a} + \oint_A \boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{v}\, d\boldsymbol{a} + \int_V \boldsymbol{f}.\boldsymbol{v}\, dV + \int_V s_u\, dV \tag{3.2}$$

Kuvvet vektörü f rotasyon, yerçekimi ve fan model kuvvetlerinin toplamını temsil etmektedir. Poroz ortam kuvvetleri bu eştlikte dahil değildir.

3.1.1 Yanmanın Sayısal Modellemesi

Reaksiyona giren akış sistemi, kimyasal olarak birbirleriyle reaksiyona giren çoklu-bileşen akışkan karışımını içeren sistemlerdir. Star-CCM+ programında model seçimi (Reaksiyon Modeli) ve alev tipi (Ön-karışımsız) tanımlandıktan sonra yanma modeli olarak Eddy-Break-Up (EBU) modeli tanımlanmıştır. Bu model ön karışımsız yanma ve kısmi ön-karışımlı yanma için uygun bir modeldir.

EBU yanma modeli, ortalama tür konsantrasyonları için tekli taşıma denklemlerini çözmektedir. Taşıma denklemlerinde kullanılan reasiyon hızı; ortalama bileşen konsantrasyonları, türbülans karakteristikleri ve sıcaklığın fonsiyonu (kullanılan spesifik

modele bağlı) olarak hesaplanır. Bu programda EBU modelinin için 4 farklı alt-model sunulmuştur (Standart EBU, Hibrid, Zaman ile Birleştirilmiş Model, Kinetik Model).

Bu çalışmada standart EBU yanma modeli kullanılmıştır. Bu modele göre, global reksiyondaki bireysel türlerin kendi ana denklemlerine göre farklı oranlarda taşındığı varsayılmaktadır. Bu denklemler *i* için anlık ana denklemlerden türetilmiştir ve şu eşitlikle ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\chi Y_i) + \nabla \cdot (\rho U Y_i - F_i) = S_i \tag{3.3}$$

3.1.2 Poroz Ortamın Sayısal Modellemesi

Akış direnç katsayılarını belirlemek için poroz ortama ilave koşullar ve değerler eklenir. Bu katsayılar, momentum denklemindeki poroz kaynak terimini hesaplamada kullanılmaktadır. Gözenekli bölgelere ayrıca kararsız akış hesaplamaları için gerekli olan ek girdi gözeneklilik değeri atanır. Gözeneklilik değeri, gözenekli ortam içindeki açık hacmin toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer; süreklilik, enerji ve bileşen denklemlerinin zamana göre türevinde kullanılır.

Poroz ortam modellemesinde akış alanının 'Poroz Alan' olarak seçilmesinden sonra Porozite parametrelerinin tanımlamasında Ergun eşitliği kullanılmıştır.

Ergun eşitliğini kullanarak izotropik direnç tanımlaması şu şekildedir: Gözenekli bir ortamdaki akışı tarif eden klasik denklemlerden biri olan Darcy yasası, akış hızını basınç gradyanı (bir geçirgenlik ölçüsüne dayandırılmış) ile ilişkilendirir. Bu yasa (3.4) kullanılarak ifade edilmektedir:

$$-\nabla p = \frac{\mu}{k_p} v \tag{3.4}$$

Akış hızı arttıkça, hız ve basınç gradyanı arasındaki ilişki doğrusal olmayan bir hal alır. Bu yüzden aşağıdaki (3.5) kullanılarak ikinci dereceden bir terim eklenmiştir;

$$-\nabla p = \frac{\mu}{k_p} v + \beta \rho v^2 \tag{3.5}$$

Bu eşitlik Forchheimer denklemi olarak bilinir. Buradaki beta faktörü (β) akışa ve ilgili ortama bağlı olarak ve genellikle deneysel yolla belirlenmektedir.

Belirli bir akış sınıfı için Forchheimer denklemine bir örnek Ergun denklemidir. Bu denklem, dolgulu yataktan akan bir akışkanın (*L*) basınç düşüşü (*dp*) için ampirik bir modeldir:

$$-\frac{dp}{L} = \frac{150\mu(1-\phi)^2 v}{\phi^3 D_p^2} + \frac{1.75\rho(1-\phi)v^2}{\phi^3 D_p} \tag{3.6}$$

Geçirgenlik ve beta faktörünün eşitlikleri (3.7) ve (3.8)' de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{k_p} = \frac{150(1+\phi)^2}{\phi^3 D_p^2} \tag{3.7}$$

$$\beta = \frac{1.75(1-\phi)}{\phi^3 D_p} \tag{3.8}$$

Bu modelin uygulamasında yukarıda belirtilen terimlerin her biri için kullanıcı tanımlı alan fonksiyonları oluşturulması gereklidir. Belirtilen eşitlikler kullanılarak Star-CCM+' da kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (Field Functions) yazılarak poroz ortam eşitlikleri tanımlanmıştır. Kullanıcı tanımlı alan fonksiyonları ile porozite ve ortalama parçacık çapı tanımlanmıştır. Bu değerler viskoz ve atalet terimlerinin alan fonksiyonlarında kullanılacaktır.

Yatak gözeneklilik oranı, kullanıcı tarafından tanımlanan skaler alan fonksiyonu ile bu çalışmadaki değeri boyutsuz olarak girilmiştir. Parçacık çapı ise 0,1' dir.

Ergun eşit liği viskoz terim alan fonksiyonu ise boyutlu olarak tanımlanmıştır;

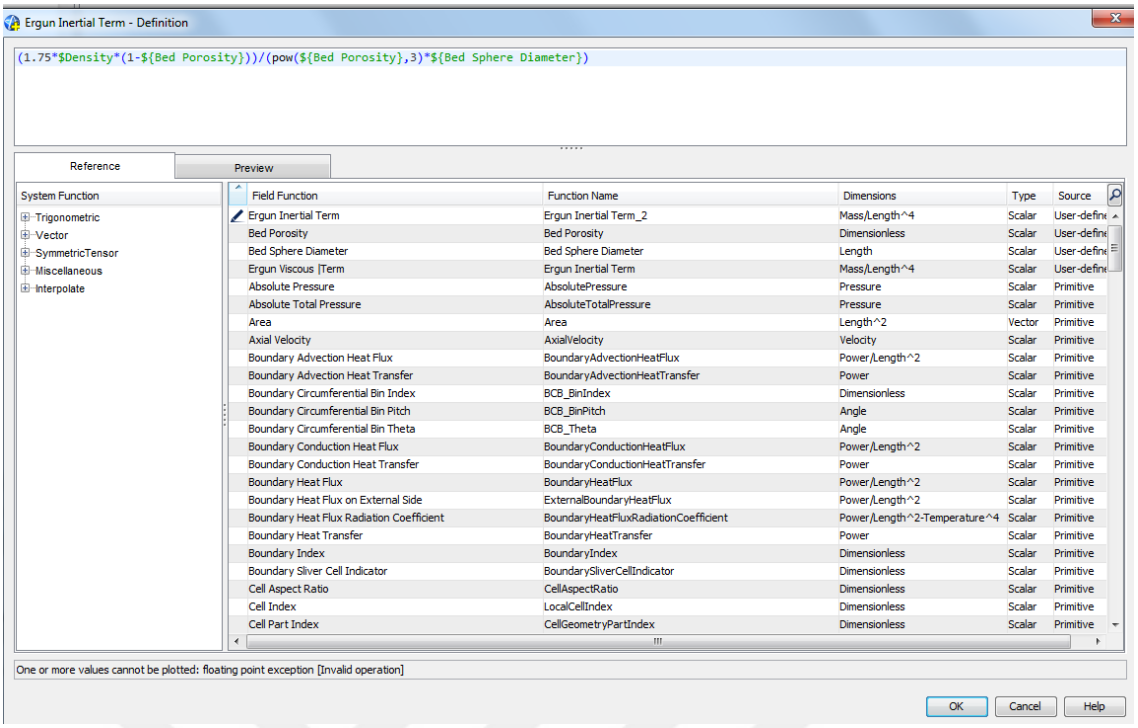
Kütle . Uzunluk^{-3} . Zaman^{-1}

```
150.0*$DynamicViscosity*pow((1-$BedPorosity),2) /
(pow($BedPorosity,3)*pow($BedSphereDiameter,2))
```

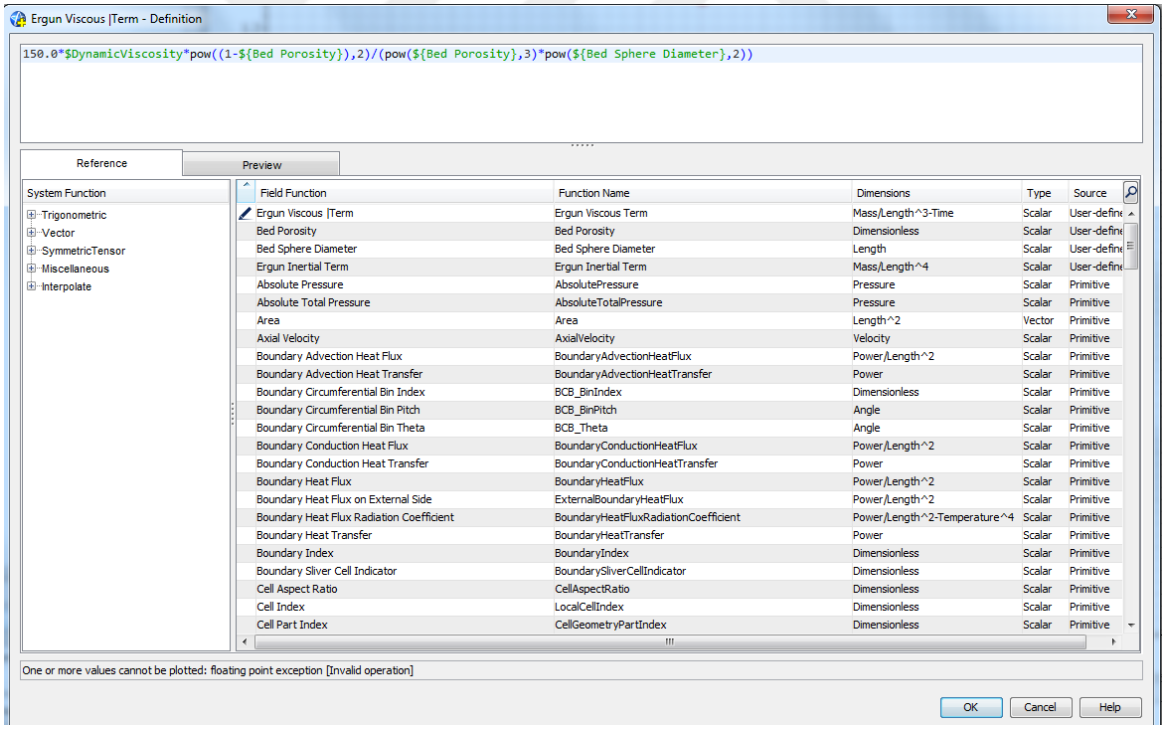
Ergun eşitliği atalet terimi alan fonksiyonu ise Kütle . Uzunluk^{-4} boyutları ile ve

```
(1.75*$Density*(1-$BedPorosity)) /
(pow($BedPorosity,3)*$BedSphereDiameter)
```

şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 3.1 Ergun Atalet Terimin Tanımlanması



Şekil 3.2 Ergun Viskoz Terimin Tanımlanması

Şekil 3.1 ve 3.2’ de Star-CCM+ programında, poroz alan için Ergun eşitliğinin, viskoz ve atalet terimleri kullanıcı tanımlı alan fonksiyonları, program arayüzü ekran görüntüleri

verilmiştir. Bu fonksiyonlardaki porozite oranı ve parçacık çapı daha önce belirtildiği şekilde tanımlanmıştır.

3.1.3 Standart K-epsilon (k-ε) Türbülans Modeli

Bu çalışmadaki türbülans modeli olarak, deneysel verilerden de elde edilen K-epsilon (k-ε) türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli, türbülanslı akış koşulları için ortalama akış karakteristiğini simüle etmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) 'nde kullanılan en yaygın modeldir. Standart K-epsilon modeli, türbülanslı kinetik enerji (k) ve enerji kaybı (ε) için taşıma denklemlerini içeren iki denklemli modelin standart bir versiyonudur [35].

