

**ALÇI ÜRETİMİ YAPAN BİR TESİSİN ENERJİ
EKSERJİ VE EKSERGOEKONOMİK ANALİZ
YÖNTEMİYLE PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mert GÜRTÜRK

**Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP
EKİM – 2015**

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

**ALÇI ÜRETİMİ YAPAN BİR TESİSİN ENERJİ EKSERJİ
VE EKSERGOEKONOMİK ANALİZ YÖNTEMİYLE
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mert GÜRTÜRK

(111119201)

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Programı: Enerji Eğitimi

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 EYLÜL 2015

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 EKİM 2015

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü.)
Prof. Dr. Ebru KAVAK AKPINAR (F.Ü.)
Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI (Y.Ü.)
Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL (C.B.Ü.)

EKİM – 2015

ÖNSÖZ

Yoğun ve yorucu bir maratonun sonucunda ortaya çıkan bu tezin, başından sonuna kadar çok büyük bir destek gördüğümü itiraf etmeliyim. Bu desteği sağlayan kurum ve kişiler sayesinde, önemli ve kapsamlı bir doktora tezi ortaya koymaya çalıştım.

Danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP'a, doktora tezime yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim. Ekserji analizleri üzerine yapılan çalışmalara destek veren, Sayın hocam Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI'ya teşekkür ederim.

Tezin gerçekleştirilmesinde, tüm imkânlarını seferber eden ve büyük bir misafirperverlik gördüğüm ARALÇI Firmasına çok teşekkür ederim. Özellikle, bilgi toplamamda, ölçümlerin alınmasında, teknik detayların ve saha araştırmalarımnda büyük desteğini gördüğüm, ARALÇI Elektrik Bölümü Şefi Fatih KAN'a teşekkür ederim. Döner fırının sayısal modellemesinde, Beşir KOK arkadaşımdan aldığım destekten dolayı kendisine teşekkür ederim. Her ne kadar idealist bir araştırma gerçekleştirilmeye çalışılmış olsam da, ekonomik bazı gereksinimlerin karşılanması gerekmektedir. Bu bağlamda, FÜBAP biriminin bu tezin gerçekleştirilmesinde verdiği destekten dolayı, teşekkür ederim. FÜBAP birimi hazırlamış olduğum bu tezi, TEKF.13.01 numaralı proje ile desteklemiştir. Aynı zamanda, tez araştırmalarımın başlamasından itibaren TÜBİTAK-BİDEP'in 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında, Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programından yararlanmış bulunmaktayım. 2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı birimine teşekkür ederim.

Geçmişten bugüne eğitimime en büyük desteği veren Annem Semral GÜRTÜRK'e en içten dileklerim ile şükranlarımı sunarım.

Mert GÜRTÜRK
ELAZIĞ – 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIV
KISALTMALAR LİSTESİ	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.1.1. Ekserji ve Eksergoekonomi Üzerine Yapılan Literatür Araştırmaları	2
1.1.1.1. Döner Fırınlrın Ekserji Analizleri	2
1.1.1.2. Perlit Genleştirme veya Patlatma Fırının Ekserji Analizleri.....	5
1.1.1.3. Döner Fırının Eksergoekonomi Analizleri.....	7
1.1.1.4. Perlit Genleştirme Fırının Eksergoekonomik Analizleri.....	11
1.1.1.5. Döner Fırının Modellenmesi	12
1.2. Alçı Sektörü	23
1.3. Perlit Sektörü.....	25
2. MATERYAL ve METOT	30
2.1. Alçının İşlenmesi	30
2.2. Perlitin İşlenmesi.....	44
2.3. Ekserji Metodu	50
2.4. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizi.....	55
2.4.1. Eski Perlit Fırınının Enerji ve Ekserji Analizleri	57
2.5. Yeni Perlit Fırınının Ekserji Analizi	60
2.5.1. Yeni Perlit Fırınının Enerji ve Ekserji Analizleri.....	67
2.6. Döner Fırının Ekserji Analizi	71
2.6.1. Döner Fırının Kütle Dengesi	72
2.6.1.1. Doğal Gazın Özellikleri.....	72
2.6.1.2. Yakma Havasının Özellikleri	73

2.6.1.3. Alçı Tozunun ve Alçı Taşının Özellikleri	73
2.6.1.4. Baca Gazının Özellikleri.....	74
2.6.2. Döner Fırının Enerji Dengesi.....	75
2.6.3. Döner Fırının Ekserji Dengesi	78
2.7. Eksergoekonomi	81
2.7.1. Yeni ve Eski Perlit Fırınlarına İlişkin Ekonomik Veriler	82
2.7.2. Döner Fırına İlişkin Ekonomik Veriler	84
2.7.3. Eksergoekonomik Analiz.....	85
2.8. Döner Fırının Sayısal Modellenmesi	92
2.8.1. Basitleştirilmiş Döner Fırın Geometrisinin Ağ Yapısı.....	93
2.8.2. Sayısal Analizde Kullanılan Metotlar	99
3. BULGULAR	106
3.1. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular	106
3.2. Yeni Perlit Fırınının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular.....	109
3.2.1. Eski ve Yeni Perlit Fırınlarının Karşılaştırılması	113
3.3. Döner Fırının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular	117
3.4. Yeni ve Eski Perlit Fırınının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulgular	119
3.5. Döner Fırının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulgular	121
3.6. Döner Fırının Sayısal Modellenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	123
4. TARTIŞMA	138
4.1. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizlerinden Elde Edilen Sonuçların Çevresel Sorumluluklar Açısından İrdelenmesi.....	138
4.2. Eski Perlit Fırının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi	138
4.3. Yeni Perlit Fırınının Analizlerinden Elde Edilen Sonuçların Çevresel Sorumluluklar Açısından İrdelenmesi.....	139
4.4. Yeni Perlit Fırının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi.....	140
4.5. Perlit Üretiminin Enerji Yönetimi Açısından Değerlendirilmesi	142
4.6. Döner Fırının Ekserji Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	143
4.7. Eski ve Yeni Perlit Fırınlarının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması	147

4.8.	Döner Fırının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması.....	151
4.9.	Döner Fırının Modellenmesinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması.....	153
5.	SONUÇLAR	160
6.	ÖNERİLER	165
	KAYNAKLAR.....	166
	EKLER	176
	ÖZGEÇMİŞ	197

ÖZET

Bu tez kapsamında, alçı üretimi yapan bir fabrikada ısıtım işlemlerinin gerçekleştirildiği endüstriyel fırınların termodinamik ve döner fırının sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri, söz konusu işletmede bulunan perlit patlatma ve döner fırın proseslerine uygulanmıştır. Bu analizlere ilave olarak, döner fırının sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

İşletmedeki perlit fırını, yapılan bir ön analiz ile yeni bir perlit fırını ile değiştirilmiştir. Analizlerde eski ve yeni perlit fırını olarak adlandırılarak, elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Eski perlit genişletme fırınının enerji verimi % 66 iken, ekserji verimi ise % 26 olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırının enerji verimi % 69, ekserji verimi ise % 37 olarak hesaplanmıştır. Döner fırının enerji verimi % 69 olarak belirlenmiştir. Döner fırının ekserji verimi ise % 16 olarak hesaplanmıştır. Doğal gazın birim ekserji maliyeti, eski perlit fırını için 13.601 \$/GJ, yeni perlit fırını için 12.345 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Her iki fırına giren yakıt ekserji maliyetleri, sırası ile 57.287 \$/h ve 53.651 \$/h olarak hesaplanmıştır. Ekserji kavramı temelinde üretim maliyeti, eski perlit fırını için 0.153 \$/kg iken yeni perlit için 0.100 \$/kg olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 45 iken, yeni perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Döner fırında tüketilen doğal gazın birim ekserji maliyeti 13.7606 \$/GJ iken, ekserji maliyeti 218.1457 \$/h olarak hesaplanmıştır. Döner fırının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Alçı tozunun üretim maliyeti, 0.03097 \$/kg olarak belirlenmiştir. Döner fırının sayısal modellemesinden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, mevcut çalışma koşulları için döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 1868.64 K değerine ulaşmıştır. İkinci analizden elde edilen analizler göstermiştir ki, döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 2437.77 K değerine ulaşmıştır. Yeni, eski perlit fırınlarının ve döner fırının enerji ve ekserji analizleri göstermiştir ki, analizlerde göz önüne alınan proseslerden yüksek miktarlarda enerji verimliliği sağlanabilir.

Ekserji analizlerinden elde edilen bulgular, eksergoekonomik analizden elde edilen bulgular ile de desteklenmiştir. Döner fırının gerçekleştirilen sayısal analizleri ile verimsiz çalışma koşullarında çalıştığı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ekserji, Eksergoekonomi, HAD, Döner fırın, Endüstriyel fırın

SUMMARY

Performance Evaluation of a Plaster Production Plant Using Energy Exergy and Exergoeconomics Analyses

In this thesis, thermodynamic analysis of industrial furnaces, in which heat treatments have been done, installed in a plaster production factory and CFD analysis of a rotary kiln were made. Energy, exergy and exergoeconomic analysis methods were applied to the perlite furnaces and rotary kiln processes. In addition to these analyses, CFD analyses of the rotary kiln were performed.

Energy and exergy efficiencies of the former perlite expansion furnace were determined to be 66 % and 26 %, respectively. The energy and exergy efficiency values for the new perlite expansion furnace were calculated to be 69 % and 37 %, respectively. The energy and exergy efficiencies of the rotary kiln were obtained as 69 % and 16 %, respectively. The cost per unit of exergy of the natural gas was 13.601 US\$/GJ for the former perlite expansion furnace (FPEF) and 12.345 US\$/GJ for the new perlite expansion furnace (NPEF). The fuel exergy costs entering the FPEF and NPEF were 57.287 US\$/h and 53.651 US\$/h. The production costs based on exergy and the exergoeconomic factor of the FPEF are calculated to be 0.153 US\$/kg and 45 % while those of the NPEF were obtained to be 0.100 US\$/kg and 70 %, respectively. The cost per unit of exergy of the natural gas consumed in the rotary kiln was 13.7606 US\$/GJ. The fuel exergy cost entering the rotary kiln was 218.1457 US\$/h. The CFD analysis shows that the maximum temperature was 1868.64 K in the current working conditions. Based on the second CFD analysis, that maximum temperature was 2437.77 K in the second situation which created being cut with flue gas recirculation and removal of part which was the gypsum entry into the furnace. Second working conditions were better than those of current working conditions of the rotary kiln according to the gas velocity distribution in the furnace.

Energy and exergy analyses of the former, the new perlite expansion furnaces and the rotary kiln have shown that high amounts of energy efficiency could be obtained from these furnaces. The findings obtained from the exergy analysis were supported by the findings of exergoeconomic analysis. It was concluded that the rotary kiln was operated under inefficient conditions based on its CFD analysis results.

Key Words: Exergy, Exergoeconomics, CFD, Rotary kiln, Industrial Furnace

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Çimento sektöründe kullanılan döner fırının şematik gösterimi [53]	13
Şekil 1.2.	Modellenen sistemin tasarımı [54]	14
Şekil 1.3.	Fluent'te kullanılan geometri [55]	15
Şekil 1.4.	Döner fırının yüzeyine uygulanan ağ yapısı [55]	15
Şekil 1.5.	Kömürün enjekte edildiği geometri ile döner fırının şematik görünüşü ve hesaplamalı ağ yapısı [56]	16
Şekil 1.6.	Yonca şeklindeki döner fırının iç tasarımı ve J-tipi karıştırıcılar [57]	17
Şekil 1.7.	Deney düzeneği: 1) tambur, 2) ışık, 3) kamera, 4) elektrik motoru, 5) masa [58]	18
Şekil 1.8.	(a) ağ, (b) ilk durum, (c) 77. Saniyedeki dağılım ve aktif tabakanın şekli [59]	19
Şekil 1.9.	Cam parçacıkları (a), Alüminyum parçacıkları (b) [60]	21
Şekil 1.10.	Döner fırın prosesinin enerji dengesi ve modellemesi gerçekleştirilen geometri [61]	22
Şekil 1.11.	Ülkelerin yıllara göre alçı üretimi [62]	23
Şekil 1.12.	Yıllar itibariyle Türkiye doğal gaz üretimi [66]	25
Şekil 1.13.	2012 yılında ülkelere göre perlit üretimi	26
Şekil 2.1.	Alçı üretimindeki akış şeması	32
Şekil 2.2.	Hammadde depo sahası ve yatay kırıcı	33
Şekil 2.3.	Her biri 250 ton kapasitedeki hammadde siloları	34
Şekil 2.4.	A) Döner fırın girişi, B) Döner fırın çıkışı, C) Değirmen Çıkışı	34
Şekil 2.5.	Karıştırıcı	35
Şekil 2.6.	Döner fırının yanma odası	36
Şekil 2.7.	Döner fırının döndürülen bölümü	37
Şekil 2.8.	Brülör	38
Şekil 2.9.	Brülörün fırın içerisinden görünüşü	39
Şekil 2.10.	Döner fırının bakım girişi	40
Şekil 2.11.	Yanma odasının iç görünüşü	41
Şekil 2.12.	Baca gazının fırına giriş bölümü	42
Şekil 2.13.	Alçı taşının fırına giriş bölümü	43
Şekil 2.14.	Döner fırın içerisine yerleştirilen kanatçıklar	44