3.2 Geometri ve Mesh

Bu çalışmasındaki kireç fırını modeli şekilde gösterilmektedir. Dikey fırın Star-CCM+’ da çizilmiştir. Fırın boyutu 10 m, çapı 2 m’ dir. Boyutlar gerçek fırın boyutlarına uygun olarak ölçülendirilmiştir. Bu geometri üzerinden fırın, enjektör (nozul) ölçüleri, porozite ve hava fazlalık katsayısı değiştirilerek sonuçları nasıl etkilediği incelenmek üzere analizler yapılmıştır.

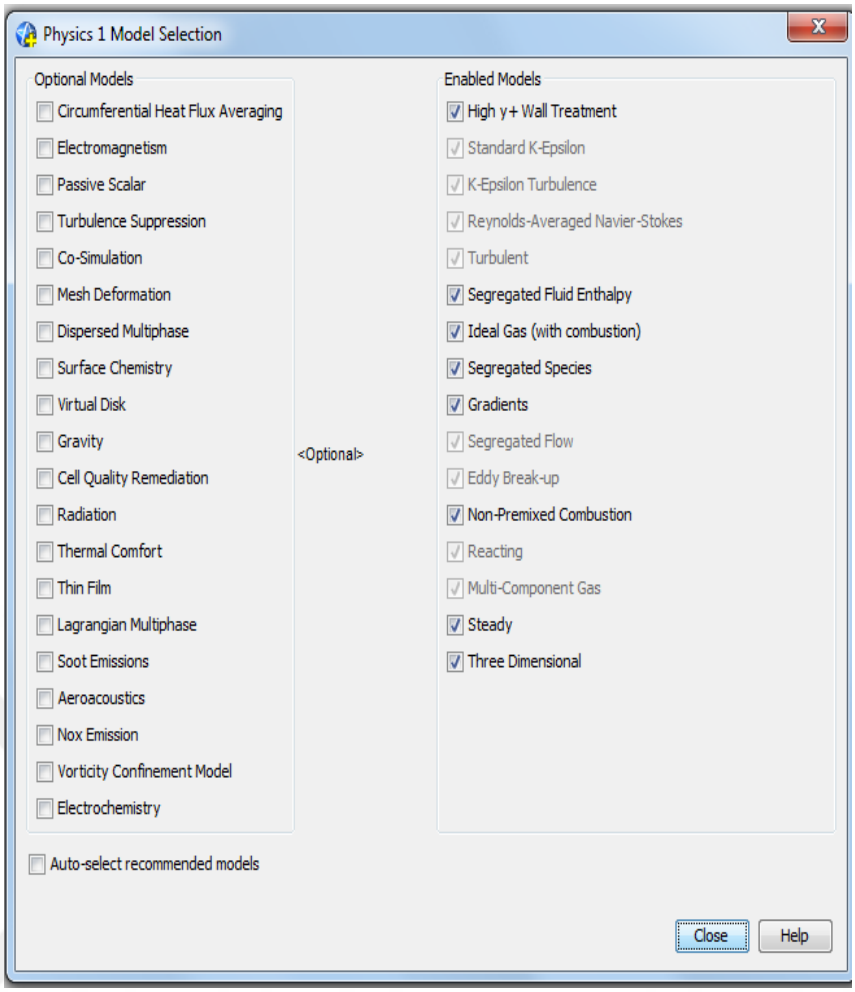


Şekil 3.3 Star-CCM+’ da çizilen kireç şaft fırını geometrisi

Sıvı akışını ve ısı transferini yöneten kısmi diferansiyel denklemler, analitik olarak çözümlemesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, akışkan akışını analiz etmek için akış alanları, daha küçük alt alanlara bölünür ve ayrılan denklemler, alanın bu bölümlerinin her birinin içinde çözülür. Mesh için; tetrahedral, yüzey mesh ve prism layer kullanılmıştır.

3.3 Model ayarları

Ön-karışımsız yanma ve Eddy Break-up modelleri başta olmak üzere Şekil 3.4’ te görüldüğü gibi çalışmaya uygun modeller seçilmiştir. Başta reaksiyon ve alev tipi olamk üzere, türbülans, steady-state, yer çekimi-gravity modelleri programda seçilmiştir.



Şekil 3.4 Kullanılan modellerin seçim aşaması

Sonrasında ise yanma eşitliği bileşenleri ve reaksiyon tanımlanmıştır.

Yakıt olarak CH_4 tanımlanmıştır. CH_4‘ ün stokiyometrik yanması;

$$CH_4 + 2(O_2 + 79/21\ N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2 \times 3{,}76\ N_2 \quad (3.9)$$

şeklindedir. Modellemede ise 2 basamaklı olarak tanımlanmıştır;

$$CH_4 + 3/2\ O_2 = CO + 2H_2O \quad (3.10)$$

$$CO + ½\ O_2 = CO_2 \quad (3.11)$$

3.4 Sınır Koşulları

Enjektör (nozul) ve fırın girişinde, hızlar ve hava-yakıt oranı belirlenmiştir. Hava ve yakıt girişleri ayrı ayrıdır, nozuldan sadece yakıt girişi olmakta ve yakıt enjeksiyon hızı Vj = 50m/s’ dir. Hava ve yakıt girişine sınır koşul olarak ‘velocity inlet’ tanımlanmıştır. Yakıt girişinde ise teorik hesaplamalar yapılarak hız belirlenmişir (Hava girişinde kütle kesri

O_2 ve N_2 oranları sırasıyla 0,23 ve 0,77' dir). Çıkış ise basınç çıkışı (Pressure Outlet) olarak tanımlanmıştır. Fırının yan yüzeyleri ise Duvar (Wall) olarak tanımlanmıştır.

Simülasyonlar Çizelge 3.1, 3.2, 3.3' te gösterilen değerler kullanılarak farklı hava fazlalık katsayısı (λ=1-2), farklı fırın – nozul çapı ve porozite (φ = 0,32 – 0,8) kullanılarak istenilen noktalardan ve doğrulardan sonuçlar alınmıştır ve karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1 Farklı orandaki hava fazlalık katsayılarına göre hesaplanan parametreler

	Fırın Çapı D(m)	Nozul Çapı d_L (m)	Yakıt Enjeksiyon Hızı V_j(m/s)	Ana Hava Hızı V_m(m/s)	Yakıt Hacim Oranı v_j (m^3/s)
λ=1	2 m	0,05 m	50	0,3	0,098
λ=1,3	2 m	0,05 m	50	0,38	0,098
λ=1,5	2 m	0,05 m	50	0,44	0,098
λ=2	2 m	0,05 m	50	0,6	0,098

Çizelge 3.2 Farklı nozul çapları göre hesaplanan parametreler

	Fırın Çapı D(m)	Nozul Çapı d_L (m)	Yakıt Enjeksiyon Hızı V_j(m/s)	Ana Hava Hızı V_m(m/s)	Yakıt Hacim Oranı v_j (m^3/s)
λ=1,3	2 m	0,03 m	139	0,38	0,098
λ=1,3	2 m	0,04 m	78	0,38	0,098
λ=1,3	2 m	0,05 m	50	0,38	0,098
λ=1,3	2 m	0,07 m	25	0,38	0,098

Çizelge 3.3 Farklı fırın çapları göre hesaplanan parametreler

	Fırın Çapı D(m)	Nozul Çapı d_L (m)	Yakıt Enjeksiyon Hızı V_j(m/s)	Ana Hava Hızı V_m(m/s)	Yakıt Hacim Oranı v_j (m^3/s)
λ=1,3	2 m	0,05 m	50	0,38	0,098

λ=1,3	6 m	0,05 m	50	0,042	0,098

Analizlerin yapıldığı ölçüler ve oranlarla ilgili değerler Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3' te verilmiştir. Çizelge 3.1' de farklı hava fazlalık katsayılarına (λ=1-2) göre teorik hesaplamalar yapılmış ve sınır koşullarında kullanılan parametreler çizelgede verilmiştir. Çizelge 3.2' de farklı nozul çapları için, Çizelge 3.3' te ise farklı ölçülerdeki fırın çapları için değerler verilmiştir. Bu çizgeldelerdeki değerlerle yapılan tüm analizlerde porozite değeri ise 0,32 olarak belirlenmiştir.

Ayrıca bu çizelgelere ek olarak farklı porozite değerleri kullanılarak (0,38, 0,6, 0,8, 1) hava fazlalık katsayısı λ=1,3, fırın çapı D=2 m, nozul çapı d=0,05 m kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Tüm analizlerde parçacık çapı 0,1 metre olarak tanımlanmıştır.

Analiz için uygun model belirlendikten sonra, Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3' te gösterilen parametreler ve farklı porozite oranları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Oluşturulan analiz planına göre yanma sonrası fırındaki sıcaklık dağılımı, CO ve yakıt miktarı başta olmak üzere farklı değerlerin belirlenmesiyle yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, daha önceki bölümde bahsedilen modeller tanımlanarak Star-CCM+ 10.04 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

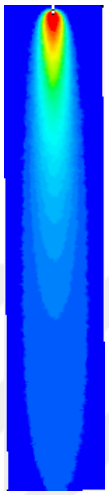
Uygun model belirlendikten sonra, belirlenen parametreler ile (Çizelge 3.1, 3.2, 3.3) analizler yapılmıştır. İstenilen nokta ve doğrulardan datalar alınmıştır ve fırındaki yanma alanı profil sonuçları elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Hava fazlalık katsayısının, fırın ve nozul çaplarının değişken parametre olarak kabul edilip hesaplamaların yapıldığı analizlerde porozite oranı φ=0,32, partikül çapı 0,1 metre kabul edilmiştir. Yakıt olarak tüm analizlerde CH_4 tanımlanmıştır.

4.1.1 Farklı Hava Fazlalık Katsayılarının Etkisi (λ = 1-2)

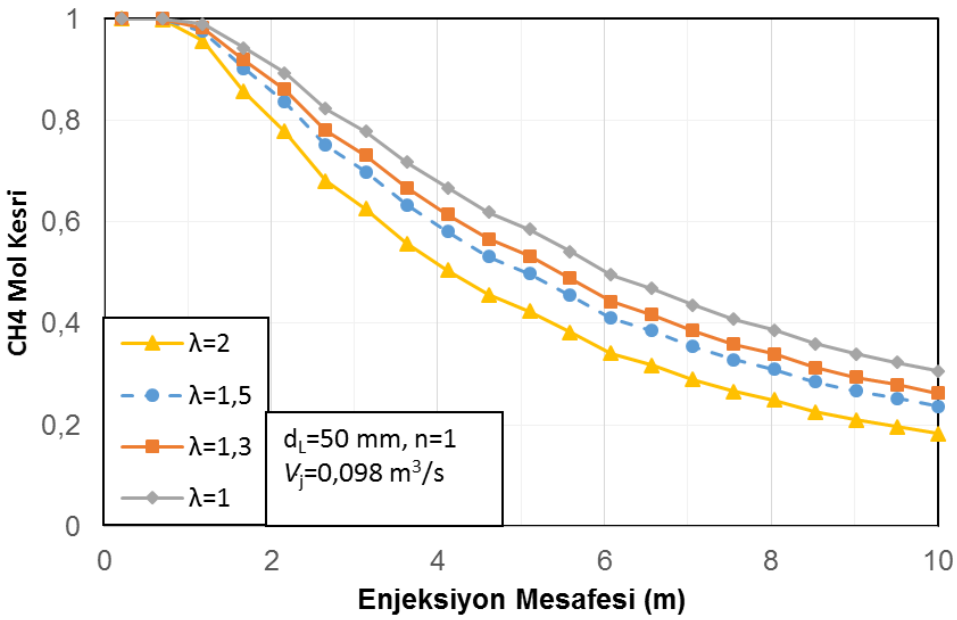
Bu bölümde; farklı hava fazlalık katsayı değerleri λ = 1, 1,3, 1,5, 2 kullanılarak sabit gözenekli ortamda (φ = 0,32) analizler gerçekleştirilmiştir. CH_4 ve CO' nun mol fraksiyon dağılımı, fırındaki sıcaklık ve hız dağılımı sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 aynı poroziteye sahip, dört farklı hava fazlalık katsayısı (λ = 1-2) değeri için CH_4, CO mol dağılımı ve sıcaklık dağılımı için eksenel kontürlerdeki sonuçları göstermektedir.

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	λ=1	λ=2
CH_4 Mol Kesri		

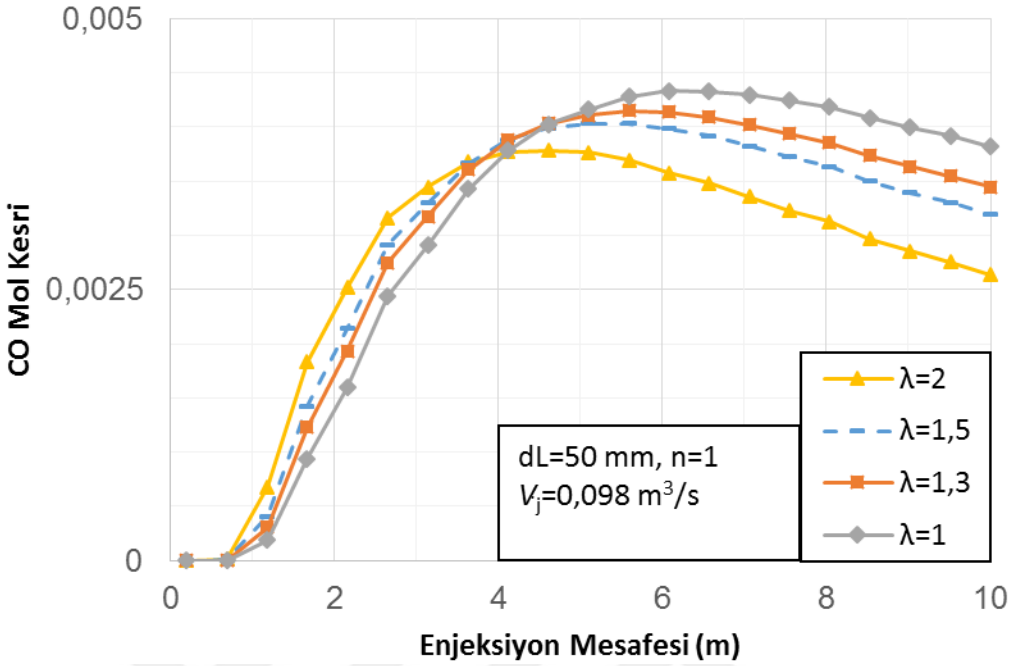
Şekil 4.1 Farklı hava fazlalık katsayılarının alev boyuna etkisi

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi λ artarken, alev boyu kısalmaktadır. Bunun sonucu olarak da λ=2 değerinde alev boyu en kısadır.



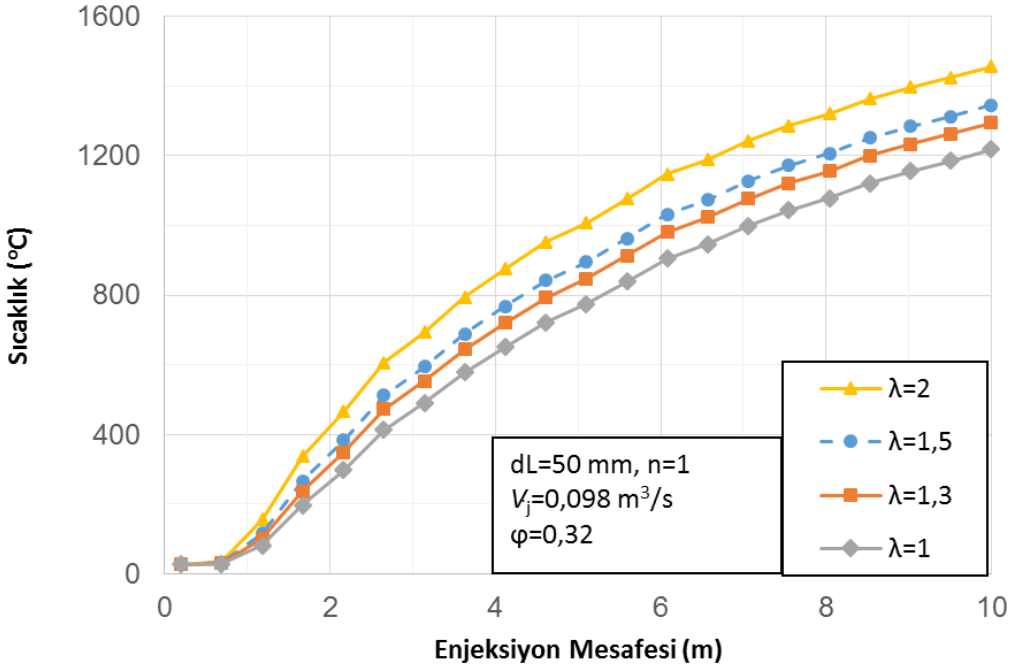
Şekil 4.2 Farklı hava fazlalık katsayılarının CH_4 mol kesrine etkisi (eksenel yönde)

Hava fazlalık katsayılarının λ=1 den λ=2' ye artmasıyla, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi alev boyunun azaldığı CH_4 mol kesrinden anlaşılmaktadır.



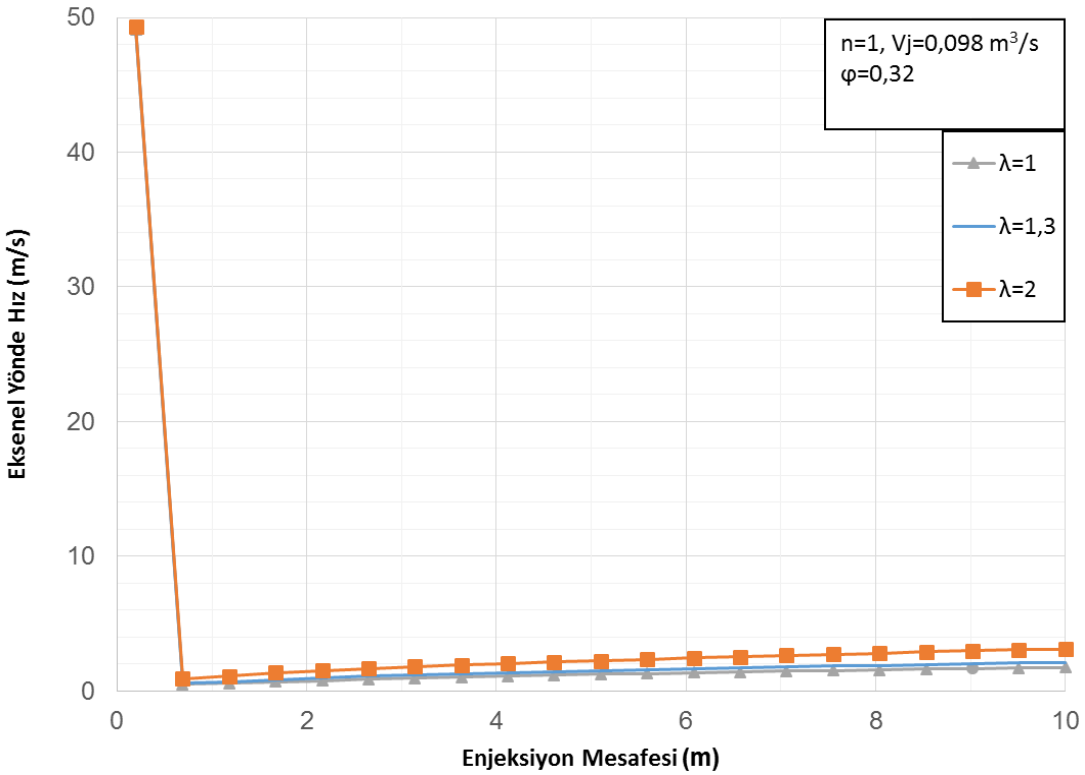
Şekil 4.3 Hava fazlalık katsayısının CO mol kesrine etkisi (eksenel yönde)

Şekil 4.4 de CO mol kesri hava fazlalık katsayısının artmasıyla azalmakta olduğu görülmektedir.

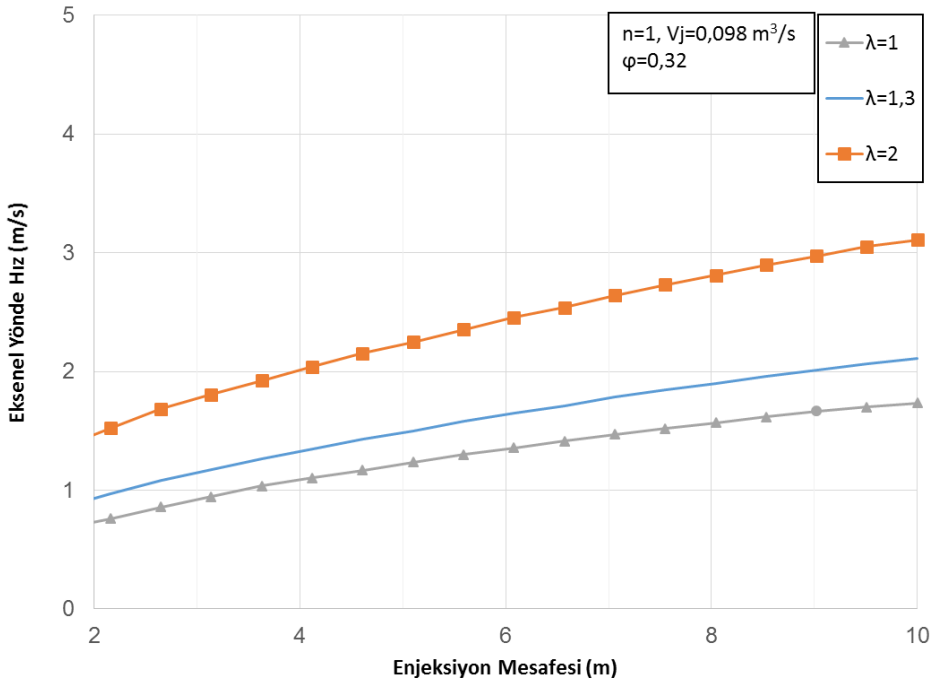


Şekil 4.4 Hava fazlalık katsayısının sıcaklık üzerine etkisi (eksenel yön)

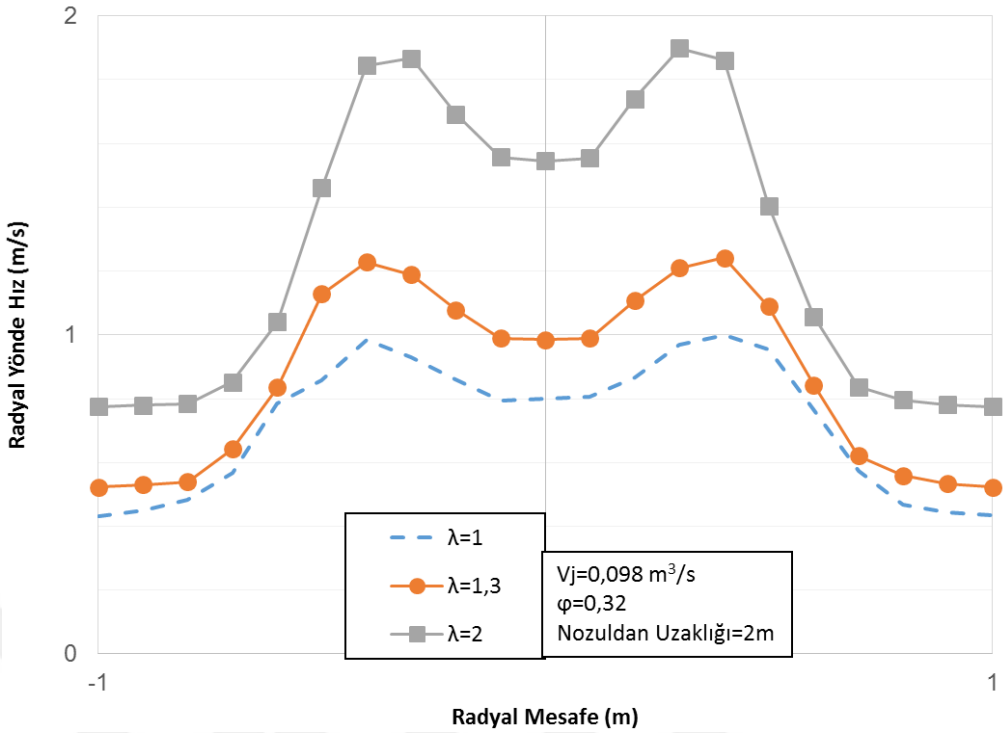
Şekil 4.4’ te hava fazlalık katsayısının sıcaklık dağılımı üzerine etkisi gösterilmiştir. Hava Fazlalık Katsayısı artarken buna parallel olarak sıcaklık da artmaktadır.