Şekil 2.15. Perlite genleştirme sisteminin akış şeması.....	46
Şekil 2.16. Yeni perlit fırını	48
Şekil 2.17. Perlit ve genleştirilmiş perlit	49
Şekil 2.18. Ham perlit ile genleştirilmiş perlit arasındaki hacimsel fark	50
Şekil 2.19. Ekserji analizlerinde izlenen yol	52
Şekil 2.20. Eski perlit fırınının akış şeması [101]	56
Şekil 2.21. Yeni perlit fırının akış şeması ve kütle dengesi [128].....	66
Şekil 2.22. Döner fırının kütle dengesi.....	75
Şekil 2.23. Döner fırının, üç boyutlu katı modeli.....	93
Şekil 2.24. Döner fırının genel ağ yapısı üzerindeki detay görüntüleri	94
Şekil 2.25. Döner fırının kesit görünüşü içindeki ağ yapısının durumu	95
Şekil 2.26. Yanma havası ve doğal gaz girişleri	96
Şekil 2.27. Yanma odası, alçı taşı ve baca gazı geri dönüşüm girişi.....	97
Şekil 2.28. Baca gazının fırına giriş yaptığı bölümün ağ yapısı	97
Şekil 2.29. Baca gazlarının döner fırına giriş yaptığı bölümün kesit görünüşü ve ağ yapısı ...	98
Şekil 2.30. Döner fırının modellemesinde sınır şartlarının geometri üzerinde gösterilmesi..	100
Şekil 3.1. Referans çevre sıcaklığının ekserji yıkımı üzerindeki etkisi [101]	108
Şekil 3.2. Referans çevre sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi [101]	108
Şekil 3.3. Referans çevre sıcaklığının sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi [101].....	109
Şekil 3.4. Yeni perlit fırınının ekserji dengesinin pasta diyagramında gösterilişi [127]	110
Şekil 3.5. Yeni ve eski perlit fırınlarının karşılaştırılması [127]	114
Şekil 3.6. Referans çevre sıcaklığının, yeni ve eski perlit fırınlarının ekserji verimi üzerindeki etkisi [127].....	115
Şekil 3.7. Referans çevre sıcaklığının, her iki fırında meydana gelen ekserji yıkımı üzerindeki etkisi [127].....	116
Şekil 3.8. Referans çevre sıcaklığının, sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi [127]....	116
Şekil 3.9. Döner fırının enerji dengesi [128]	118
Şekil 3.10. Döner fırının ekserji dengesi [128]	119
Şekil 3.11. Mevcut çalışma koşullarındaki döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı	124
Şekil 3.12. İkinci durum için elde edilen, döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı	125
Şekil 3.13 Mevcut çalışma durumu için elde edilen 1700 K değerindeki sabit sıcaklık yüzeyi	126

Şekil 3.14. İkinci durum için elde edilen 2200 K değerindeki sabit sıcaklık yüzeyi	126
Şekil 3.15. Mevcut çalışma durumu için fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı.....	127
Şekil 3.17. Mevcut çalışma durumu için döner fırın içerisindeki yörünge çizgilerinin gösterilişi	129
Şekil 3.18. İkinci durum için döner fırın içerisindeki yörünge çizgilerinin gösterilişi	130
Şekil 3.19. Mevcut çalışma durumu için yakıtın 0.1 değerindeki karışım fraksiyonu.....	131
Şekil 3.20. İkinci durum için yakıtın 0.1 değerindeki karışım fraksiyonu	132
Şekil 3.21. Döner fırın eksenı boyunca gazların hız değışimi.....	133
Şekil 3.22. Döner fırın eksenı boyunca gazların sıcaklık değışimi	133
Şekil 3.23. Döner fırın eksenı boyunca gazların statik basınç değışimi	134
Şekil 3.24. Fırın eksenı boyunca oksijenin kütle fraksiyonu dağılımı	135
Şekil 3.25. Fırın eksenı boyunca karbon monoksit kütle fraksiyonu dağılımı.....	135
Şekil 3.26. Fırın eksenı boyunca metan kütle fraksiyonu dağılımı	136
Şekil 3.27. Fırın eksenı boyunca karbon dioksit kütle fraksiyonu dağılımı.....	136
Şekil 4.1. Enerji yönetimi programının yapısı [119]	143
Şekil 4.2. Yanma odasının son kısmında yer alan bakım kapağı bölümünün yüzey sıcaklık dağılımı [128]	145
Ek Şekil 1.2. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.75 olması durumu	185
Ek Şekil 1.3. Mevcut çalışma durumu için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.50 olması durumu	186
Ek Şekil 1.4. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.50 olması durumu	187
Ek Şekil 1.5. Mevcut çalışma durumu için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.25 olması durumu	188
Ek Şekil 1.6. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.25 olması durumu	189
Ek Şekil 1.9. Döner fırının geometrik ölçüleri	192
Ek Şekil 1.10. Döner fırının ikinci durum için oluşturulan genel ağ yapısı.....	193
Ek Şekil 1.11. İkinci durum için oluşturulan yanma odası, alçı taşı ve baca gazı geri dönüşüm giriş i.....	194

Ek Şekil 1.12. Baca gazlarının döner fırına giriş yaptığı bölümün kesit görünüşü ve ağ yapısı	195
Ek Şekil 1.13. Brülörün geometrik ölçüleri	196

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Perlitin kimyasal bileşenleri [73].	45
Tablo 2.2. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri [74].	45
Tablo 2.3. Literatürde, ekserjinin farklı tanımları [78]	51
Tablo 2.4. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [94]	51
Tablo 2.5. Yanma ürünlerinin mol fraksiyonları	57
Tablo 2.6. Kontrol hacminden çıkan ve giren bileşenlerin entropi ve entalpi değerleri	58
Tablo 2.7. Doğal gazın ve yakma havasının bileşenleri	62
Tablo 2.8. Doğal gazı oluşturan her bir bileşenin molar kütlesi, alt ısı değeri, hacimsel ve kütlesel debileri	62
Tablo 2.9. Yanma havasının özellikleri	62
Tablo 2.10. Yanma sonucu oluşan ürünlerin özellikleri	65
Tablo 2.11. Doğal gazın özellikleri	73
Tablo 2.12. Yakma havasının özellikleri	73
Tablo 2.13. Baca gazının özellikleri	74
Tablo 2.14. Giren parametreler, ekserji dengesinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar [130]	80
Tablo 2.15. Çıkan parametreler, ekserji analizinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar	80
Tablo 2.16. Skewness değerinin değerlendirilmesi [111]	98
Tablo 2.17. Oluşturulan ağ yapısına ilişkin istatistiksel veriler	99
Tablo 2.18. Yanma problemlerinin sınıflandırılması [100]	103
Tablo 3.1. Döner fırına giren parametrelerin enerji değerleri [128]	117
Tablo 3.2. Döner fırından çıkan parametrelerin enerji değerleri [128]	117
Tablo 3.3. Saatlik olarak maliyet seviyelendirme metodunun sonuçları [129]	120
Tablo 3.4. Eski perlit fırınının ekserji ve birim ekserji maliyetleri [129]	121
Tablo 3.5. Yeni perlit fırınının birim ekserji ve ekserji maliyeti [129]	121
Tablo 3.6. Maliyetlerin saatlik olarak seviyelendirme metodundan elde edilen sonuçlar	122
Tablo 3.7. Döner fırının eksergoekonomik analizinden elde edilen sonuçlar	123

Tablo 4.1. Yanmamış hidrokarbonların ve kayıp enerjiye denk gelen doğal gaz miktarının hacimsel, kütleli ve parasal değerleri	141
Tablo 4.2. Farklı amaçlar için kullanılan döner fırınların enerji ve ekserji verimleri [128] ..	144
Ek Tablo 1.1. Kontrol hacmine giren parametrelerin enerji değerleri ve kullanılan eşitlikler	176
Ek Tablo 1.2. Kontrol hacminden çıkan parametrelerin enerji değerleri ve kullanılan eşitlikler	176
Ek Tablo 1.3. Kontrol hacminin yüzeyinden meydana gelen ısı kayıpları	177
Ek Tablo 1.4. Yeni perlit fırınına giren parametrelerin enerji değerleri	179
Ek Tablo 1.5. Yeni perlit fırınından çıkan parametrelerin enerji değerleri	180
Ek Tablo 1.6. Kontrol hacminin yüzeyinden meydana gelen enerji kayıpları	181
Ek Tablo 1.7. Eşitlik (2.52)'de kullanılan parametreler [90]	183
Ek Tablo 1.8. Ek Şekil (1.12.)'da gösterilen brülörün geometrik ölçüleri	196

SEMBOLLER LİSTESİ

$\dot{m}$:	Kütlesel debi (kg/s)
$\dot{W}$:	Güç (kW)
$\dot{E}$:	Enerji akımı (kW)
h :	Entalpi (kJ/s)
V :	Hız (m/s)
g :	Yer çekimi (m/s ²)
$\dot{E}_x$:	Ekserji akımı (kW)
T :	Sıcaklık (K)
s :	Entropi (kJ/kg·K)
P :	Basınç (Pa)
R :	Evrensel gaz sabiti (kJ/kg·K)
$\bar{e}$:	Standart kimyasal ekserji (kJ/kmol)
$\bar{g}$:	Gibbs fonksiyonu (kJ/kmol)
γ :	Kimyasal ekserji oranı
e_{ex} :	Özgül ekserji (kJ/kg)
ψ :	Ekserji (kJ/kg)
AID:	Alt ısı değeri (kJ/kg)
η :	Enerji verimi
η_{II} :	Ekserji verimi
λ :	Yakıt hava oranı
M :	Molar kütle (kg/kmol)
x, y :	Mol fraksiyonu
SI :	Sürdürülebilirlik indeksi
D_p :	Ekserji yıkımı/ekserji giriş oranı
Y :	Yakıtın kütlesi (kg)
O :	Oksijenin kütlesi (kg)
ϕ :	Eşdeğerlik oranı
C_p :	Özgül ısı kapasitesi (kJ/ kg·K)
X :	Kütle fraksiyonu
ρ :	Yoğunluk (kg/m ³)
$\dot{C}$:	Ekserji maliyet oranı (\$/h)
$\dot{Z}$:	Sermaye maliyet akışı (\$/h)
ŞD:	Şimdiki değer (\$)
TYM:	Toplam yatırım maliyeti (\$)
Hu:	Hurda değeri (\$)
ŞDF:	Şimdiki değer faktörü
J:	Hurda değer oranı
i_{ef} :	Efektif iskonto oranı (%)
pd :	Paranın değeri
bi :	Yıllık bileşik faiz sayısı

YYM:	Yıllık yatırım maliyeti (\$)
YGF:	Yatırım geri dönüş faktörü
ζ :	İşletme ve bakım maliyet faktörü
$\mathcal{S}$:	Sistemin toplam çalışma saati (h)
$B-\dot{I}M$:	Bakım işletme maliyeti (\$)
HNM :	Hammaddenin nakliye masrafları (\$)
BT :	Bakım ve tamir masrafları (\$)
ETM :	Elektrik tüketim maliyeti (\$)
$\mathcal{C}M$:	Çalışanların maliyeti (\$)
$\mathcal{C}$:	Birim ekserji maliyeti (\$/GJ)
SF:	Doğal gazın satış fiyatı (\$)
TLD:	Türk Lirası – ABD Dolar kuru
$Y\dot{S}M$:	Yakıtın saatlik maliyeti (\$/h)
YBKE:	Yakıtın birim kütlesinin ekserjisi (kJ/kg)
YYM:	Yakıtın yıllık maliyeti (\$)
f :	Eksergoekonomik faktör
MC:	Ürün maliyeti (\$/kg)
u:	Hız (m/s)
F:	Kuvvet (N)
∇ :	Gradyen operatörü
$=$:	
τ :	Viskoz gerilme tensörü
μ :	Dinamik viskozite (Pa s)
I :	Birim tensörü
Γ :	Yayılım-difüzyon katsayısı (m ² /s)
S :	İşinimla ısı transferi ve yanma oranları
G_u :	Türbülans kinetik enerji üretim oranı (hız)
G_b :	Türbülans kinetik enerji üretim oranı (buoyancy)
ε :	Türbülans kinetik enerjinin oran sabiti (m ² /s ³)
α :	Türbülans model sabiti
ke:	Türbülans kinetik enerji (m ² /s ²)
$\mathbb{C}$:	Türbülans model sabiti
β :	Termal genleşme katsayısı (1/K)
Pr:	Prandıl sayısı

KISALTMALAR LİSTESİ

EXCEM: Ekserji, maliyet, enerji ve kütle analiz yöntemi

HAD: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

TEP: Ton Eşdeğer Petrol

LNG: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz

SPECO: Ekserji Maliyet Metodu

TRT: Türkiye Radyo ve Televizyon

1. GİRİŞ

Ülkelerin enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Geçmişte ve günümüzde enerjinin, bir ülkenin dününü, bugününü ve yarınını inşa etmesindeki temel yapı taşı olduğunu bilinmektedir. Enerji, güç, para, ülke refahı ve istikrarı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Fakat toplumların enerji için savaşımlardan ve çevreyi kirlletici eylemlerden kaçınarak enerji elde etme yöntemlerine doğru yönelmesi ve hassasiyet göstermesi söz konusudur. Günümüzde yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve enerji tasarrufu gibi kavramlar artık gündelik yaşantımıza kadar girmiştir. Enerji verimliliğini arttırmak için, A sınıfı beyaz eşya ve klimalar, elektrikli otomobiller gibi enerji ihtiyacını ve çevre faktörünü göz önüne alarak, yeni ürünler farklı firmalar tarafından piyasaya sürülmektedir. Güneş, dalga ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak, pahalı ve amortisman süresi uzun olsa da, temiz bir gelecek inşa edilmesinde güzel bir adım olacaktır. Dünyanın tüm enerji ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilse bile, enerji verimliliği ve tasarruf kavramları olmazsa olmaz bir etkidir [1].