Şekil 4.5 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (eksenel yön)



Şekil 4.6 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (eksenel yön)

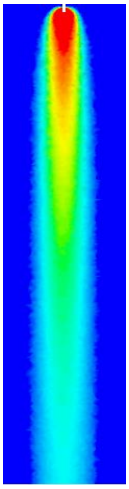
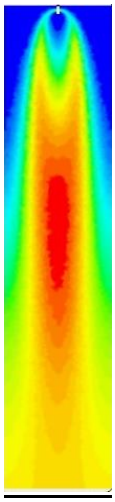
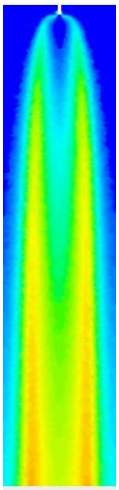
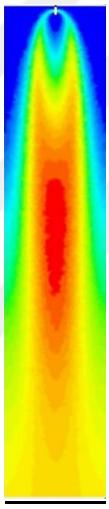
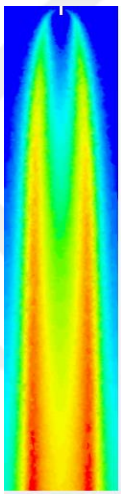
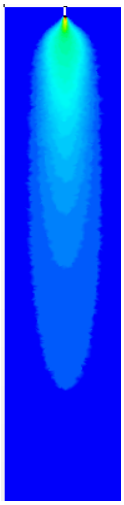
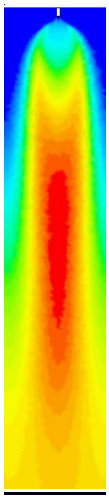
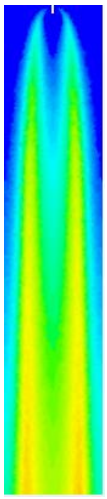


Şekil 4.7 Hava fazlalık katsayısının hız üzerine etkisi (radyal yön)

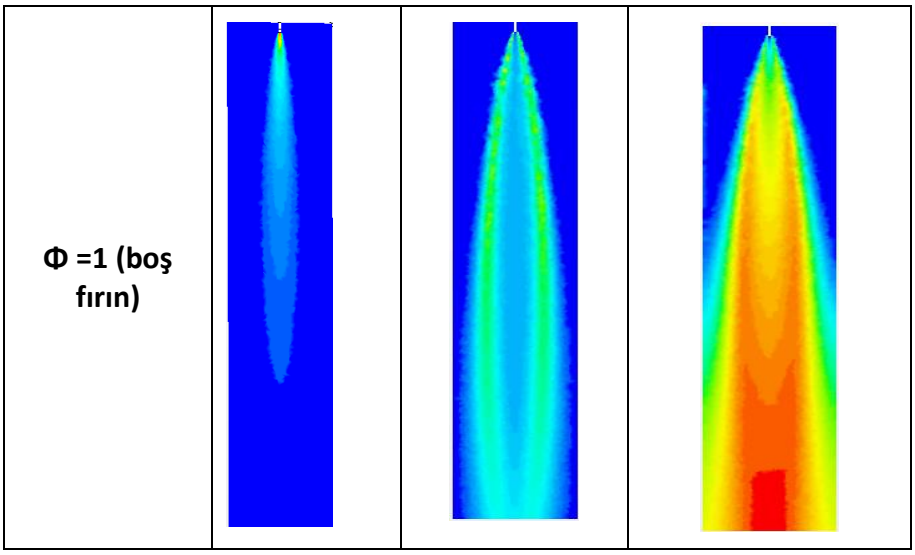
Şekil 4.5 4.6' da hızlar gösterilmiştir (eksenel yönde). Hız, hava fazlalık katsayısının artmasıyla eksenel yönde artmaktadır. Eksenel yönde (nozuldan 2 metre uzaklıktan başlayarak alınan sonuçlar) ise Şekil 4.6 da verilmiştir. Şekil 4.7' de ise hızın radyal yönde değişimi göstermektedir; hava fazlalık katsayısı artarken hızın da arttığı görülmektedir.

4.1.2 Farklı Porozite Değerlerinin Etkisi (φ=0,32-0,8)

Bu başlıkta diğer bir parameter olan porozitenin etkisi incelenmiştir. Porozite değerleri φ=0,32, 0,6, 0,8 ve boş fırın (φ=1) analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan CO ve CH_4 konsantrasyonu, sıcaklık ve hız incelenmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Porozite (Φ)	CH_4	CO	Sıcaklık
Φ=0,32			
Φ =0,6			
Φ =0,8			

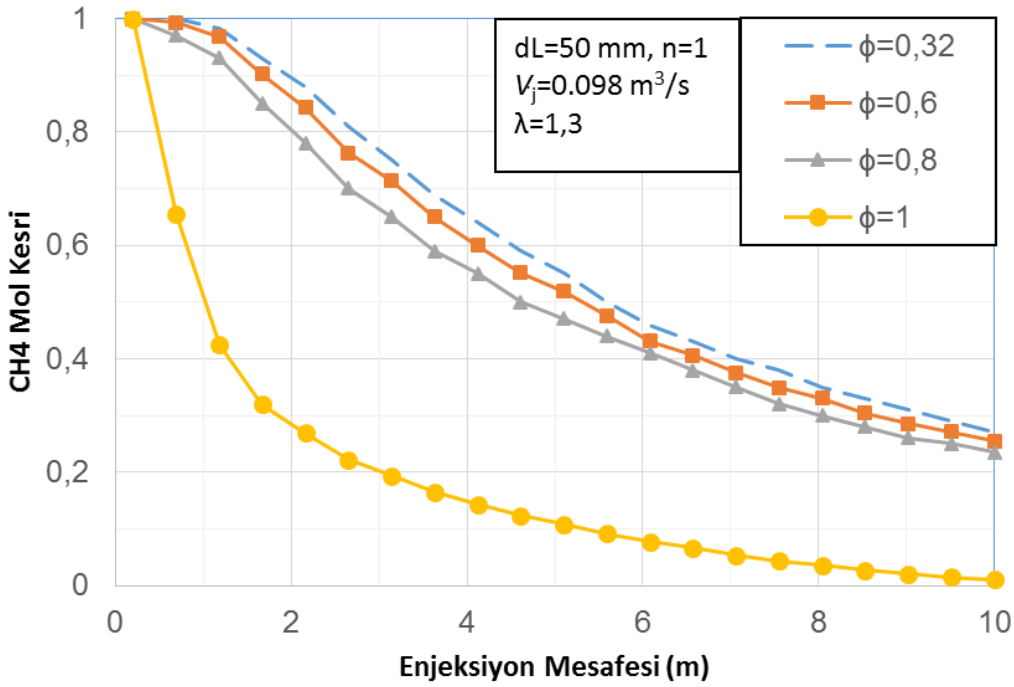
Şekil 4.8 Farklı Porozite Değerlerinin Alev Boyuna Etkisi



Şekil 4.8 Farklı Porozite Değerlerinin Alev Boyuna Etkisi (devamı)

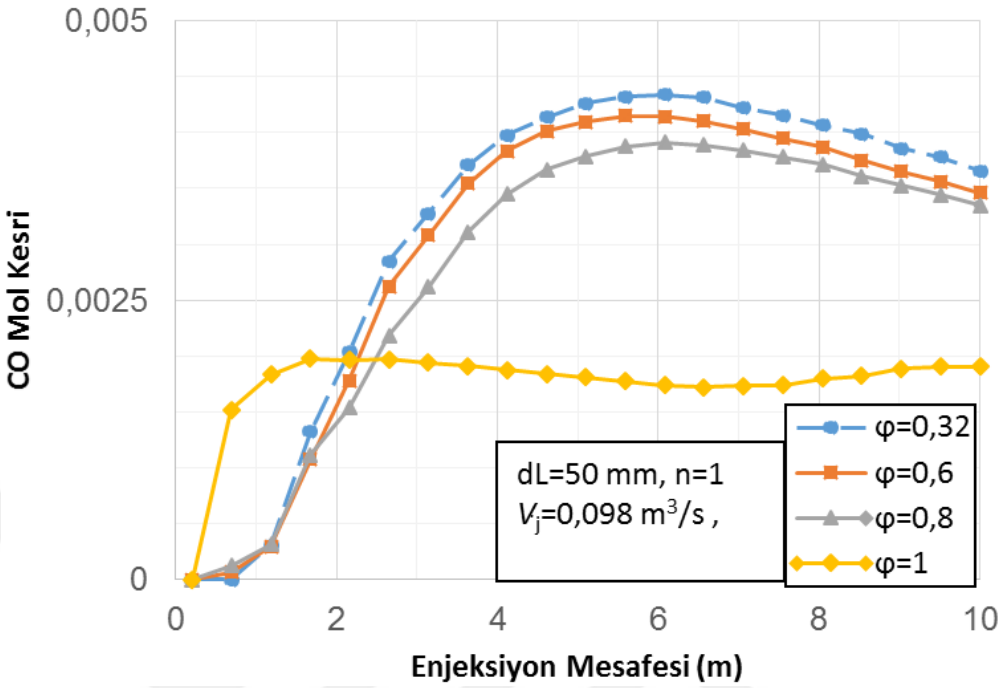
Şekil 4.8'de alev uzunluğu, CO ve sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır. Gözenekliliğin artmasıyla alev boyunun kısaldığı görülmektedir. Porozite değerinin 0,8 olduğu durumda yani boşluk oranının en çok olduğu oranda alev boyu diğer iki durumdan daha kısadır ve sıcaklık da diğer durumlardan daha yüksektir.

Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11' de aksiyal kontürlerde dört farklı porozite oranlarında CO ve CH_4' ün mol kesri dağılımı ve sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



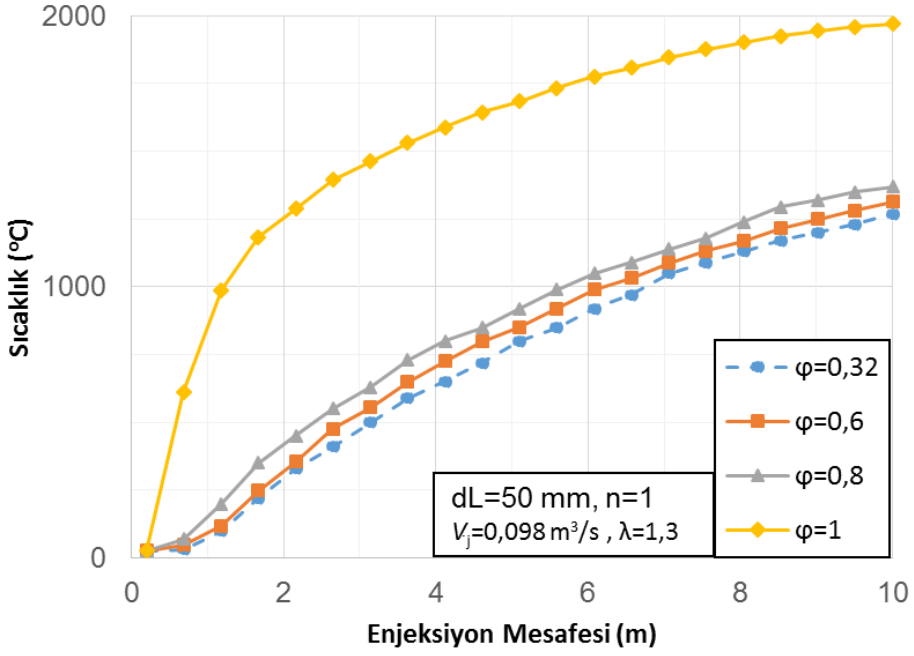
Şekil 4.9 farklı porozite değerlerinin CH_4 mol kesri üzerine etkisi (eksenel yön)

Şekil 4.9’ da CH4 mol kesri dağılımı yer almaktadır. Poroziteyle mol kesri değerinin arttığı şekilde görülmektedir. Buradan da alev boyunun kısaldığı sonucu çıkarılabilir.



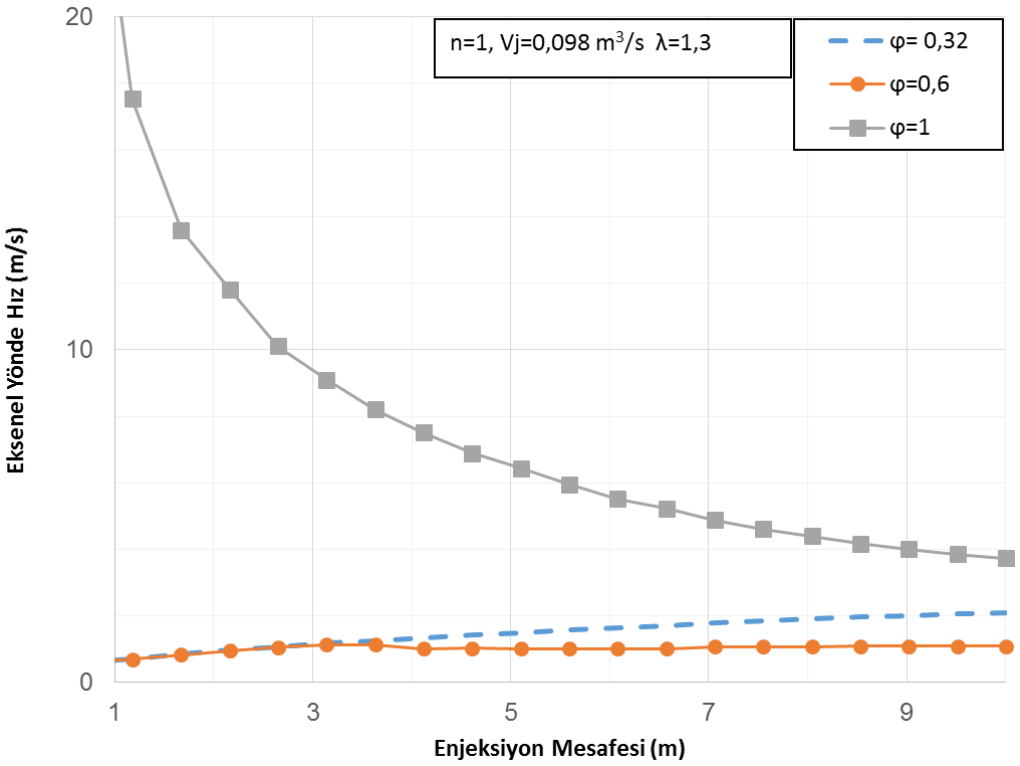
Şekil 4.10 Farklı porozite değerlerinin CO mol kesri üzerine etkisi (eksenel yön)

Porozite değerinin φ=0,32’ den 0,8’ e doğru artmasıyla, fırın içindeki CO konsantrasyonu azalmaktadır.



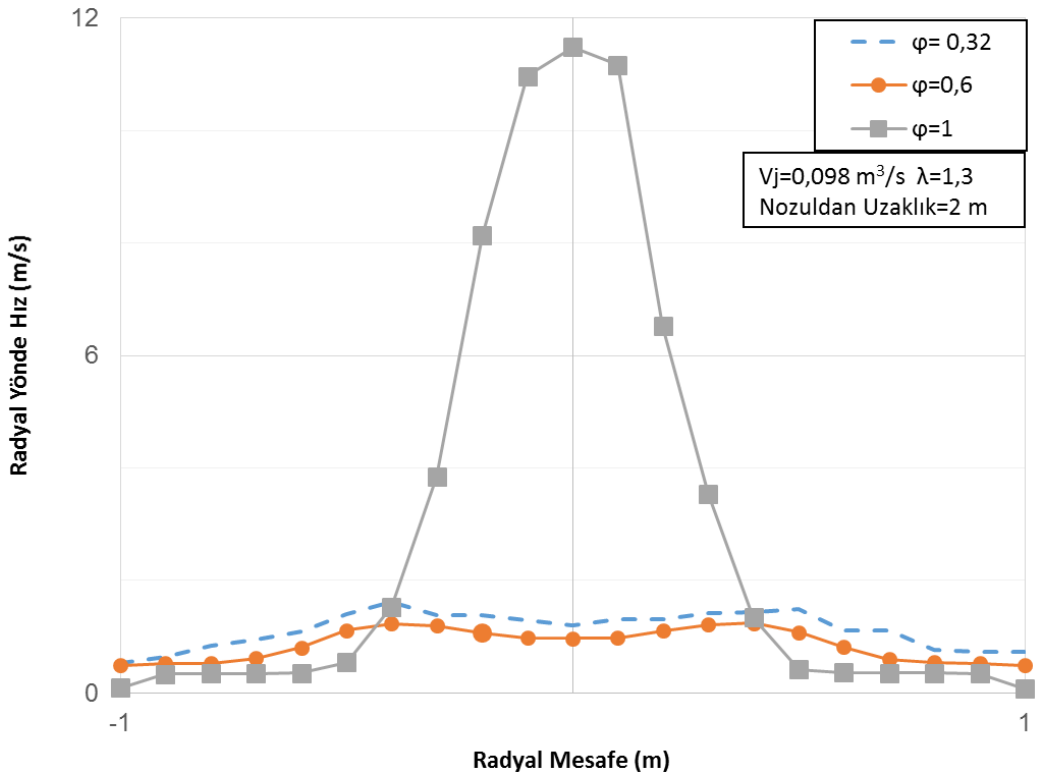
Şekil 4.11 Farklı porozite değerlerinin sıcaklık üzerine etkisi (eksenel yön)

Alınan analiz sonuçlarına göre Şekil 4.11’ de de görüldüğü gibi porozitenin artmasıyla, sıcaklık da artmaktadır.



Şekil 4.12 Farklı porozite değerlerinin eksenel yönde hız üzerine etkisi

Şekil 4.12’ de farklı porozitelerdeki eksenel hız gösterilmektedir.Gözeneklilik artışıyla, hızın azaldığı ve boş fırında ise en yüksek olduğu alınan sonuçladan elde edilen grafikte görülmektedir.

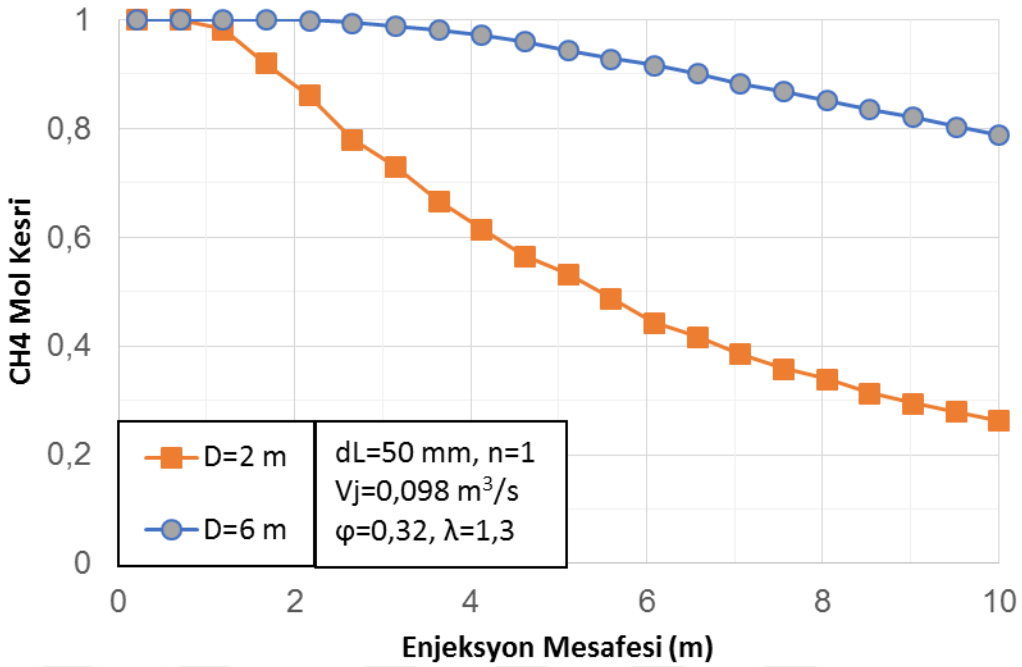


Şekil 4.13 Farklı porozite değerlerinin radyal yöndeki hız üzerine etkisi

Fırında radyal yöndeki hız sonuçlarında da boş olan fırın en yüksek hıza sahiptir.

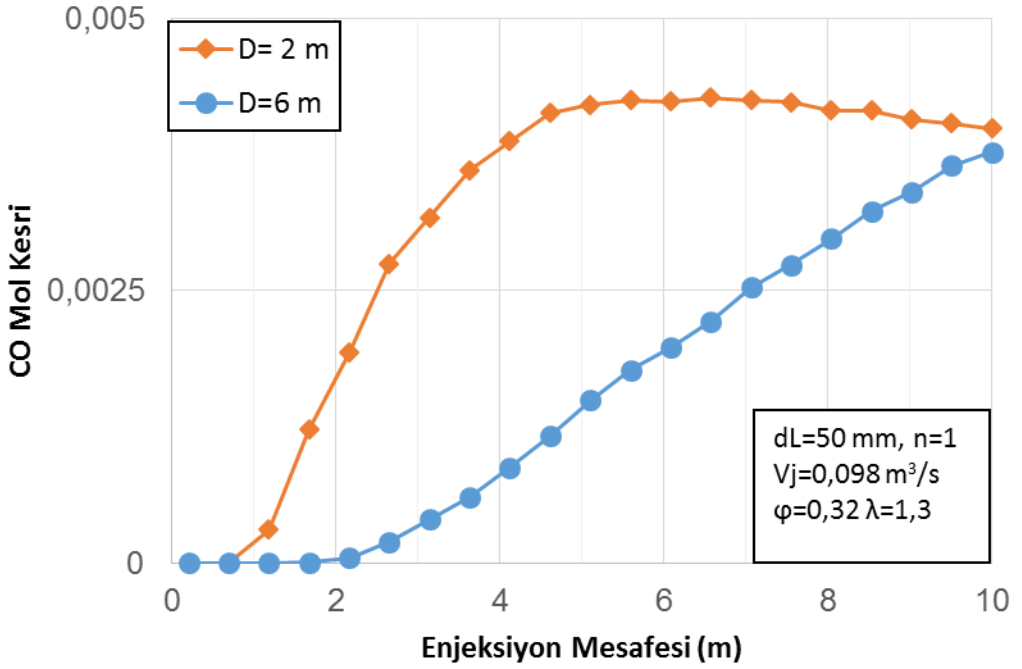
4.1.3 Farklı Fırın Ölçülerinin Etkisi (D=2-6 m)

Bu başlıkta şaft fırını boyutlarının etkisi incelenmek üzere fırının çapı genişletilmiştir. Diğer analizlerde fırın çapı 2 metredir. 10 metre ile yapılan analiz sonuçları, referans fırın ölçüleriyle karşılaştırılmıştır. CH_4, CO mol kesri ve sıcaklık sonuç değerleri karşılaştırılmıştır. Hava fazlalık katsayısı her iki ölçüde de λ=1,3 ve porozite φ=0,32' dir.



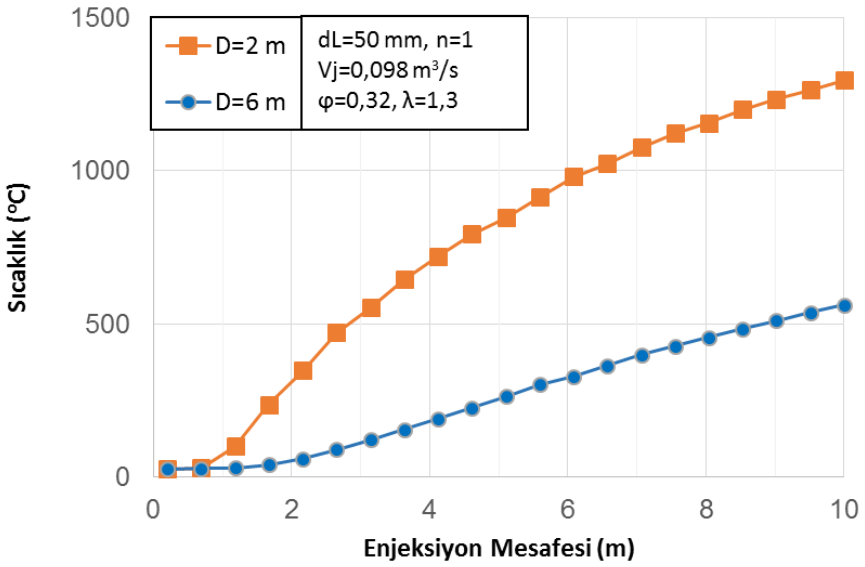
Şekil 4.14 CH_4 mol kesrine farklı fırın ölçülerinin etkisi (eksenel yön)

Fırın çapının 2 metreden 6 metreye çıkarılmasıyla CH_4 mol kesri de artmıştır.