Enerji verimliliği ve tasarrufu kavramları benimsenmedikçe, insanoğlunun enerjiye ve enerji kaynaklarına olan bağımlılığı ve ihtiyacı hiçbir zaman karşılanamayacaktır. Bu kavramlar özellikle de çok fazla enerji tüketen tesisler de büyük önem kazanmaktadır. Bu tesislerde gerçekleştirilecek enerji ve ekserji analizlerinin yanı sıra eksergoekonomi analizi, sistemin tanımlanmasına, yorumlanmasına ve gerekli düzenlemelerin veya iyileştirmelerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu analizler, tesisin enerji verimliliği ve tasarruf potansiyeli açısından değerlendirilmesine ve iyileştirmelerin nerelerde ve nasıl yapılması hakkında kullanılacak önemli bir yöntemdir [1].

Bu tez kapsamında incelenen literatür araştırması, iki başlık halinde sunulacaktır. Tez kapsamında, bir alçı fabrikasında bulunan perlit genleştirme fırınlarının ve döner fırının enerji, ekserji, eksergoekonomi analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile birlikte döner fırının sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Perlit ve döner fırın proseslerinin ekserji ve eksergoekonomi analizleri kapsamında, literatürde yoğun enerji tüketen sistemlerin ekserji analizleri üzerinde durulacaktır. Literatür araştırmasının bir diğer ayağında ise döner fırın proseslerinin modellenmesi üzerine yapılan araştırmalara değinilecektir.

1.1. Literatür Araştırması

1.1.1. Ekserji ve Eksergoekonomi Üzerine Yapılan Literatür Araştırmaları

Enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizler, yüksek enerji tüketen sistemlerin yorumlanmasında kullanılan etkin bir yöntemdir. Literatürde birçok, yüksek enerji tüketen sistemlerin enerji, ekserji ve eksergoekonomi analizleri mevcuttur.

1.1.1.1. Döner Fırınlarda Ekserji Analizleri

Döner fırınlar, kurutma, pişirme, soğutma, eritme, atıkların geri dönüşümünde ve zararlı maddelerin yok edilmesi gibi birçok mühendislik uygulamalarında aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok endüstriyel alana hitap eden bu proseslerin diğer prosesler ile karşılaştırıldığı zaman, yüksek enerji tüketen sektörlerin tükettiği enerjinin, yaklaşık olarak % 30-70'ni tükettiği hesaba katılmaktadır [2]. Buna benzer sistemler yoğun enerji tüketmelerinden dolayı, enerji, ekserji analizleri, çevreye olan etkileri ve eksergoekonomik analizleri üzerine yapılan analizler literatürde tartışılmaktadır. Bu çalışmalar, farklı endüstriyel alanların enerji analizleri üzerine yapılmıştır. Son zamanlarda ise ekserji analizleri, endüstriyel sektörlerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için daha gerçekçi ve de bilimsel öneriler sağlamasından dolayı uygulanmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Boroumand vd. [2] endüstriyel sektörlerin ekserji analizleri üzerine bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel proseslerin, enerji ve ekserji kayıpları, tersinmezliklerin belirlenmesi ve ekserji analizleri sonucunda elde edilen sonuçları, yaptıkları çalışmada derlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, emisyon ve enerji tüketimini azaltmak için endüstriyel sektörlerin yüksek bir geliştirme potansiyeli olduğunu ortaya koymuştur.

Döner fırınlar ile ilgili ekserji analizlerinin literatür taraması yapıldığı zaman, çimento sektöründe kullanılan döner fırınların analizlerinin yoğunluğu göze çarpmaktadır. Çimento üretimi, dünyadaki en fazla enerji tüketen endüstriyel sektörlerden birisidir. Döner fırınlar, klinker ve farin üretiminde, çimento fabrikalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Döner fırınlar üzerine yapılan araştırmalar, genellikle sistemden enerji verimliliği sağlamak ve enerji verimini arttırmaya yönelik çalışmalar oluşturmaktadır.

Madloul vd. [3] çimento sektöründe enerji verimliliği ve enerji kullanımına ilişkin bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların yaptıkları çalışmada, çimento üretimindeki dört anahtar proses sınıflandırılmıştır. Bu prosesler, ıslak, yarı ıslak, kuru ve yarı kuru işlemleri göz önüne almışlardır.

Madloul vd. [4] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise çimento sektörü için yapılan ekserji analizleri derlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çimento sektörü için yapılan ekserji analizlerinden elde edilen ekserji verimi değerlerinin % 18 ila % 49 arasında değiştiği gözlenmiştir. Tersinmezliklerden dolayı meydana gelen ekserji kayıplarının da, giren toplam ekserjiye oranında benzer sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

Kol ve Chaube [5] çimento santrallerindeki ekserji analizleri üzerine bir araştırma sunmuşlardır. Yapılan çalışmada, ekserji analizi, ekserji dengesi ve ekserji verimi üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çimento sektörünün, çevreyi kirletici etkilerini azaltmaya yönelik olarak, alternatif enerji kaynaklarına yöneldiğini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda, endüstrinin ıslak işlemde kuru işleme doğru bir yönelime girdiğini belirtmiştir.

Genel olarak yapılan bu literatür araştırmalarından, daha özele indirgenerek, literatür araştırmalarına yer verilebilir. Bu analizler, çimento sektörü ile sınırlı değildir. Farklı alanlarda kullanılan döner fırınların analizlerini de içermektedir.

Peinado vd. [6] sıcak karışım asfalt üretimi gerçekleştiren bir fabrikada, agrega karışımının kurutulması ve ısıtılması amacı için kullanılan bir döner fırının, enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde, termodinamik kayıpların değerlendirilmesi ve tanımlanması için ekserji analizinden yararlanmışlardır.

Utlu vd. [7] bir çimento fabrikasında hammadde hazırlama ünitesinin ve bu ünite de bulunan bir döner değirmenin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Gutiérrez vd. [8] kireç endüstrisinde kullanılan dikey mil fırının enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının temel amacı ise yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin tanımlanması için dikey mil fırınındaki kalsinasyonun enerji ve ekserji tüketimini analiz etmektir.

Söğüt vd. [9] bir çimento fabrikasındaki döner fırından ısı geri dönüşümünü analiz etmişlerdir. İlk olarak, yapılan ekserji analizleri ile sistemi termodinamik açıdan tanımlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar göstermiştir ki, döner fırının tüm bölümlerinden olan ısı kayıpları 217.31 GJ'dur.

Yazarlar, çimento santrali için yeni bir ısı geri dönüşümü için bir ısı değiştirgeci için matematiksel bir model geliştirdiler. Bu sistemin atık sının % 5'ni tekrardan sistemde değerlendirebileceklerini belirtmişlerdir.

Yılmazoğlu vd. [10] güneş enerji ile desteklenmiş bir döner kömür kurutucunun analizlerini yapmışlardır. Döner kömür kurutucusunun ekserji, ekonomik analizleri ve prosesin çevreye olan etkilerini ele almışlardır.

Karamarkovic vd. [11] magnezyum üretiminde kullanılan bir döner fırının analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Döner fırından meydana gelen ısı kayıplarının % 18.95 i egzoz gazları ile olurken, % 26.35 i (toplam giren enerjinin) ise yetersiz yalıtımdan gerçekleştiğini hesaplamışlardır. Kayıp ısıнын azaltılması için bir ısı değiştirgeci tasarlanmıştır. Yakma havası, fırının kalsinasyon bölümünün dış kısmından geçirilerek, yakma havasına ön ısıtma uygulanmıştır. Bu ön ısıtma uygulaması ile yakıt tüketimi % 12 oranında azalmıştır. Döner fırının enerji ve ekserji verimi ise % 7.35 ve % 3.81 oranında geliştirildiği görülmüştür.

Çamdalı vd. [12] çimento üretiminde ön kalsinasyon işleminde kullanılan döner brülörün enerji ve ekserji analizleri üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir.

Atmaca ve Yumrutaş [13,14] iki bölümde hazırlamış oldukları çalışmalarında, aktif olarak üretim gerçekleştiren bir çimento santralinin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının ilk bölümünde, yapılan teorik analizi sunmuşlardır. İkinci bölümünde ise elde edilen sonuçları tartışmışlardır.

Renó et al. [15] enerji ile ilişkili sistemlerin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan ekserji analizini, klinker üretimi için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaya göre, çimento endüstrisindeki temel tersinmezliklerin ana kaynağı döner fırındır. Bu tersinmezliklerin en fazla ve yoğun olarak meydana geldiği sürecin ise klinker üretimi esnasında oluştuğunu, belirtmişlerdir.

Ashrafizadeh vd. [16] döner fırınlarda kullanılan brülörün, çimento üretimi esnasında, fırın içerisindeki sıcaklık gradyeninin dağılımını incelemişler. Fırın içerisinde farklı bölgelerdeki çimento üretim sürecindeki yanma oluşumunun modellenmesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını üç farklı debide gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda, farklı yakıt besleme oranlarına göre oluşan farklılıkları gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, ikincil bir brülör uygulamasının ekserji kayıplarını, yaklaşık olarak % 25 oranında azaltmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi döner fırınların çimento sektöründe yoğun olarak kullanılmasından dolayı, döner fırınların ekserji analizleri üzerine hazırlanmış olan literatür araştırması, çimento sektörü genelinde gerçekleşmiştir. Alçı sektöründe kullanılan döner fırınların ekserji analizlerine ise yapılan yoğun literatür araştırması sonucunda, her hangi bir analiz bulunamamıştır. Çimento sektörünün de, alçı sektörü gibi inşaat sektörüne hitap etmesinden dolayı, oluşturulan literatürün yapılan çalışma ile paralel olduğu söylenebilir.

Tez kapsamında değerlendirilen ve alçı fabrikasındaki bir diğer ısıtım işleminin gerçekleştiği perlit patlatma sisteminin ekserji analizine ilişkin literatür araştırması ise aşağıdaki gibi sunulmuştur.

1.1.1.2. Perlit Genleştirme veya Patlatma Fırının Ekserji Analizleri

Endüstriyel alanlarda birçok farklı amaç için kullanılan endüstriyel fırınlar mevcuttur. Perlit genleştirme veya patlatma fırını da, bu fırınlardan biridir. Yapılan literatür araştırmasında, perlit genleştirme fırını üzerine yapılan enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizlere rastlanmamıştır. Bu nedenden dolayı, farklı endüstriyel alanlarda kullanılan fırınlar göz önüne alınarak, perlit için literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, farklı endüstriyel alanlarda kullanılan fırınlara, döner fırını da dâhil edebiliriz.

Engin ve Arı [17] enerjiyi yoğun bir şekilde tüketen, kuru tip bir çimento döner fırın sistemin enerji bilançosu üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, enerji kayıplarının, baca gazları, döner fırının çevre ile temas halinde olan dış katmanından ve klinker soğutucu ünitesinden meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kayıp enerjinin sisteme entegrasyonu ve geri kazanımına ilişkin olarak, mümkün olan çözüm önerileri sunmuşlardır. Sonuçlar toplam giren enerjinin % 15.6'nın (4 MW) geri kazanılabileceğini ifade etmiştir.

Sardeshpande vd. [18] endüstriyel cam fırınları için bir model sunmuşlardır. Enerjiyi yoğun olarak tüketen endüstriyel proseslerin karşılaştırılması için temel alınan bu modeli uygulamışlardır. Bir cam fırını için geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, özgül enerji tüketiminin, farklı çalışma ve tasarım tercihlerinin etkisi ve geliştirilmesi için bir potansiyele sahip olduğunu açıklamıştır.