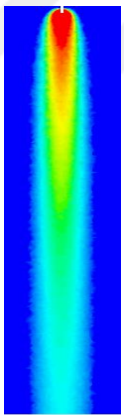
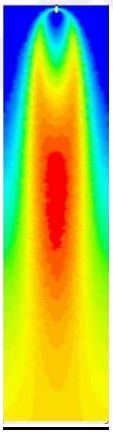
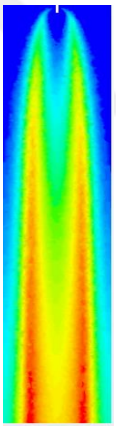
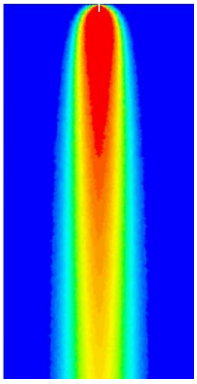
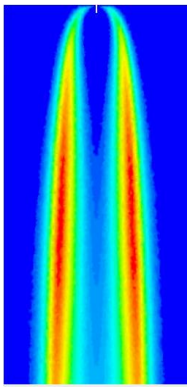
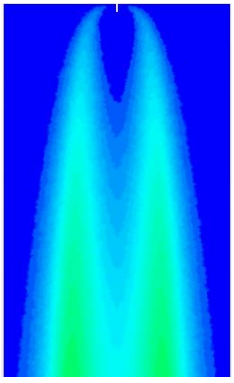
Şekil 4.15 CO mol kesrine farklı fırın ölçülerinin etkisi (eksenel yön)

Fırın çapının artmasıyla CO konsantrasyonu azalmakta, yanma sonunda her iki fırında da yaklaşık aynı değere ulaşmaktadır.



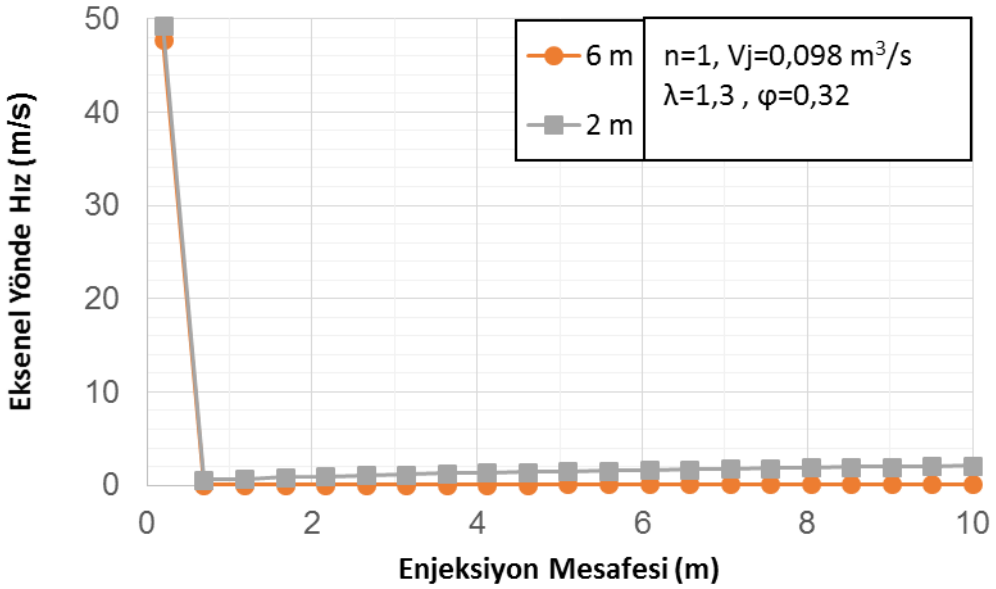
Şekil 4.16 Farklı fırın ölçülerinin sıcaklığa etkisi (eksenel yön)

Şekil 4.16' da fırınlardaki sıcaklık dağılımı analiz sonuçları gösterilmektedir ve fırının çapının artmasıyla sıcaklık düşmüştür.

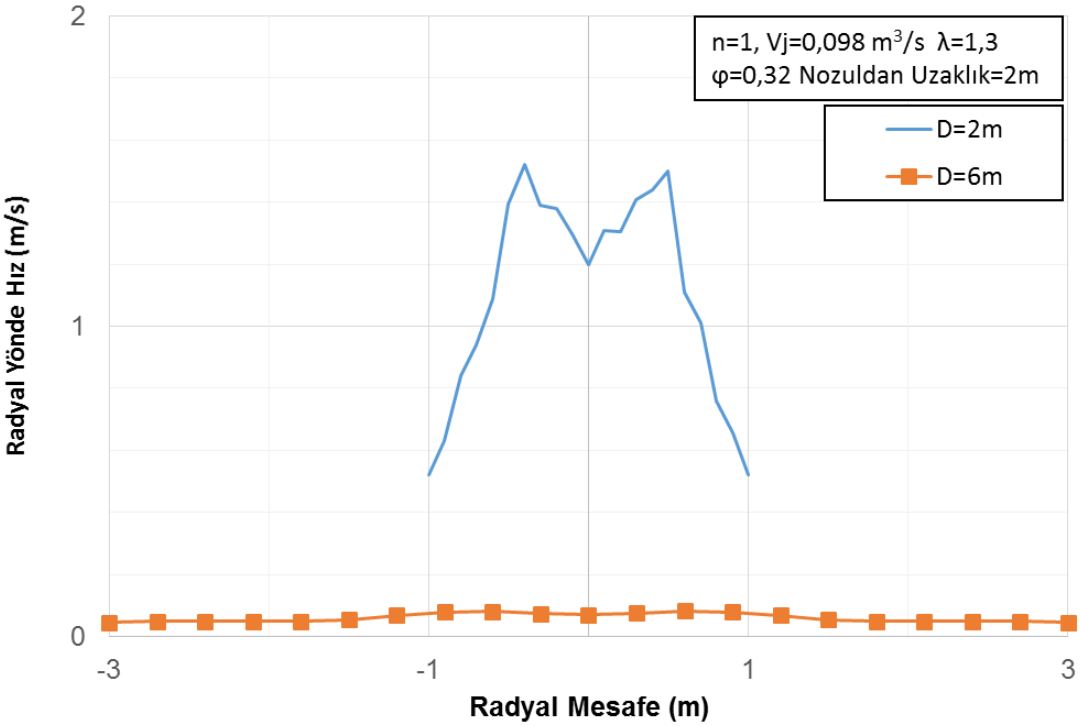
Fırın çapı (m)	CH_4	CO	Sıcaklık
2 m			
6 m			

Şekil 4.17 Farklı fırın ölçülerinin etkisi

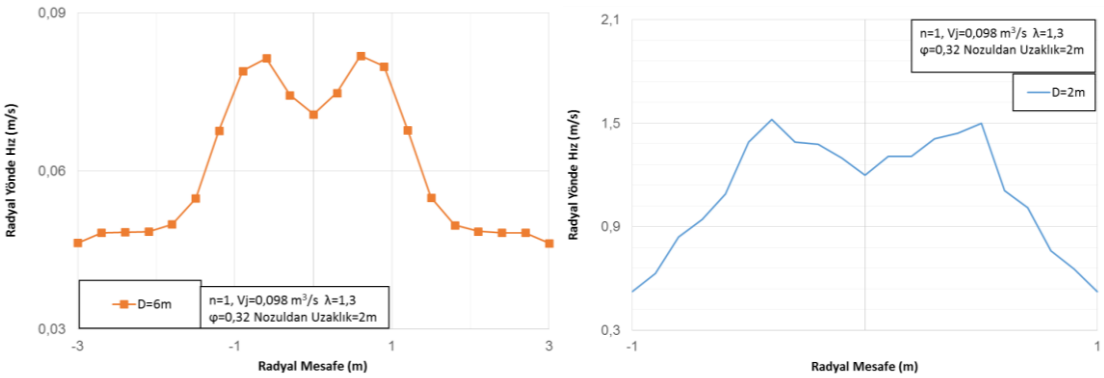
Şekil 4.17 de farklı çaplardaki fırınlara ait kontürler gösterilmiştir. Analiz sonunda CH_4 mol kesri fırın çapına bağlı olarak artmakta, CO mol kesri ise neredeyse eşit değere ulaşmaktadır. Ayrıca karşılaştırılan sıcaklık kontürlerinde de düşüş görülmektedir.



Şekil 4.18 Farklı fırın ölçülerinin eksenel hız üzerine etkisi



Şekil 4.19 Farklı fırın ölçülerinin hız üzerine etkisi (radyal yönde)

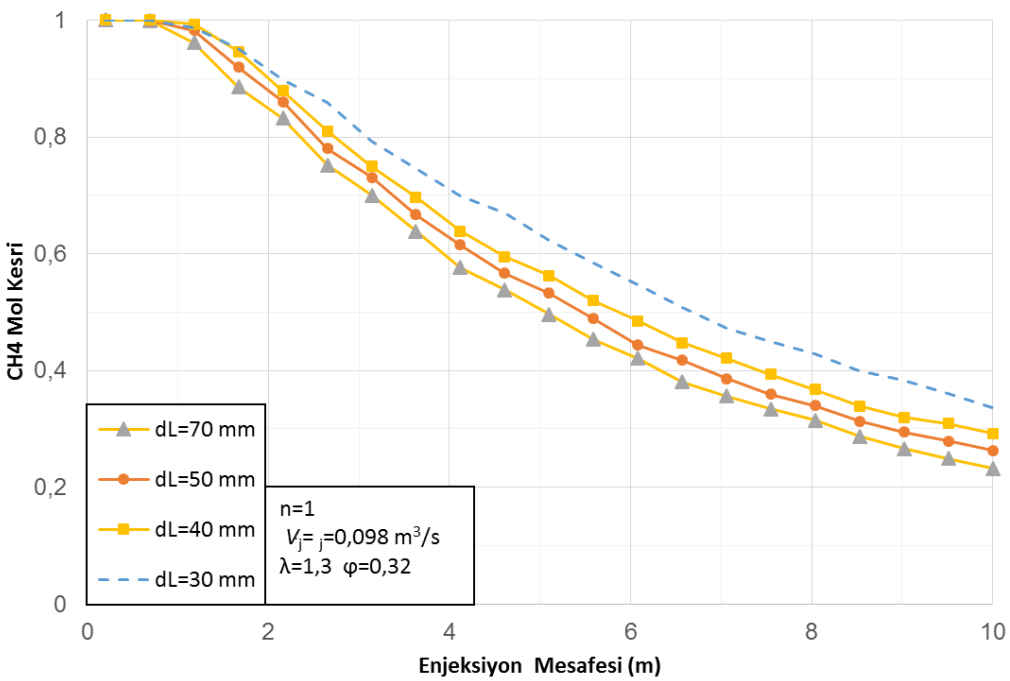


Şekil 4.20 Fırın çapı 6 m ve 2 m olduğu durumda hız (radyal yönde)

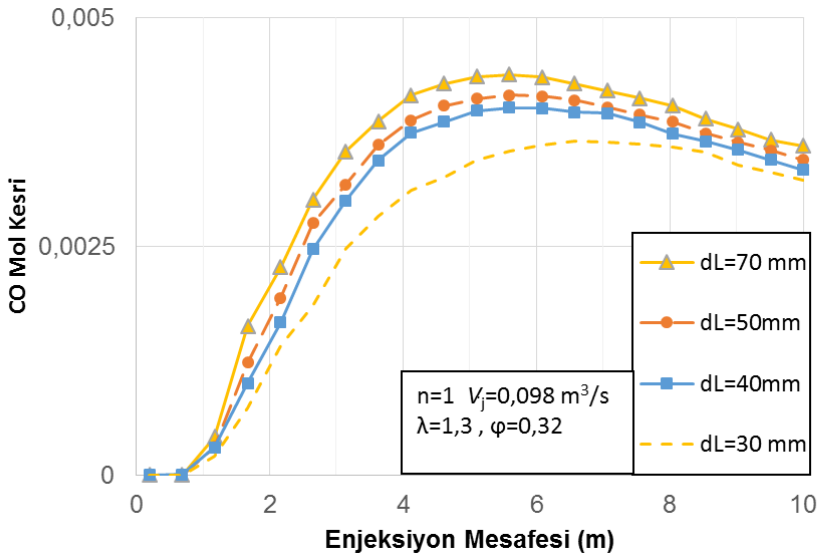
Farklı fırın ölçülerinde diğer bir sonuç parametresi olarak hız incelenmiştr ve fırın çapının artırılmasıyla bu değerin azaldığı görümüştür. Aynı şekilde radyal hızın da azaldığı görülmüştür.

4.1.4 Farklı Nozul Ölçülerinin Etksi (d_L=30-70 mm)

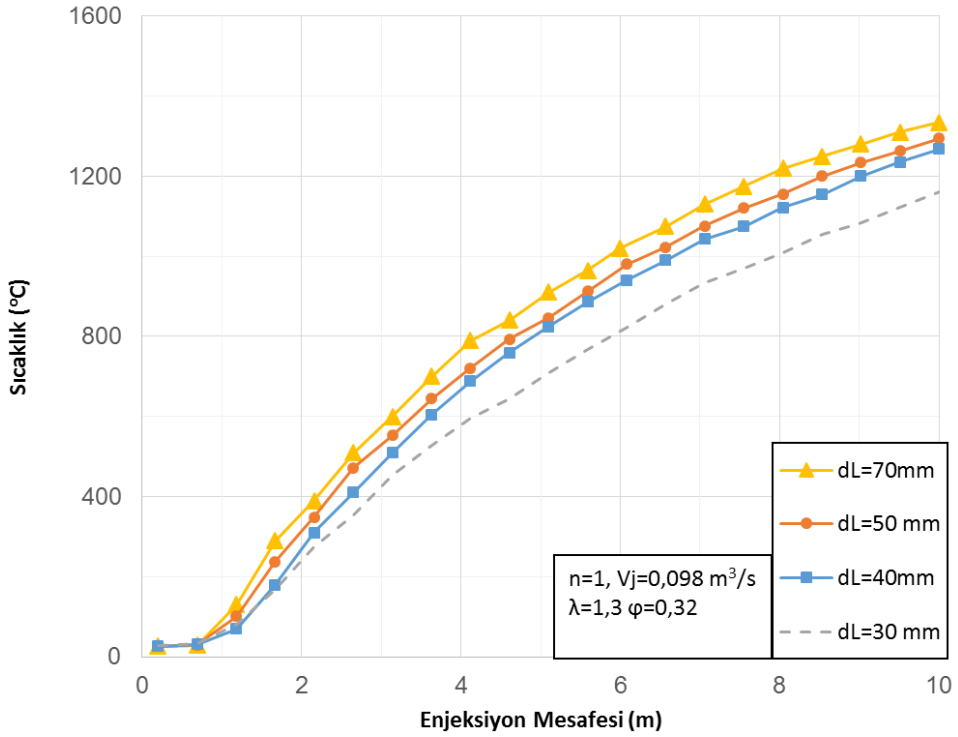
Son başlık olarak farklı nozul çaplarının etkisi incelenmiştir. Aynı hava fazlalık katsayısı, gözeneklilik oranı, partikül boyutu ve eşit fırın çapıları kullanılarak sadece nozul çapı değiştirilerek analizler yapılmıştır.



Şekil 4.21 Farklı nozul ölçülerinin CH_4 mol kesrine etkisi (eksenel yönde)



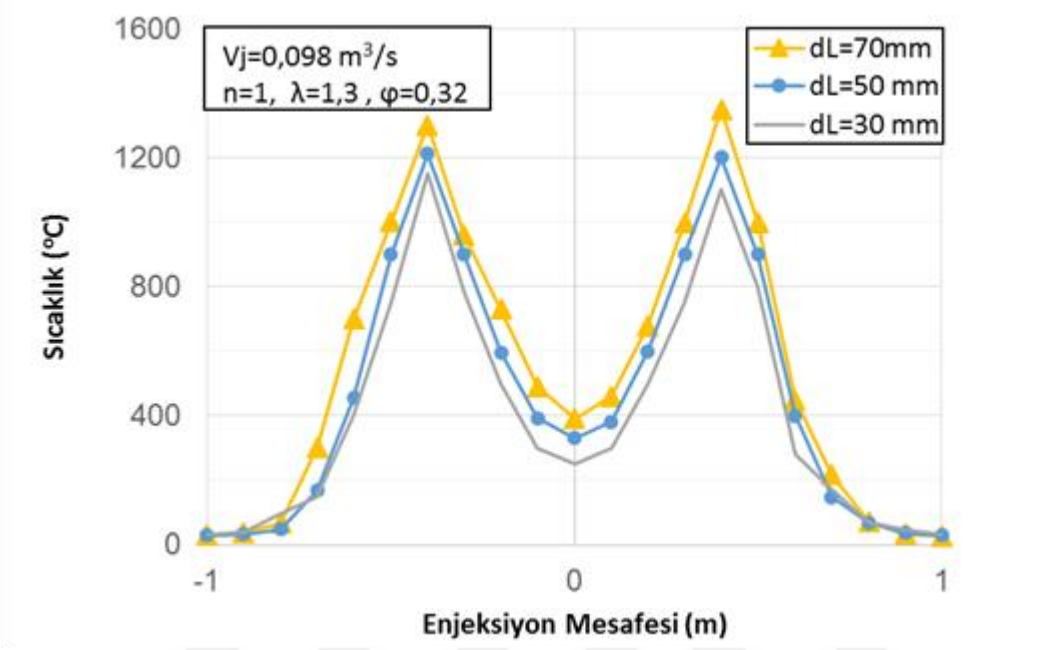
Şekil 4.22 Farklı nozul ölçülerinin CO mol kesrine etkisi (eksenel yönde)



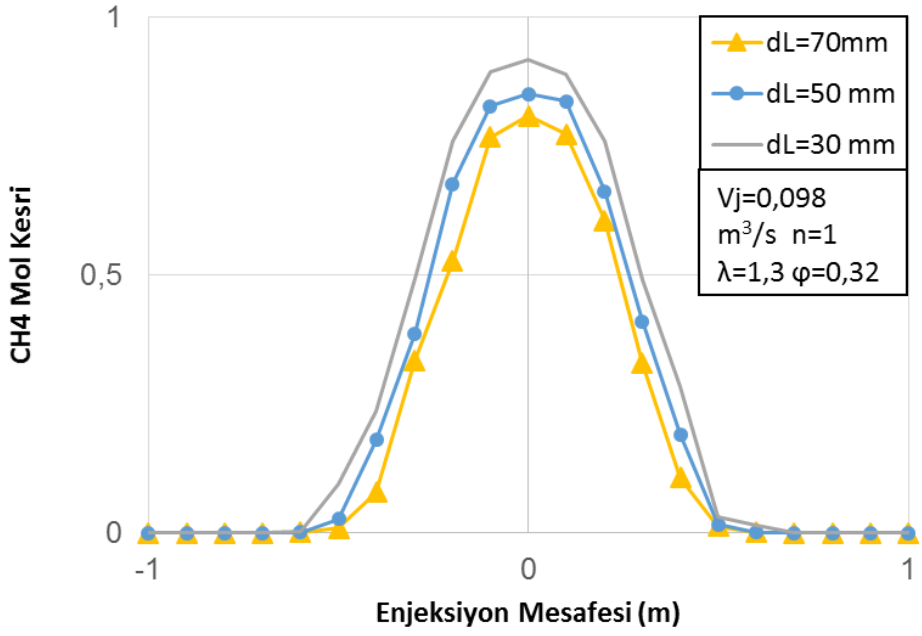
Şekil 4.23 Farklı nozul ölçülerinin sıcaklığa etkisi (eksenel yönde)

Farklı çaplardaki fırın nozulları ile yapılan analizler Şekil 4.21, 4.22, 4.23'te verilmiştir. Nozul çapı arttıkça alev uzunluğu azalmaktadır, en uzun alev boyu 30 mm çaplı nozuldadır. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi çapın artması ile CO konsantrasyonu artmaktadır.

Şekil 4.23’ de şaft fırınında farklı nozul çaplarının sıcaklık dağılımı gösterilmektedir ve görülmektedir ki burner çapının artmasına paralel olarak sıcaklık da artmaktadır. Şekil 4.24ve 4.25’ te sıcaklık ve CH_4 dağılımı radyal yönde, nozula 2 m uzaklıktan alınan bir doğrudan sonuçlar gösterilmektedir.

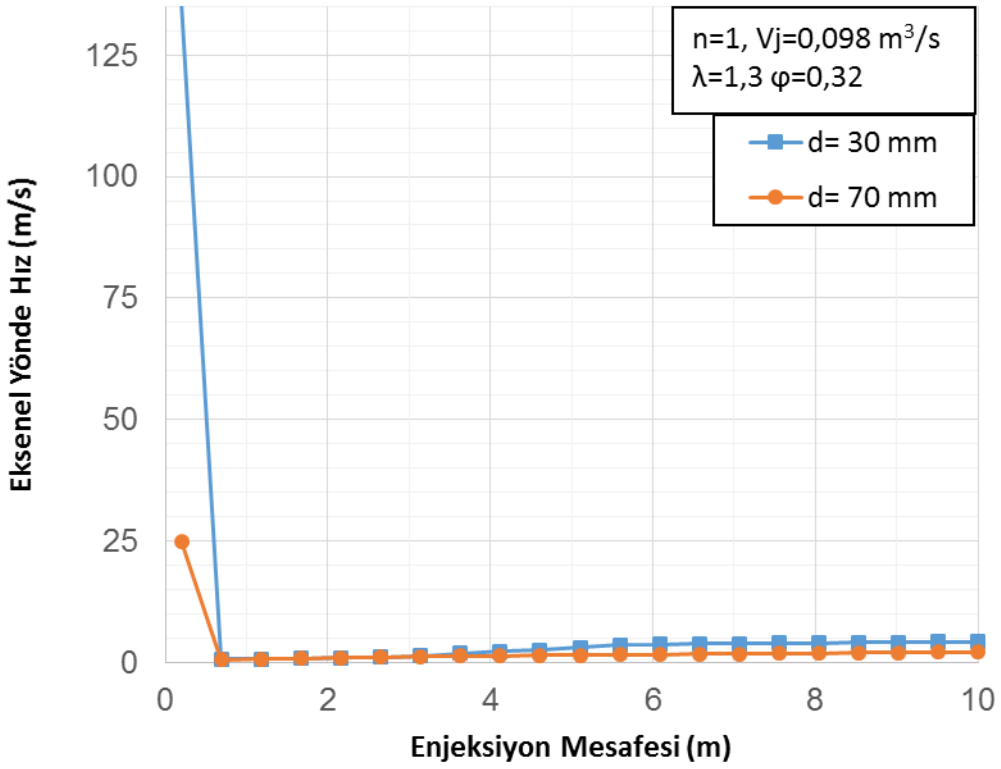


Şekil 4.24 Farklı nozul ölçülerinin radyal yönde sıcaklığa etkisi



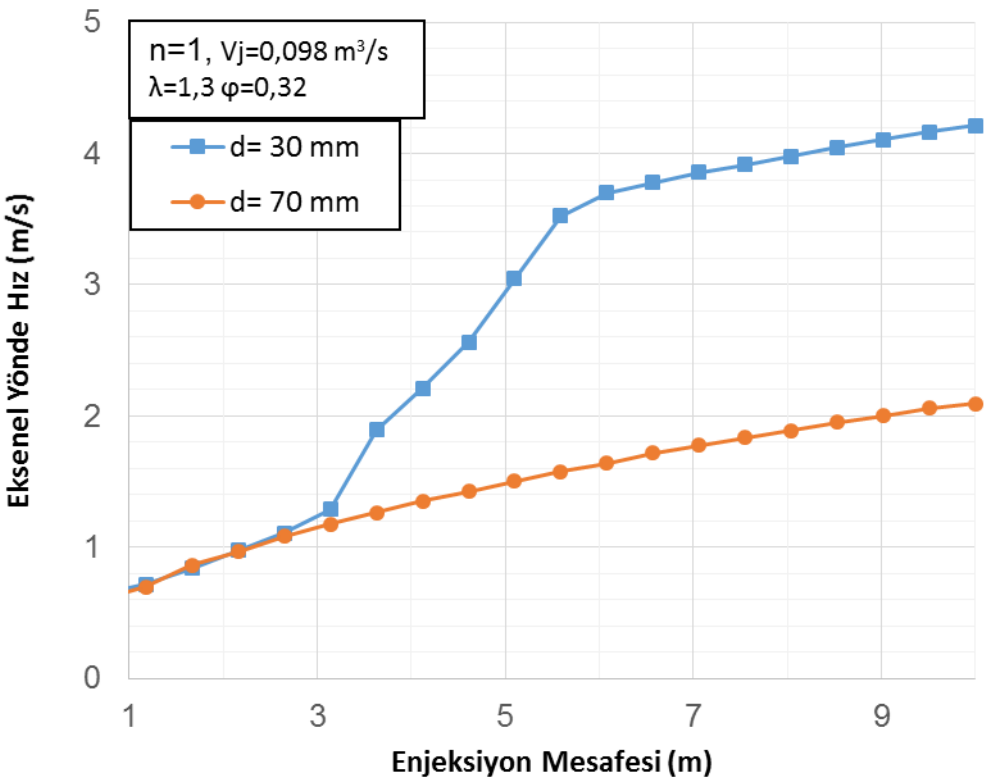
Şekil 4.25 Farklı nozul ölçülerinin radyal yönde CH_4 mol kesrine etkisi (eksenel yön)

Radial yönde nozul çapı arttıkça sıcaklığın fırın içinde arttığı ve bunun sonucu olarak da CH4 mol fraksiyonun azaldığı görülmüştür.