Chirattananon ve Gao [19] elektrik ark fırınının çalışma performansını incelemişlerdir. Enerji dengesini göz önüne alarak, kimyasal reaksiyonlardan meydana gelen ekzotermik bir süreçle birlikte ve fırın için geliştirilen termal model ile söz konusu fırının bir elektriksel modelini oluşturmuşlardır.

Sakamoto vd. [20] Japon çelik endüstrisindeki her bir süreç için enerji tüketimini tahmin etmeye çalışmışlardır. Enerji tüketiminin azaltılması olasılığının değerlendirilmesi için istatistiksel bir tahminde bulunmuşlardır.

Lee vd. [21] endüstriyel alanlarda kullanılan bir fırının damper açısını ayarlayarak, fırının enerji verimini geliştirilmesi üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu fırında, yükselen sıcak gazların hızını azaltmak için fırının iç basıncını düşürmeye çalışmışlar. Daha düşük iç basıncın elde edilmesi için fırının egzoz damper açısını değiştirmişlerdir. Bu durum, fırın içerisindeki ısı transfer mekanizmalarının gerçekleşmesi için yeterli zamanın sağlanmasına olanak vermiştir. Daha iyi bir üretimin gerçekleştirilmesinde dolayı, fırının termal verimliliği arttırılmıştır.

Chen vd. [22] yapmış oldukları çalışmada, hem pratik ölçümler hem de nümerik analizler ile elde edilen veriler ışığında ısı işlemin gerçekleştiği şerit haddeleme fırınının performansı ve enerji tüketimini analiz etmişlerdir.

Jegla vd. [23] endüstriyel fırınların, verimliliğini iyileştirmek için enerji geri dönüşümü yapabilen bir tesis üzerine araştırma yapmışlardır. Araştırmacılar, hem yakma havasına ön ısıtma uygulayan sistemlerin hem de baca sıcaklığının optimizasyonu ile fırınların iyileştirilmesi için bir verimlilik metodu uygulamışlardır.

Gutierrez vd. [8] dikey fırınlardaki kalsinasyonun, yakıt tüketimini etkileyen faktörleri tanımlamak için enerji ve ekserji tüketimini analiz etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, enerji veriminin ekserji veriminden daha yüksek değerlerde olduğunu bulmuşlardır. Yapılan analizden elde edilen sonuçlarda, fırınlardan birinin enerji veriminin % 71.6, ekserji veriminin ise % 40.8 olduğunu belirtmişlerdir.

Camdali vd. [24] Türkiye’de özel bir çelik üretim şirketinin pota fırının ekserji analizlerini yapmışlardır. Aynı zamanda, tersinmezliklerin üretim maliyetine olan etkisini de incelemişlerdir. Araştırmacılar, fırının ekserji veriminin % 50 olduğu hesaplamışlardır.

Rasul vd. [25] bir tesisin üretimini geliştirmek için enerji verimini göz önüne alarak, fırının termal performansını değerlendiren, basit bir model sunmuşlardır. Yapılan analizler sonucunda, fırının enerji veriminin % 77.3, ekserji veriminin ise % 39.13 olduğu hesaplanmıştır. Fırında meydana gelen tersinmezliklerin % 18.9'u, kimyasal dönüşümlerden ve reaksiyonlardan meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Bisio ve Rubatto [26] demir çelik endüstrisindeki bazı işlemlerin geliştirilmesi için karışım, akış ve ısı transferi gibi parametrelerin değerlendirildiği ve karşılaştırıldığı bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir.

Hepbaşı ve Özalp [27] Türkiye'deki endüstriyel enerji verimliliği ve yönetimi üzerine yapılan araştırmaların gelişimini incelemişlerdir. Çalışmalarında, endüstriyel sektörün, yıllık % 30 enerji verimliliği potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ülkedeki enerji verimliliğinin geliştirilmesi için bazı önlemlerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Kannan ve Boie [28] orta ölçekli işletmeler için enerji yönetiminde bir rehber veya kaynak oluşturmak ve geliştirme çalışması yapmışlardır. Araştırmacılar, oluşturdukları enerji yönetim metodu ile % 6.5 oranında, orta ölçekli işletmelerin enerji tüketimini azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu oranın sağlanmasında da, her hangi bir yatırım yapılmadan başarılabileceğini ifade etmişlerdir.

Ekserji analizleri üzerine yapılan analizlerin literatür araştırmasından sonra, döner fırın ve perlit patlatma fırını üzerine yapılan eksergoekonomi analizlerine yer verilecektir.

1.1.1.3. Döner Fırının Eksergoekonomi Analizleri

Döner fırınların eksergoekonomi analizleri üzerine yapılan literatür araştırmasında, döner fırınların eksergoekonomik analizlerinin, ekserji analizlerine göre çok az sayıda yapılmış bir analiz olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenden dolayı, döner fırınların eksergoekonomi analizlerinin yanı sıra, söz konusu metodun uygulandığı diğer sistemlerin analizlerine de yer verilmiştir.

Mert vd. [29] bir kojenerasyon tesisinin eksergoekonomi analizini yapmışlardır. Araştırmacılar, 80 ton/h buhar ve 39.5 MW elektrik üreten tesisin enerji, ekserji ve eksergoekonomi analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Özdemir vd. [30] akışkan yataklı bir buhar üretim santralinin eksergoekonomi analizini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, tüm sistemi ve her bir sistem bileşeni için ekserji maliyet dengesini ve ekserji verimini hesaplamışlardır. Birim ekserji maliyeti ve üretilen buharın ekserji maliyetini, sırası ile 17.88 \$/GJ ve 93.57 \$/h olarak bulmuşlardır.

Yao vd. [31] termoekonomik teori yapısını temel alarak, çelik üretim işleminden dolayı oluşan atık gaz, işlenen materyalden ayrılan gazlar ve pişirme fırınından çıkan gazlar gibi geri dönüşüm potansiyeline sahip olan sistemler için bir eksergoekonomik analiz gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, her bir sistem bileşeninin termoekonomik performansını değerlendirmek için eksergoekonomik faktör, kısmi maliyet farkı ve maliyet farkı gibi üç eksergoekonomik parametreyi hesaplamışlardır. Ayrıca, üretim maliyeti, birim ekserjetik yatırım maliyeti ve değişkenlerin etkilerini incelemişlerdir.

Ballı vd. [32], bir kojenerasyon tesisinin eksergoekonomik analizlerini yaparak, ekserji verimini % 38.33 olarak bulmuştur. Sistemin ürettiği elektriğin birim ekserji maliyetinin 18.51 US\$/GW olduğunu ifade etmişlerdir.

Çolpan ve Yeşin [33] eksergoekonomik analiz yöntemini bir kojenerasyon tesisine uygulamışlardır. Araştırmacılar, tesisin geliştirilmesi için sistemin verimini olumsuz etkileyen parametreleri, ekserji kayıplarını ve ekserji yıkımını etkileyen parametreleri araştırmışlardır. Sistemi oluşturan birçok alt bileşen için yardımcı denklemler ve maliyet dengesini uygulamışlardır. Sistemin ürettiği her bir ürün için maliyet oranlarını hesaplamışlar. Elde edilen sonuçları benzer sistemlerin analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak, sistemin çalışma şartlarını yorumlamışlardır.

Sayyaadi ve Saffari [34] termal buhar kompresörü ile tuz ayrıştırma ve multi etkili damıtmanın termoekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, ekonomik bir model geliştirmiş ve enerji, ekserji analizlerini de temel alan bir model sunmuşlardır. Optimizasyon için altı parametreyi göz önüne alarak, söz konusu sistem için termodinamik ve termoekonomik analizleri temel alan fonksiyonlar geliştirmişlerdir.

Eksergoekonomik analiz iki farklı sistemin karşılaştırılması için de kullanılan etkili bir araçtır [35]. Yapılan literatür araştırmasında, bazı araştırmacılar, eksergoekonomik analiz için farklı metotlar geliştirmiş ve bu metotları karmaşık enerji sistemlerine uygulamışlardır.

Kim vd. [36] karmaşık enerji sistemleri için ekonomik ve ekserjetik analizlerin kombinasyonunu amaçlamışlardır. Termal bir sistemin her hangi bir bileşenine uygulanabilen genel maliyet denge eşitlikleri türetmişlerdir. Çalışmalarında, bir materyal akışının ekserjisinin, entropi üretim akışı, kimyasal ekserji akışları, mekanik ve termal akışlar için çözümlenmişlerdir. Araştırmacılar, sistemin her bir bileşeninin maliyet kayıplarını, bu metodu kullanarak elde edebilmişlerdir.

Kwon vd. [37] tarafından geliştirilen maliyet denge denklemlerini ve ekserji dengesini ile 1000 kW kapasiteye sahip bir kojenerasyon tesissindeki üretim maliyetinin ve de sistem bileşenlerinin yıllık maliyetinin etkileri için bir termodinamik analiz gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda, literatürdeki ekserji metodolojileri ile kendileri tarafından geliştirilen analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Kalinci vd. [38] biokütle temelinde hidrojen üreten bir santralin, ekserji ve eksergoekonomik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizde, sistemi oluşturan tüm bileşenleri göz önüne alarak, farklı değerlendirmelerde yapmışlar. Üretilen hidrojenin birim maliyetinden etkilenen sistem parametrelerini tanımlamışlardır. Araştırmacılar ilk olarak, sistemin enerji ve ekserji değerleri üzerine analizler yapmışlar, tüm sistemin ve sistemi oluşturan parametrelerin her biri için ekserji verimini, ekserji ve enerji kayıplarını ve yatırım maliyeti gibi parametreleri belirlemişlerdir. Araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, biyokütlenin gazlaştırılmasında kullanılan akışkan yataklı kazanın, enerji ve ekserji verimini, sırası ile % 55.11 ve % 35.74 olarak bulmuşlardır. Üretilen hidrojenin birim maliyetini ise 5.37 ve 1.59 \$/kg olarak hesaplamışlardır.

Söğüt vd. [39], çalışmalarında, kuru tip çimento üretiminde farin değirmeninin enerji, ekserji ve termoeekonomik (eksergoekonomi) analizini yapmışlardır. Isıl sistemler için oluşturulan yeni bir eksergoekonomik yöntemi, yüksek enerji tüketen bir çimento fabrikasının hammadde prosesi üzerine uygulamışlardır. Çalışmalarında, prosesin bir haftalık çalışma dataları kullanılarak termodinamik analizleri ile eksergoekonomik analizlerini yapmışlardır. Analizlerden elde ettikleri sonuçlar; değirmenin enerji ve ekserji verimi sırasıyla, ortalama % 82.9 ve % 18.44 bulmuşlardır. Değirmenden çıkan ve farin ismi verilen ürünün birim maliyeti 0.00708-0.01078 \$/kg olarak hesaplamışlardır.

Zare vd. [40] bir kojenerasyon tesisinin eksergoekonomi analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, termodinamiğin birinci, ikinci kanunu kapsamındaki analizleri ve eksergoekonomik metodolojisini uygulayarak, söz konusu sistemin optimizasyonu, verimi etkileyen parametrelerin belirlenmesinde ve değişken parametrelerin sistem üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Güngör vd. [41] EXCEM analiz metodu olarak adlandırılan, kütle, enerji, ekserji ve maliyet parametrelerini kullanarak, ısı pompalı bir kurutma sisteminin eksergoekonomik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, kurutma sisteminin tüm bileşenlerinin performansını belirleyerek, sistemin önemli bileşenlerinin, sistemin veriminin geliştirilmesindeki rolünü ve önemini araştırmışlardır. Hem kurutma işleminin hem de kurutma sisteminin bileşenleri için eksergoekonomik performansın parametreleri üzerine ve referans çevre sıcaklığının değişim etkilerinin araştırıldığı bir karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmişlerdir.

Cortes ve Rivera [42] bir kojenerasyon tesisinin optimizasyonunu yapmışlardır. Sistemin optimizasyonunda, ekserji ve eksergoekonomik metodolojilerinden yararlanmışlardır. Araştırmacıların amacı, belirtilen yöntemleri kullanarak sistemin en iyi performans sergilediği çalışma şartlarını belirlemektir.

Eksergoekonomik yöntemi, sistemlerin optimizasyonunda ve analizi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Herhangi bir fizibilite optimizasyon yönteminin, yapay sinir ağları, genetik algoritma ve benzeri araçlar ile birlikte, doğrudan sisteme ve sistem bileşenlerine uygulanabilir olduğunu ifade eden çalışmalar da mevcuttur [43]. Bu kapsamda, Modesto ve Nebra [44] çelik üretim sisteminin analizlerinde eksergoekonomi metodolojisini kullanmışlardır. Araştırmacılar tarafından göz önüne alınan çelik üretim santralının, buhar ve elektrik gücünü üretmek için iki farklı endüstriyel fırın kullanılmaktadır.

Özgener vd. [45] eksergoekonomi ve ekserji yöntemlerini kullanarak, jeotermal destekli bir ısıtma sisteminin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, söz konusu sistemin enerji ve ekserji verimini, kapasite faktörü gibi birçok parametreyi belirlemişlerdir.

Abusoglu ve Kanoglu [46] kojenerasyon tesisleri optimizasyonu ve eksergoekonomik analizleri üzerine bir çalışma hazırlamışlardır. Araştırmacılar, maliyet ve ekserjetik maliyet kavramının tartışıldığı, optimizasyon ve de eksergoekonomik analizin kısa bir tarihini sunmuşlardır. Aynı zamanda, kojenerasyon tesislerin optimizasyonu, eksergoekonomik ve termodinamik analizleri yapılan önemli çalışmaları listelemişlerdir.

Souza ve Lamas [47] kozmetik endüstrisindeki kimyasal reaktörlerde tüketilmek için kullanılan doğal gaz için alternatif olarak güneş enerjisi ile ısıtılan su uygulamaları ile ekonomik ve çevresel kazanımların değerlendirildiği bir çalışma sunmuşlardır.

1.1.1.4. Perlit Genleştirme Fırının Eksergoekonomik Analizleri

Perlit genleştirme veya endüstriyel fırınların eksergoekonomik analizleri de, döner fırınların eksergoekonomik analizleri gibi literatürde pek karşılaşılmayan analizlerdir. Döner fırınlar için derlenen literatür araştırmasındaki gibi farklı endüstriyel ve işlemler üzerine yapılan eksergoekonomik ve termoeekonomik analizlerden derlenen bir literatür araştırması oluşturulmuştur. Aynı zamanda, endüstriyel alanlara ilişkin farklı değerlendirmeler ve araştırmalara da yer verilmiştir.

Utlu ve Hepbaşı [48] Türk endüstrisinin ve enerji politikaları için sektörel enerji değerlendirmelerini eksergoekonomik perspektifinde bir çalışma hazırlamışlardır. Araştırmacılar, endüstriyel sektörlerdeki alt sektörler için termodinamik kayıpların ve yatırım maliyetleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, termodinamik kayıpların, yatırım maliyetlerine oranının 0.76 ile 1.01 arasında değiştiğini göstermiştir.

Lian vd. [49] enerji kaynağı olarak biokütle kullanan bir trijenerasyon tesisinin termoeekonomik analizlerini yapmışlardır. Söz konusu sistemi farklı açılardan değerlendiren araştırmacılar, ekserji yıkımının en fazla endüstriyel fırında meydana geldiğini, net ekserji kayıpları ve yıkımının ise buhar dramında meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Modesto ve Nabra [50] çelik üretimi gerçekleştiren bir santraldeki güç üretim sistemini analiz etmişlerdir. Söz konusu sistem, işlem için buhar ve elektrik gücünü üretmek için çelik üretiminde kullanılan iki farklı fırından elde edilen sıcak gazları kullanarak, Rakine çevrimi esasına göre enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Araştırmacılar, sistemi karşılaştırmak ve güç üretiminin maliyetini ve ekserjisini hesaplamışlardır.

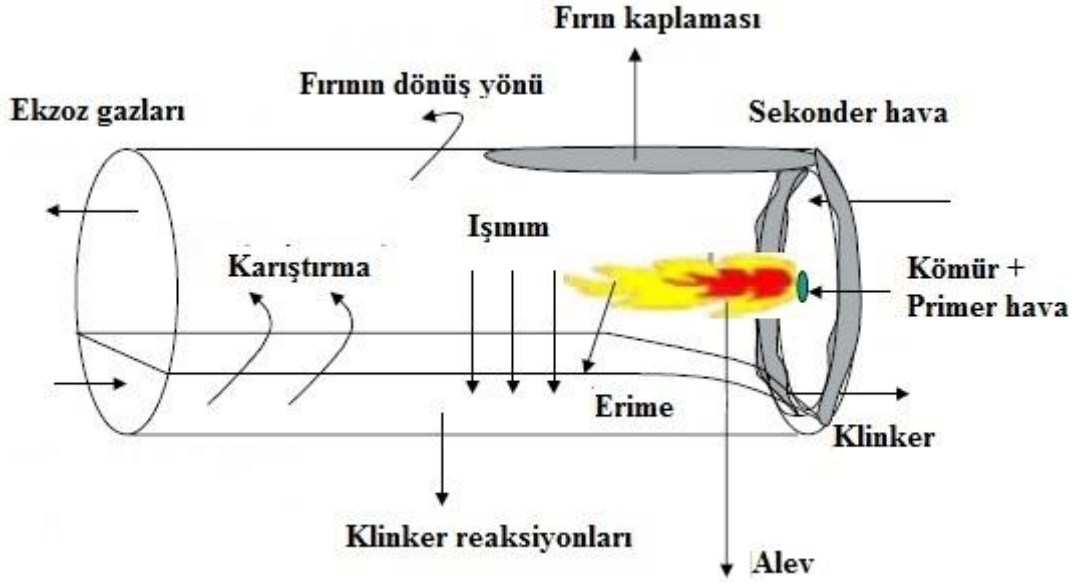
Lamas vd. [51] küçük bir atık su geri dönüşüm tesisindeki üretilen ürünler için maliyet analizi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem, proses diyagramındaki her bir noktayı göstermesi için termodinamik ve akışkanlar mekaniği ile ilgili tanımlamaların belirlenmesi ile yapılmaktadır.

Valero vd. [52] termoekonomik metodolojisi ile ilgili yeni bir metot sunmuşlardır. Araştırmacılar, kaynağın orijini ve tersinmezliklere göre ekserji maliyeti için iki farklı strateji geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Aynı zamanda, farklı parametreleri göz önüne alarak enerji faktörü gibi yeni bir yaklaşım belirlemişlerdir.

Daha öncede bahsedildiği gibi doğrudan perlit patlatma veya genleştirme fırınının ve alçı üretiminde kullanılan döner fırının enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizlerine yer verilmemiştir. Bunun nedeninin ise yapılan detaylı literatür araştırmasında, benzer çalışmaların bulunamamasıdır. Çimento sektöründeki gibi çok yaygın analiz ve araştırmaların gerçekleşmemesinin temel nedenini ise enerji tüketimi bakımından, alçı sektörünün çimento sektöründen daha az enerji tüketiyor olmasından kaynaklanabilir. Aynı zamanda, alçı üretimi dünya genelinde, çimento gibi yaygın bir üretimin gerçekleşmemesidir.

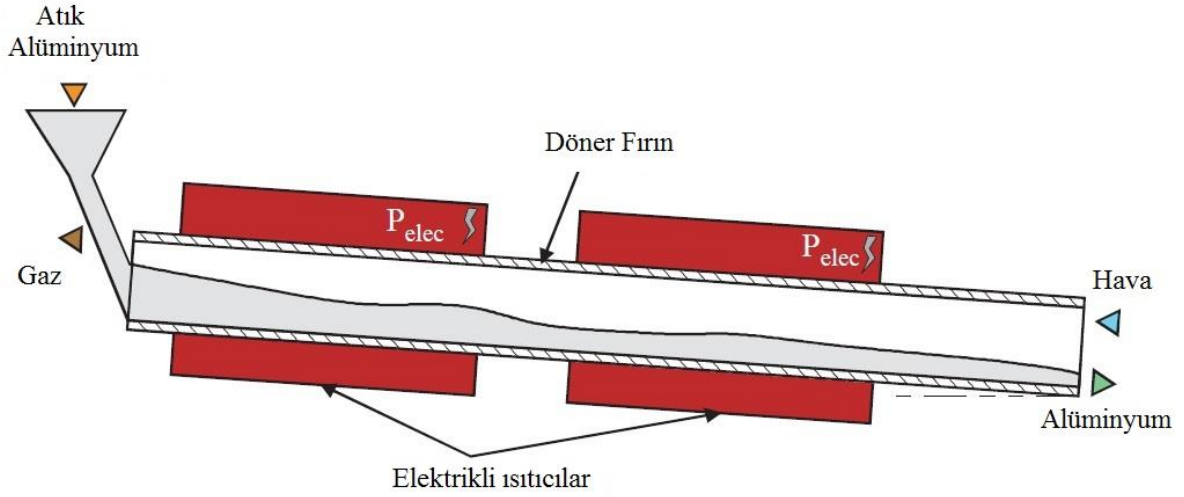
1.1.1.5. Döner Fırının Modellenmesi

Döner fırınlar, sıcak gazlardan yatak malzemesine enerji geçişini sağlayan ısı değiştirgeçleridir. Fırın boyunca ilerleyen sıcak gazlar, yatak malzemesini arzu edilen amaca göre işlenmesini sağlamaktadır. Bu işlemler fırının kullanım amacına göre değişkenlik göstermektedir. Fırın içerisinde yatak malzemesinin, amaca yönelik olarak kimyasal reaksiyonun sağlanmasını, ısıtılması ve kurutulması gibi birçok işlem gerçekleştirilebilir. Sıcak gazlar ve yatak malzemesinin doğrudan teması söz konusu olmayan ve özel amaçlar için kullanılan döner fırınlar mevcut olsa da, genelde yatak malzemesi ve sıcak gazlar doğrudan temas halindedir. Örneğin çimento sektöründe yoğun olarak kullanılan ve sıcak gazlar ve yatak malzemesinin doğrudan teması söz konusu olan bir döner fırın, Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



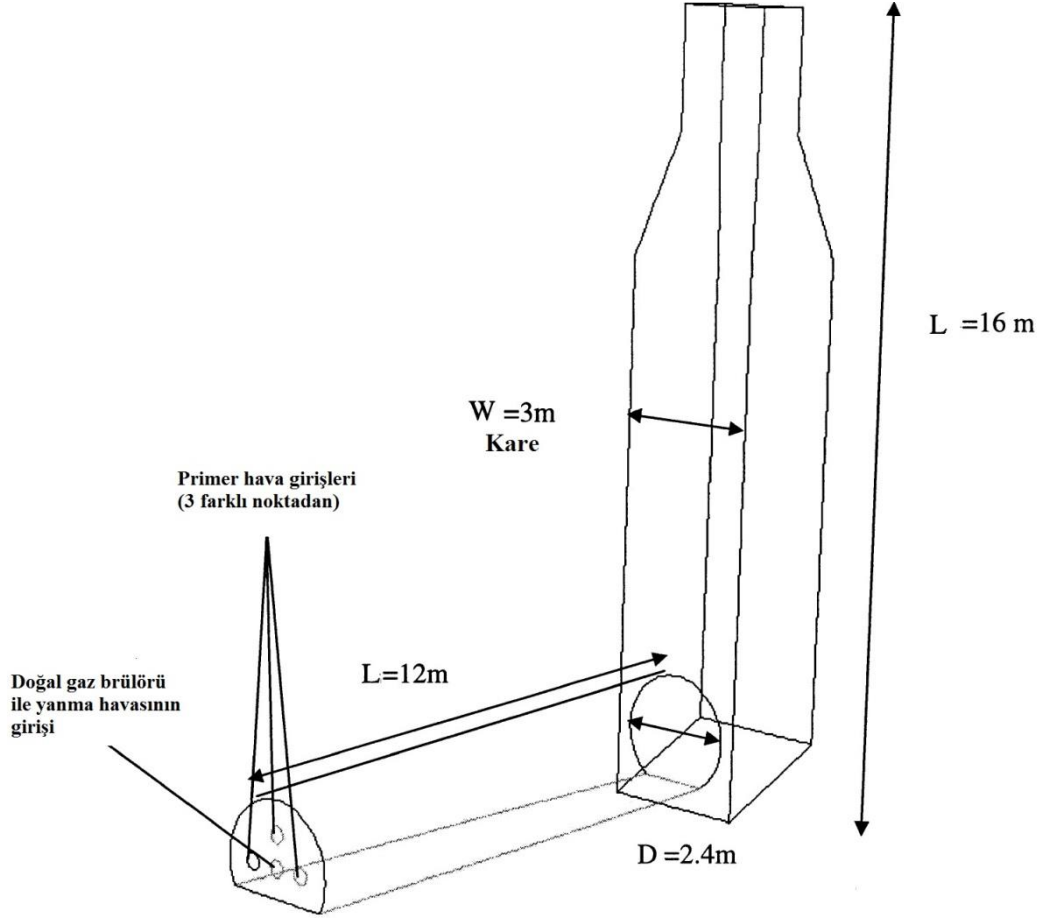
Şekil 1.1. Çimento sektöründe kullanılan döner fırının şematik gösterimi [53]

Marias ve diğerleri [54] atık alüminyum atıklarının geri dönüşümü için kullanılan bir döner fırının matematiksel modellenmesi üzerine çalışmıştır. Bu model temelde, fırın içerisinde akan atık alüminyumun oluşturduğu yatak malzemesinin tanımlanması, fırın içerisinde geçen gazların ve ısı transferinin incelenmesi tanımlanmıştır. Kütle ve enerjinin korunumu ilkeleri temel alınarak, yatak malzemesi, çevre ve fırın arasındaki ısı transferinin matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisinde, yanma sonucu olan sıcak egzoz gazlarının hareketi paket veya ticari yazılım olarak adlandırılan Fluent ile çözümlenmiştir. Modellenen sistemin şematik görünüşü Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Egzoz gazlarının modellenmesinde, $k - \epsilon$ türbülans modeli seçilmiştir. Aynı zamanda, sistemin kimyasal reaksiyonlarında 7 madde (CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) göz önüne alınmıştır. Türbülans-yanma etkileşiminde olasılık yoğunluk fonksiyonu ve son olarak ışınlımda ise ayırık ordinat modeli kullanılmıştır.