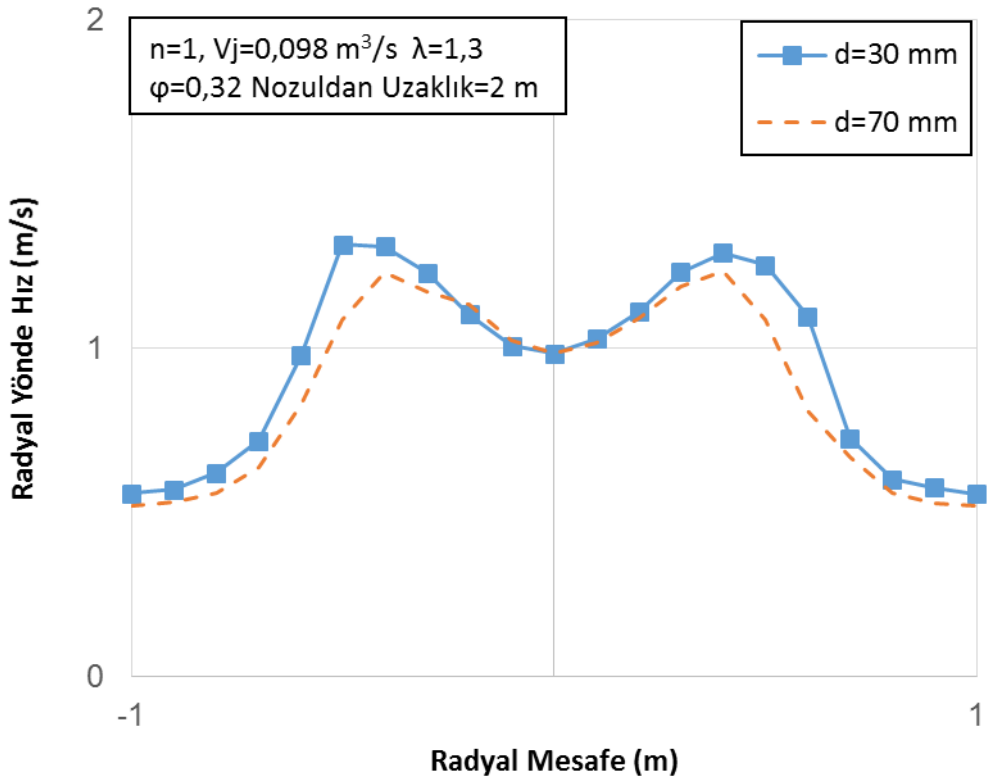


Şekil 4.26 Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (eksenel yönde)

Eksenel yönde ise nozul çapının artmasıyla hızın azaldığı sonucu Şekil 4.26' daki grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.26' daki grafiğin daha ayrıntılı hali Şekil 4.27' de verilmiştir. Şekil 4.28' de ise radyal yöndeki hız dağılımı gösterilmektedir. Nozul çapı arttıkça hızın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.27 Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (eksenel yönde)



Şekil 4.28Farklı nozul ölçülerinin hıza etkisi (radyal yönde)

4.1.5 Değerlendirme ve Öneriler

Elde edilen sonuçlara göre;

Hava fazlalık katsayısının artmasıyla, eksen çizgisi boyunca alev boyunun kısaldığı ve CO mol kesrinin düştüğü görülmekte ayrıca sıcaklıkta da artış olmaktadır. Bu da hava fazlalık katsayısının artırılması ile daha fazla oranda yakıtın yanabileceğini ancak sıcaklığın artmasıyla da referans kireçtaşı parçalanma sıcaklığının çok üzerine çıkarak kireç kalitesine de zarar verebileceği düşünülmektedir.

Hızın eksenel ve radyal yönde hava fazlalık katsayısı ile artması ise istenen bir durum olmasının yanısıra bu değerlerde kalsinasyon için istenen sürenin sağlanması kirecin reaktivitesi açısından önemli olduğundan bu konuda daha fazla çalışma yapılarak deneysel çalışmalarla desteklenebilir.

Farklı oranlarda analiz yapılan porozite durumlarında, gözenekliliğin artmasıyla alev boyunun kısaldığı ve daha homojen bir yanma olduğu eksenel yönde alınan kontürlerden görülmektedir. Ancak porozitenin artması sıcaklığı da artırdığından çok yüksek sıcalıklarda bu durum kireç kalitesi açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Daha geniş fırın çapının kullanıldığı analizde ise yakıtın tutabildiği oksijen miktarının daha az olduğu ve yanma prosesi sonunda yakıtın bir kısmının yanmadığı, sıcaklığın ise kireçtaşı kalsinasyonu için gerekli değerin altında kaldığı sonucu elde edilmiştir. Hızın ise bu yeni fırın çapında referans değerlerden oldukça düşük olduğu görülmüş ve fırın çapının artırılmasının kireçtaşı yanması için uygun olamayacağı sonucu düşünülmüştür.

Son olarak, farklı nozul çaplarının kullanılmasıyla yapılan analizlerde nozul çapının artmasıyla alev boyunun kısaldığı, sıcaklığın ise arttığı görülmüştür. Buradaki sıcaklık, yapılan analizlerdeki en geniş nozul çapında (d_L=70 mm) yaklaşık 200^oC lik bir artıştır ve istenen kirecin reaktivitesi ve kalitesine göre bu sıcaklık değeri yüksek bir değer olabilmektedir. Radyal yönde alınan doğrudan sıcaklık sonuçları incelendiğinde ise nozul çapının artması ile sıcaklık değerinin düştüğü ve alınan bu radyal yöndeki doğru üzerinde sıcaklık farkları çok yüksek olduğundan homojen bir yanma için çoklu nozul kullanımı veya farklı bir açıdan nozul kullanımıyla ilgili çalışmların devam etmesi gerekmektedir. Hız grafiğinde ise görüldüğü üzere radyal yönde alınan doğruda, nozul

çapının artması hızı azaltmıştır. Bu durumun reaksiyondaki sıcaklık ile ilgili olduğu ve grafiklerden de görüldüğü gibi radyal yönde aynı doğruda sıcaklığın artışına ve buradaki kireç yoğunluğuna da bağlı olduğu düşünülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Roth, J.P., (1966),“Diagnosis of Automata Failures: A Calculus and a Method”, IBM Journal of Research and Development, 10:278-291.

[2] Aysu, E., (2011), ‘’Şehir Planlamasında Yoğunluk’’, Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 214.

[3] Piringer, H., (2017). Lime Shaft Kilns. Energy Procedia, 120, 75-95.

[4] International Lime, https://www.internationallime.org/world-lime-production/, 10 Mart 2018.

[5] Gutiérrez, A. S., Martínez, J. B. C., & Vandecasteele, C. (2013). ‘’Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln’’, Applied Thermal Engineering, 51(1-2), 273-280.

[6] George, P. A. O., Gutiérrez, A. S., Martínez, J. B. C. ve Vandecasteele, C. (2010), ‘’Cleaner production in a small lime factory by means of process control’’, Journal of cleaner production, 18(12): 1171-1176.

[7] Saotayanan, D. ve Rasul, M. G. (2007), ‘’Modelling and Simulation of Thermodynamic Processes of Vertical Shaft Kiln in Magnesia Plant Using CFD Code Fluent’’.

[8] Bluhm-Drenhaus, T., E. Simsek, S. Wirtz ve V. Scherer., "A coupled fluid dynamic-discrete element simulation of heat and mass transfer in a lime shaft kiln." Chemical Engineering Science 9 (2010): 2821-2834.

[9] Krause, B., Liedmann, B., Wiese, J., Bucher, P., Wirtz, S., Piringer, H., & Scherer, V. (2017). ‘’3D-DEM-CFD simulation of heat and mass transfer, gas combustion and calcination in an intermittent operating lime shaft kiln’’, International Journal of Thermal Sciences, 117, 121-135.

[10] Senegačnik, A., Oman, J., & Širok, B. (2008). ‘’Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation’’, Applied Thermal Engineering, 28(7), 785-792.

[11] Senegačnik, A., Oman, J., & Širok, B. (2007). ‘’Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 2: Results of tests’’, Applied thermal engineering, 27(8-9), 1473-1482.

[12] Rong, W., Li, B., Qi, F., & Cheung, S. C. (2017). ''Energy and exergy analysis of an annular shaft kiln with opposite burners'', Applied Thermal Engineering, 119, 629-638.

[13] Cunningham, W. A. (1951). Fundamentals of lime burning. Industrial & Engineering Chemistry, 43(3), 635-638.

[14] McAllister, S., Chen, J. Y. ve Fernandez-Pello, A. C., (2011). Fundamentals of combustion processes. New York: Springer.

[15] Turns, S.R., (2000). An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Second Edition, McGraw-Hill.

[16] El-Mahallawy, F. ve El-Din Habik, S., (2002). Fundamentals and Technology of Combustion, First Edition, Elsevier.

[17] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th edition, McGraw-Hill.

[18] Oates, J. A., (2008). Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses. John Wiley & Sons.

[19] Kumar, G. S., Ramakrishnan, A. ve Hung, Y. T. (2007). Lime calcination. Advanced Physicochemical Treatment Technologies, 611-633.

[20] Solver Kimya, http://www.solverkimya.com/site/makaleler/endustriyel-urunler-makaleleri/kirectasi-ozellikleri.html, 12 Mayıs 2018.

[21] Kalsit, http://www.arimadenitozlar.com.tr/product/kalsit-tanimi/, 21 Mayıs 2018.

[22] Matweb, http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=bea4bfa9c8 bd462093d50da5eebe78ac, 21 Mayıs 2018.

[23] Pete lien and sons, https://www.petelien.com, 23 Eylül 2018.

[24] Oates, T. (2007). Lime and limestone. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.

[25] Eula, http://www.eula.eu/kiln-types, 2 Mayıs 2018.

[26] Educating Berkshire, http://educatingberkshire.weebly.com/c12--limestone-and-building-materials. html, 21 Mart 2018.

[27] Baukal Jr, C. E. (Ed.), (2003). Industrial burners handbook. CrC press.

[28] Reshetnyak, A. F., Konev, V. A., Mamaev, A. N. ve Seryakov, N. I., (2008). ''Improvement of shaft furnace construction for roasting limestone'', Refractories and Industrial Ceramics, 49(3), 177-178.

[29] DAKOTA, N., (2015). 2010–2011 Minerals Yearbook. US Geological Survey.

[30] Nirmolo, A., Woche, H. ve Specht, E., (2008). ''Temperature homogenization of reactive and non-reactive flows after radial jet injections in confined cross-flow'', Engineering Applications of Computational fluid mechanics, 2(1), 85-94.

[31] Bastian, P., (1999). ‘’Numerical computation of multiphase flow in porous media’’Doktora Tezi, Technischen Fakultaet der Christian–Albrechts–Universitaet Kiel, Almanya.

[32] Corey, A. T., (1994). ‘’Mechanics of immiscible fluids in porous media’’, Water Resources Publication.

[33] Tsotsas, E. ve Mujumdar, A. S. (Eds.), (2011). Modern Drying Technology, Volume 3: Product Quality and Formulation (Vol. 1), John Wiley & Sons.

[34] Johnson, R. W. (Ed.), (2016). Handbook of fluid dynamics. Crc Press.

[35] Guide, S. C. U. (2015). version 10.02.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Miray SARDOĞAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 06.09.1990, İstanbul

Yabancı Dili : İnglizce, Almanca

E-posta : miray_sardogan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Gıda Müh	Yıldız Teknik Üni	2016
Lisans	Gıda Müh	Namık Kemal Üni	2012

YAYINLARI

Bildiri

1. Sardoğan M., Mohammadpour K., Specht E., Demir H.,'', Consideration of One Burner Parallel Flow Injection In Shaft Kilns Using Porous Media Model (P.M.M.)'', ICAME 2017, Aralık 2017, Istanbul