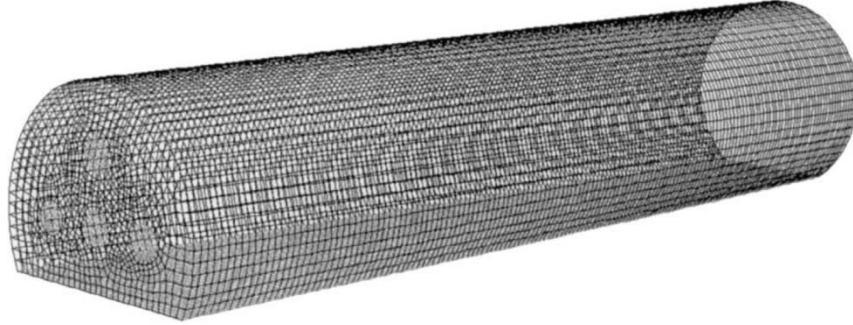


Şekil 1.2. Modellenen sistemin tasarımı [54]

Marias [55], çöplerin yakılması amacı için kullanılan döner fırın çalışmasında yeni bir gelişme sunmuştur. Fırın iki kısma ayrılarak modellenmiştir. İlk kısımda, kentsel katı atıkların oluşturduğu yanan yatak malzemesinin oluşturduğu fiziksel ve kimyasal işlemlerin tanımlanması için oluşturulmuştur. Yatak malzemesini oluşturan kentsel katı atıklar sadece tahta, karton ve PVC'den oluştuğu varsayılmıştır. Bu model temelde katı atığın yanmasındaki mikroskobik piroliz kinetiği varsayımına dayanmaktadır. Diğeri ise yanma odasında, yanma sonrasında ve döner fırın içerisinde gaz fazındaki materyal de meydana gelen oluşumların tanımlanması için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanmıştır. HAD uygulamasının kullanılmasında türbülans, yanma ve ısıtım parametreleri belirlenmiştir. Oluşturulan iki model arasında bilgi değişimini otomasyon sistemlerine tanımlamak için bir bilgi işleme aracı oluşturulmuştur. Elde edilen bazı sonuçlar, iki farklı durumda göstermiştir. Yazarın oluşturduğu HAD modelde, türbülans, kimyasal maddelerin transferi ve reaksiyonu, türbülans ve yanma arasındaki etkileşimi ve ısı transferi (ısıtım) oluşumlarına odaklanılmıştır. HAD 'de modellenen geometri ve ağ yapısı Şekil 1.3 ve 1.4'de gösterilmiştir.



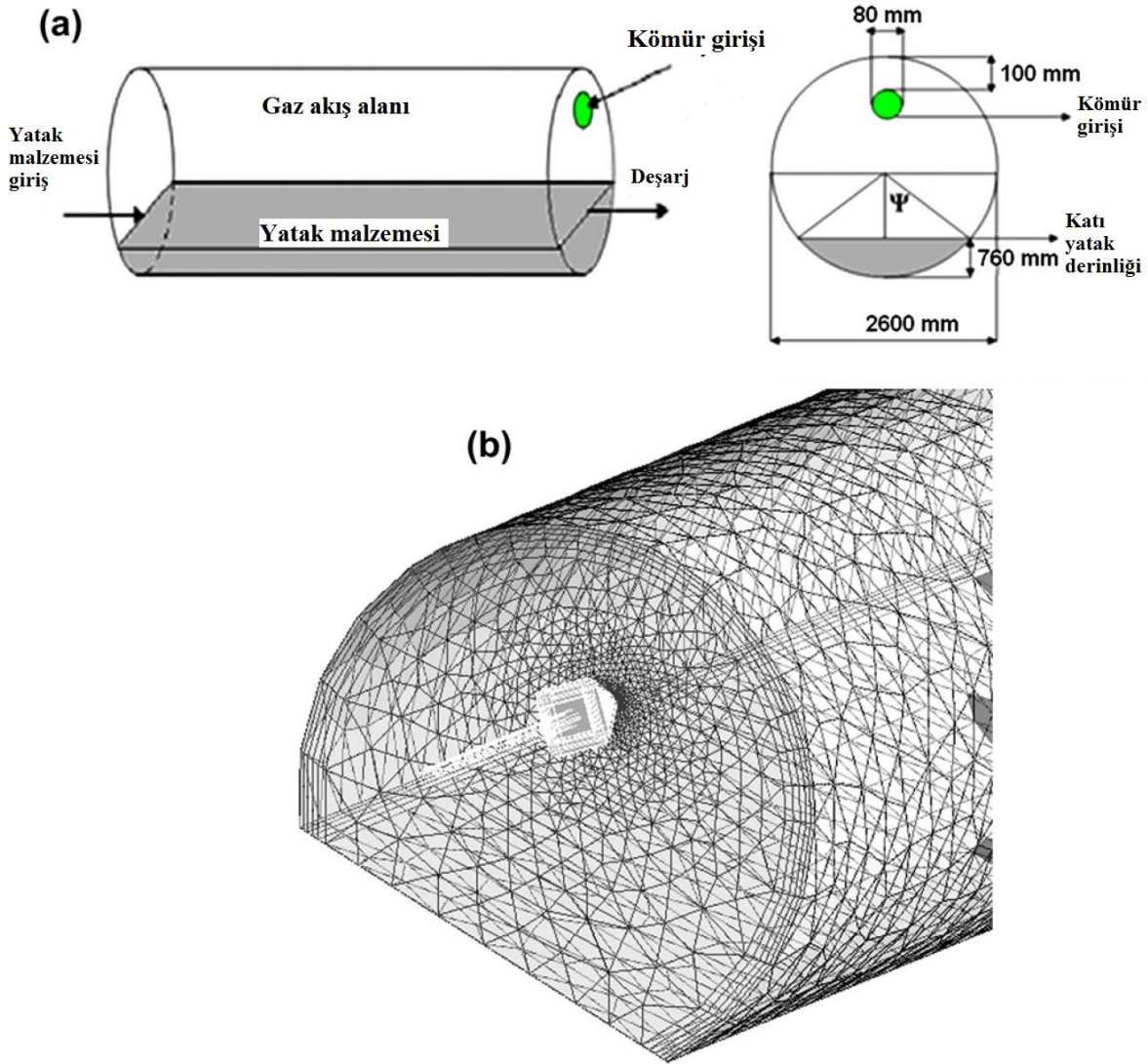
Şekil 1.3. Fluent'te kullanılan geometri [55]



Şekil 1.4. Döner fırının yüzeyine uygulanan ağ yapısı [55]

Manju ve Savithri [56], yaygın olarak kullanılan bir döner fırın içerisinde yanma ve pinömatik kömür püskürtme işlemi, iki fazlı bir akış yaklaşımı teorisi kullanılarak modellemişlerdir. Türbülanslı akışın fiziksel ve kimyasal oluşumu, multi fazlı bir Eulerian-Lagrangian HAD yaklaşımı kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

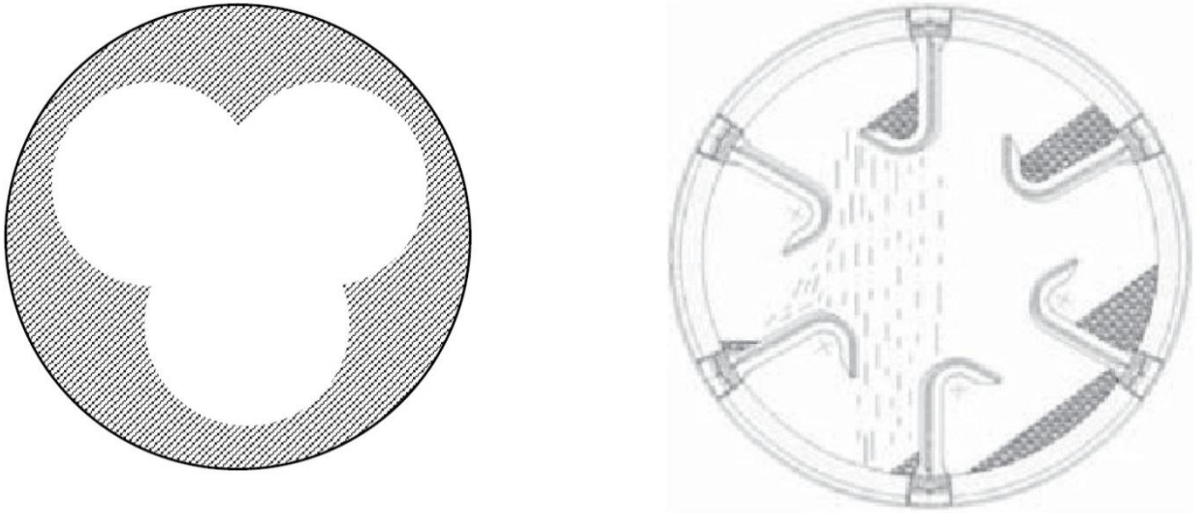
$k - \epsilon$ türbülans modeli ile Navier-Stokes eşitlikleri, sabit şartlarda ortalama Reynolds sayısı, üç boyutlu olarak, gaz fazındaki materyallerin molar fraksiyon sayıları, entalpi, türbülans yayılım oranı, türbülans kinetik enerji, momentum ve türbülanslı akış için çözümlenmiştir. Çalışmada, ANSYS-CFX 11.0, nümerik sonuçların elde edilmesi için kullanılmıştır. Kömürün enjekte edildiği geometri ile döner fırının şematik görünüşü ve hesaplamalı ağ yapısı Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Kömürün enjekte edildiği geometri ile döner fırının şematik görünüşü ve hesaplamalı ağ yapısı [56]

Katı yakıtların parçacık boyutu üzerine araştırmaların yanı sıra, yatak malzemesinin parçacık boyutu ve fırın içerisindeki hareketi üzerine yapılan modellerde mevcuttur. Yatak malzemesinin döner fırın içerisindeki hareketi çok önemli bir parametredir.

Döner fırın içerisinde yatak malzemesinin fırının eksenine yakın olması için sıcak gazların döner fırın boyunca geçtiği hacim içerisinde ısıtılması amacı ile karıştırıcılar kullanılmaktadır. Bu karıştırıcıların tasarımı, döner fırının hızı ve yatak malzemesinin parçacık boyutu üzerine sayısal ve deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Döner fırın içerisindeki karışımı daha iyi sağlayarak, sıcak gazlar ile yatak malzemesi arasındaki ısı transfer mekanizmaları iyileştirilmektedir. Döner fırınların verimine olan etkileri bakımından iç tasarımı çok önemli bir yer tutmaktadır. Döner fırınlar, içerisinde daha iyi bir karışım elde etmek amacıyla ve yatak malzemesinin aksenel akışı için farklı iç tasarımlar ve karıştırıcılar eklenebilir. Şekil 1.6’da farklı iç tasarımı ile yonca tip fırın ve J-tipi karıştırıcılara sahip döner fırınlar görülmektedir.



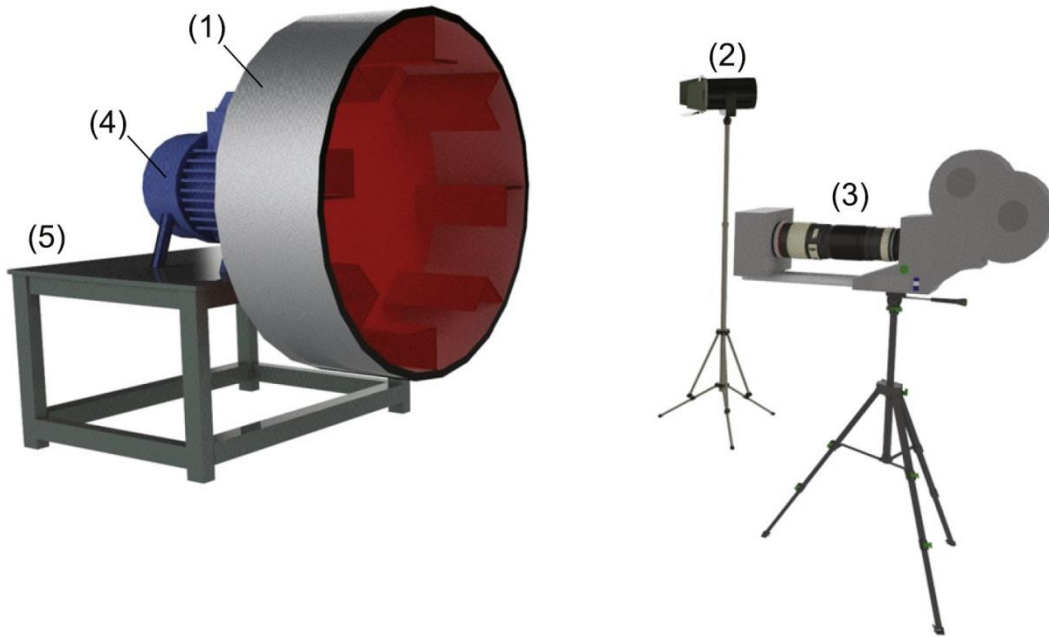
Şekil 1.6. Yonca şeklindeki döner fırının iç tasarımı ve J-tipi karıştırıcılar [57]

Fırının iç tasarım parametreleri, fırın içerisindeki ısı transferini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, fırından çıkan gazların sıcaklığı ve işlenen malzemenin sıcaklığı arasındaki fark ne kadar fazla olursa, fırın içerisinde iyi bir ısı transferinin gerçekleşmediği görülmektedir. Fırının içerisindeki sıcak gazlar ve yatak malzemesinin fırından çıkarken aynı sıcaklık değerine ne kadar yakın ise fırın içerisindeki ısı transferinin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Yapılan bazı çalışmalar da önce ve sonra olmak üzere bir değerlendirme yapıldığı zaman, bu durum, ısı transferinin iyileştiğini açık bir şekilde göstermektedir. Sıcak gazların fırından çıkış sıcaklıkları, fırın içerisinde her hangi bir karıştırıcı kurulmadan önce 922 K’dir.

Fırın içerisine kurulan karıştırıcılar sayesinde, sıcak gazların sıcaklığı 660 K'e düşürülmüştür. Bu durum % 39'luk bir değişimi işaret etmektedir [57].

Deneyisel araştırmalardan ziyade sayısal analizlere yer verilmesinden dolayı sadece bir deneyisel analize yer verilmiştir.

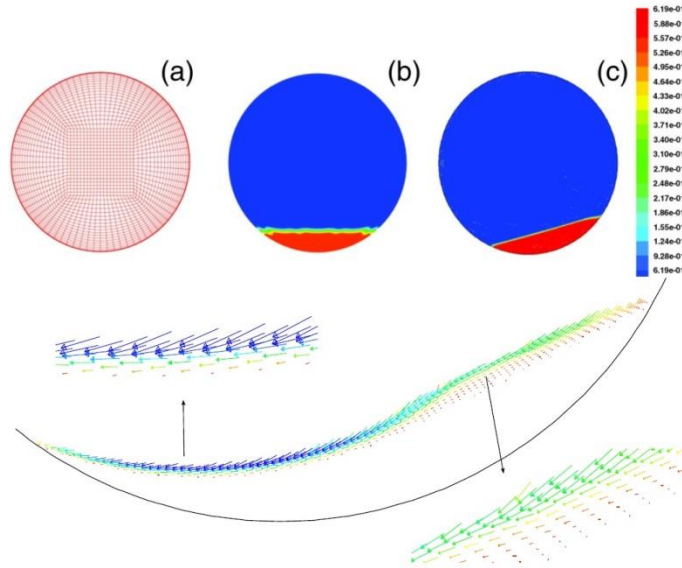
Döner bir tambur içerisine yerleştirilen kanatçıklar ile tanecikli bir materyali kurutmak için kullanılmıştır. Kanatçıkların tasarımı çok önemli bir görev üstlenmektedir. Döner tambur içerisindeki malzemenin dağılımı, bu kanatçıklara bağlıdır. Kanatçıkların döner tambur zemininden aldığı malzemeyi tutması ve boşaltması ile birlikte kanatçıkların dönmesi ile ilgili matematiksel bir model geliştirilmiştir. Deneyisel çalışmada kullanılan tamburun uzunluğu 150 mm ve çapı 500 mm'dir. Tambur içerisinde karıştırıcı olarak kullanılan, L şeklinde 12 kanatçık yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 1.7'de gösterilmiştir [58].



Şekil 1.7. Deney düzeneği: 1) tambur, 2) ışık, 3) kamera, 4) elektrik motoru, 5) masa [58]

Bir başka çalışmada, dönen bir silindir içerisinde dönen yatak kumunun karakteristik akışı üzerine bir deneyisel çalışmadan sıcak tel anemometresi ile gaz akışının hız alanı ölçülmüştür. Yapılan ölçümlere göre; hız alanının yatak malzemesinin dik çapına göre asimetrik olduğu bulunmuştur. HAD analizleri de bu bulguları doğrulayıcı nitelikte olduğu gösterilmiştir. Gaz hız profili, gazdan katıya ısı transferini belirlemede kritik bir öneme sahiptir. Problemin HAD analizlerinde CFX paket programı kullanılmıştır.

Yatak malzemesinin fırın içerisindeki hareketi, ısı transferi ve malzemenin fırın içerisinde ilerlemesi açısından önemli bir parametredir. Döner bir silindir içerisindeki parçacık hareketinin izlenilmesi üzerine yapılan araştırmalar ile endüstriyel uygulamalar olan döner fırınlar içerisindeki parçacık hareketini yansıtamayacaktır. Deneysel olarak döner bir tambur içerisindeki parçacık hareketini, bir önceki literatürde tartışılmıştır. Karıştırıcı ve buna benzer elemanların olmadığı silindirler içerisindeki parçacık hareketi üzerine yapılan deneysel analizler de mevcuttur. Bu deneysel analizler ile ticari boyutlarda ve çeşitli amaçlarda endüstride kullanılan döner fırınlar içerisinde meydana gelen parçacık hareketi arasında bir benzeşim olmamaktadır. Sonuç olarak deneysel olarak elde edilen parametreler ışığında bir tahmin yürütmek veya benzeşim kurmak oldukça zordur. Demagh et al. [59], endüstriyel boyutlardaki bir fırın içerisindeki parçacık hareketini tanımlamak amacı ile döner silindirlerdeki yüzey parçacık hareketi üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, döner bir silindir içerisindeki granül viskoz akışının reolojisi ve dinamik karakteristikleri gibi parametreler incelenmiştir. Fluent paket programı kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçların gerçek boyutlarda bir çimento fırınında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışılan geometriye ait bilgiler Şekil 1.8’de gösterilmiştir.

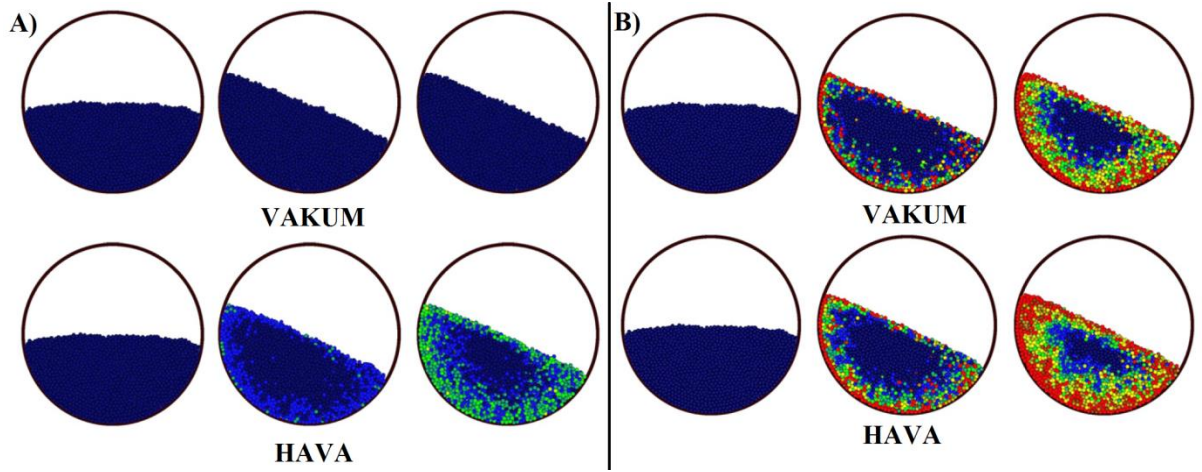


Şekil 1.8. (a) ağ, (b) ilk durum, (c) 77. Saniyedeki dağılım ve aktif tabakanın şekli [59]

Sıcak gazlardan yatak malzemesine olan ısı transferinin yanı sıra, döner fırın kabuğunun belirli bir ısı depolamasından dolayı meydana gelen ısı iletimi, yatak malzemesinin (katı) gözenekli bir yapıya sahip olmasından dolayı, yatak malzemesi içerisinde meydana gelen ısı transferinin modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar önemlidir. Çünkü, yatak malzemesinin ısıtılmasındaki amaca hizmet eden önemli problemdir. Yatak malzemesinde, parçacıkların bir biri ile teması söz konusu olduğundan iletim, parçacıktan parçacığa ışıyım, gözenekli yapıdan dolayı taşıyım, fırın yüzeyinden yatak malzemesine iletim, sıcak gazlardan yatak malzemesine taşıyım ve ışıyım ısı transfer mekanizmaları gerçekleşmektedir. Genelde yapılan araştırmalarda, yatak malzemesine olan ısı transferinde sıcak gazlardan yatak malzemesine (gaz-katı) olan ısı transfer mekanizmaları önem kazanmıştır. Fakat bu durum, yatak malzemesinin termofiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Yatak malzemesinin ısı iletim özelliği iyi olduğu takdirde yatak malzemesinde meydana gelen ısı transferinde, katı-katı durumu daha fazla önem kazandığı belirlenmiştir. Homojen olmayan ağ yapısının kullanılması, daha verimli bir analizin gerçekleştirilmesi için arzu edilmektedir. Problemin ağ yapısı iyi olduğu takdirde, daha doğru bir çözüm elde edilir.

Yatak malzemesinde meydana gelen ısı transferinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmanın yanı sıra, parçacık boyutu, farklı malzemeler ve döner fırının dönme hızının da, yatak malzemesindeki ısı transferine olan etkileride incelenmiştir.

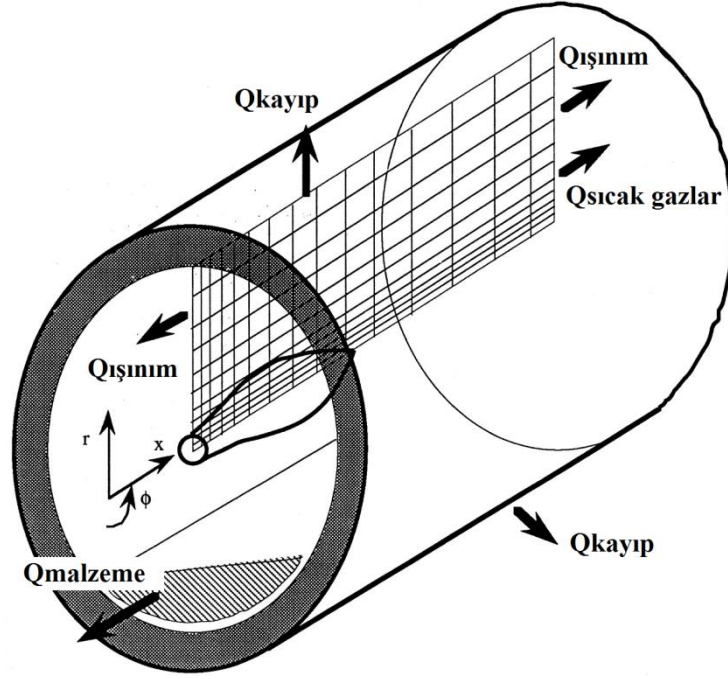
Yapılan analizde yatak malzemesi olarak cam ve alüminyum parçacıkları kullanılmıştır. 0, 15 ve 30. saniyelerde, vakumlu ve hava ortamında, yatak malzemelerinde meydana gelen sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir. Araştırmacılar tarafından elde edilen veriler Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Cam parçacıkları (a), Alüminyum parçacıkları (b) [60]

Şekil 1.10-b’de gösterildiği gibi alüminyumun ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı daya iyi bir ısı transferi meydana geldiği görülmektedir. Vakumlu ve hava ortamında analizlerin gerçekleştirilmesindeki amaç; katı-katı ve gaz-katı durumundaki ısı iletiminin etkinliğini belirlemektir. Vakumlu ortamda sadece katı-katı ısı iletimi gerçekleşmektedir.

Mastorakos vd. [61] gerçek çalışma şartlarında çalışan döner fırın prosesinin, klinker için kimyasal reaksiyonların içerdiği, enerjinin ve maddenin korunumu eşitliklerinin çözümünde özel bir kod ve fırın duvarlarında enerji eşitliği için sonlu hacim, yüksek sıcaklıktaki gazlardan yayılan ışıma için Monte Carlo ışıma modelini içeren ticari bir asimetrik HAD kodu ile modellenmiştir. Klinker ve fırın sıcaklığı, fırın duvarlarına olan ışıma ısı akısı, gaz fazındaki maddelerin sıcaklık alanlarının tahmin edilebilmesi için izlenen iteratif prosedür, fırına giren ısı akısının hesaplanmasını içeren ve fırının iç duvarlarının sıcaklık dağılımının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Sıcak gazlardan yatak malzemesine ve fırın duvarlarında ışıma ile ısı transferi daha baskın olmaktadır. Duvarlardan çevreye olan ısı transferi veya ısı kayıpları toplam giren ısıya % 10’nu oluşturmuştur. Analizleri yapılan döner fırının içerisinde gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları ve fırının koordinat sistemi ile birlikte görünüşü Şekil 1.10’da gösterilmiştir.



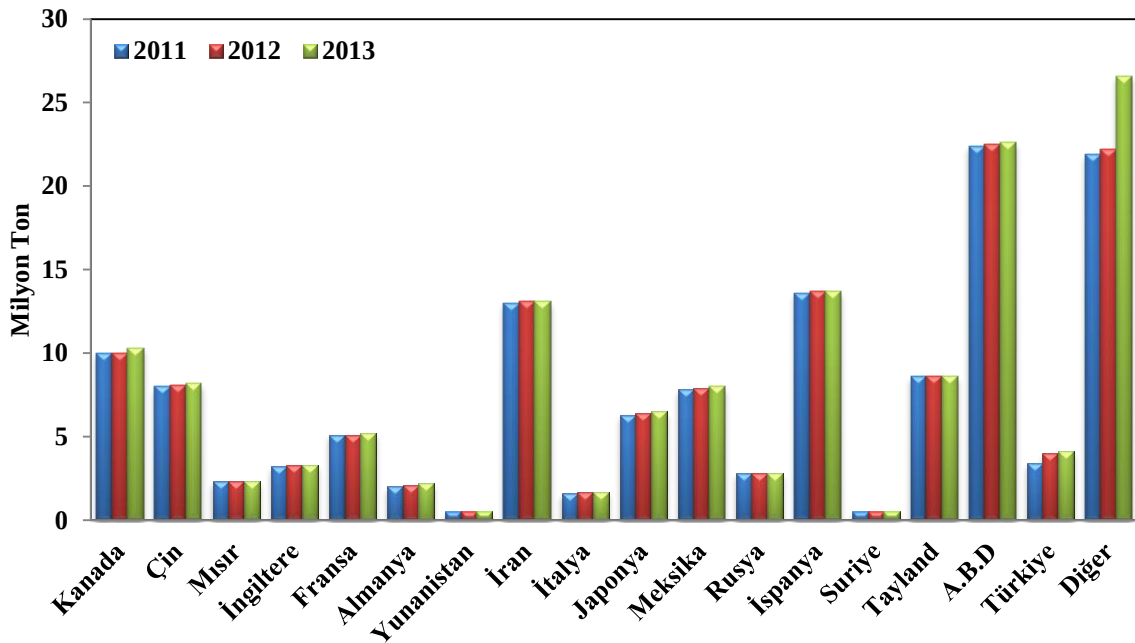
Şekil 1.10. Döner fırın prosesinin enerji dengesi ve modellemesi gerçekleştirilen geometri [61]

Daha önce vurgulandığı gibi çimento sektöründe klinker üretimi için yoğun bir şekilde kullanılan döner fırın prosesleri, çimento üretiminde önemli bir prosesdir. Enerjinin yoğun olarak tüketildiği bu proseslerin amaca yönelik olarak ve enerji verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla, literatürde çeşitli modeller mevcuttur. Bu modellerin amacı, fırın içerisinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayları daha iyi anlayama çalışarak, döner fırınları amaca yönelik olarak optimize etmeyi hedefler. Ürün kalitesinden taviz vermeden amaca yönelik olarak daha iyi bir işlemin gerçekleştirilmesi arzu edilmektedir.

Enerji tüketiminde alçı sektörünün profilinin çizilmesi tez kapsamındadır. Bu alçı sektörünü enerji bakımından, farklı endüstriyel sektörler arasındaki yerini belirlememiz açısından önemlidir. Tezin giriş bölümünün de, alçı ve perlit sektörü hakkında bilgi verilecektir. Bu sektörlerin dünya ve Türkiye'deki pazarı ve yıllık üretim kapasitesi gibi sektörün gelişimini gösteren bilgiler paylaşılacaktır.

1.2. Alçı Sektörü

Enerji tüketiminde, alçı sektörünün tanımını, çimento sektöründen yararlanarak yapabiliriz. Çimento sektörü üzerine yapılan farklı analizler sayesinde sektörün enerji verimliliği, tasarruf potansiyeli, sera gazı ve çevreyi kirletici etkileri, çimento sektörünün tükettiği enerji belirlenerek daha çevreci ve daha az enerji tüketen bir sektör konumuna getirilmesi için çaba harcanmaktadır. Aynı perspektif de alçı sektörü üzerine gidilmemektedir. Bunun nedeni ise çimento sektöründe tüketilen enerji miktarının çok yüksek, alçı da ise daha düşük miktarlarda gerçekleştiği düşünülmektedir. Türkiye’de ve Dünya’daki alçı üretimi Şekil 1.11’de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Ülkelerin yıllara göre alçı üretimi [62]

Alçı, tuğla üretiminde kullanılan enerjinin yarısı, çimento üretiminde kullanılan enerjinin ise 1/5'ni kullanılarak elde edilmektedir. Alçının üretimi aşamasında alternatif ürünlere kıyasla çok daha az enerji kullanılır. Bir ton alçı üretmek için 30 litre fuel-oil gerekirken, 1 ton tuğla üretmek için bunun 60 litre, bir ton çimento için 150 litre fuel-oile ihtiyaç vardır. Emsali olan diğer inşaat malzemelerinden, örneğin kireç 900 °C, çimento 1000 °C' de, alçı ise 90-120 °C' de elde edilir [63].

Alçı taşının dehidrasyon işlemi esnasında, alçının 90-120 °C' de elde edilmesi, alçının işlendiği ünitenin (döner fırın prosesleri) tasarımına bağlı olarak ve alçı taşının her bölgede farklı özellikler göstermesi (alçı taşının bünyesinde bulunan kristal su miktarının istenilen düzeyde buharlaştırılması için daha yüksek sıcaklıklara çıkarılabilir) ile değişebilir.

Alçı sektörünün çimento sektörüne nazaran daha az enerji tüketmesi, enerji kayıplarının önemsenecek derecelerde olacağı anlamına gelmemektedir. Türkiye’de, 2010 yılında çimento sektörü 62 milyon ton çimento üretimi için, 4.629.000 TEP enerji tüketerek gerçekleştirmiştir. Alçıda ise, 2010 yılın da 2,5 milyon ton alçı üretimi için, 50.000.000 m³ doğal gaz tüketilmektedir. 50.000.000 m³ doğal gaz (yoğunluğu 0,717 kg/ m³) 35.850 ton doğal gaz demektir, buda 29.576,25 TEP’e eşdeğerdir. Eğer 62 milyon ton alçı üretimi gerçekleştirilmiş olsaydı, 733.491 TEP enerji harcanması gerekecektir. Buradan yola çıkarak çimento ve alçı üretimi için tüketilen enerji miktarı kıyaslandığı zaman, alçı üretmek için harcanan enerjinin 6,31 katı fazla enerji ile çimento üretimi gerçekleştirileceği ortaya çıkmaktadır. Bu varsayımlar, ileride yapılacak olan analizler ışığında varılan sonuçlardır. Alçı fabrikalarında, perlitli sıva alçısı üretimi için perlit genleştirme prosesi ve alçı taşının işlendiği döner fırın prosesleri, ısıl işlemlerin gerçekleştiği ünitelerdir. Perlit genleştirme veya patlatma ünitesi olarak adlandırılan bu proses de perlit işlenmektedir. Alçı üretiminde perlitli sıva alçısı üretimi için de doğal gazdan yararlanılmaktadır. Bu bakımdan alçı sektörü için doğal gaz ideal bir yakıttır.

Doğal gaz; havadan hafif, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Yer altında, petrolün yakınında bulunur. Yeryüzüne çıkarılışı petrolle aynıdır, daha sonra büyük boru hatları ile taşınır. Doğal gaz rezervlerinin 76 trilyon metreküpü (% 41) Orta Doğu ülkelerinde, 59 trilyon metreküpü (% 33) Rusya ve BDT ülkelerinde, 31 trilyon metreküpü (% 17) Afrika/Asya Pasifik ülkelerinde bulunmaktadır [65]. Türkiye bu enerjiyi ithal ettiği gibi yurt içi kaynaklardan da elde etmektedir. Ülkemizde 2012 yılı itibari ile üretilen doğal gaz miktarı 664 milyon m³, yurt içi üretilabilir doğal gaz rezervi 6,84 milyar m³’tür [65]. Türkiye’nin yıllara göre yurt içi kaynaklardan üretilen doğal gaz miktarı Şekil 1.12’de gösterilmiştir. Doğal gaz rezervlerinin neredeyse yarısına yakınının istikrarın olmadığı orta doğu ülkelerinde olması, meydana gelen teknik aksaklıklar, boru hatlarına yapılan sabotaj ve savaşların, doğal gaz fiyatları ve temininde problemlere neden olması, doğal gazı ithal eden ülkeleri olumsuz bir şekilde, ülke ve küresel ekonomileri ise doğrudan etkilemektedir.

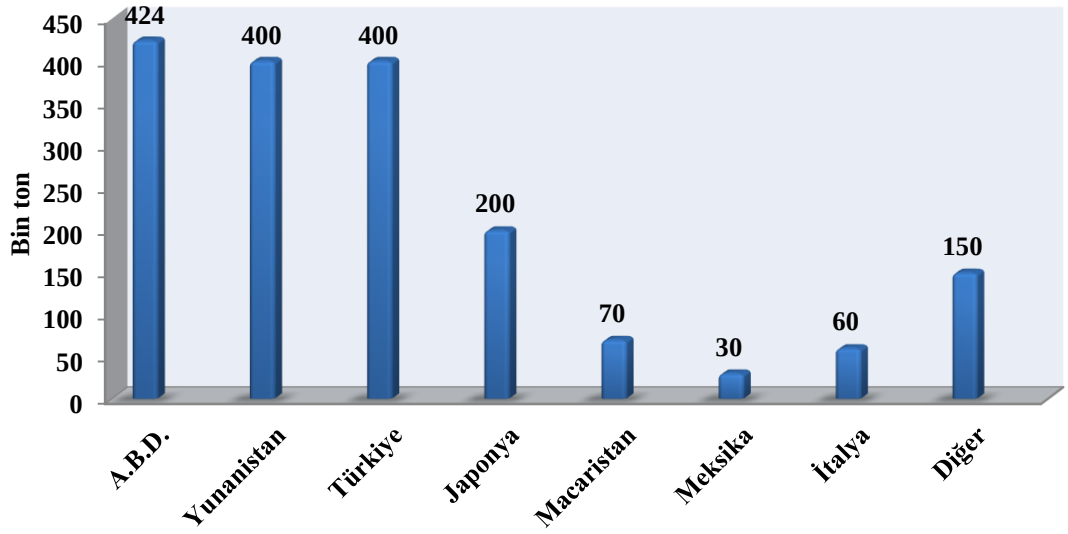


Şekil 1.12. Yıllar itibariyle Türkiye doğal gaz üretimi [66]

Alçıtaşı potansiyeli barındıran bölgelerde doğal gazın bulunmamasından dolayı, doğalgazın çoğunlukla ithal edilen bir yakıt olması, sektörün büyümesini ve yapılması gereken yatırımların gecikmesine veya yapılmamasına neden olmuştur. Buna rağmen Doğal gazın, alçıtaşı bakımından zengin olan bölgelerde olmaması, bu bölgelerde doğal gaz yerine sıvılaştırılmış doğal gazdan (LNG) yararlanılmaktadır. LNG, Afrika ülkelerinden ithal edilen ve gemiler vasıtasıyla taşınan sıvılaştırılmış doğal gazdır. Tezde kullanılan teknik ifadeler, alçı sanayinde kullanılan ve Alçıder tarafından kabul edilmiş ifadelerdir.

1.3. Perlit Sektörü

Alçı fabrikalarında sadece alçı üretimi gerçekleştirilmemektedir. Alçının yanı sıra perlitli sıva alçısı üretimi içinde perlit genleştirme üniteleri kullanılmaktadır. Şekil 1.13’de önemli perlit üreticilerinin 2012 yılı verileri gösterilmiştir.



Şekil 1.13. 2012 yılında ülkelere göre perlit üretimi [67]

Dünya genelindeki önemli perlit üreticilerinden biri olan Türkiye, A.B.D’nin ardından Yunanistan ile birlikte en fazla perlit üretimi gerçekleştiren ikinci ülke konumundadır. Alçının ve perlitin işlenmesine ilişkin detaylı bilgi ve veriler, tezin bir sonraki bölümü olan materyal ve metot kısmında, ayrıntılı olarak verilecektir. Tezin giriş bölümünü perlit sektörü hakkındaki bilgilerin paylaşımı ile noktalayarak, materyal ve metot kısmında önemli verilerin paylaşımı sağlanacaktır.

2. MATERYAL ve METOT

Tezin materyal metot kısmında, alçı taşının ve ham perlitin işlenmesi, özellikleri, uygulama alanları tanımlanacaktır. Analizleri gerçekleştirilen fabrikanın hem alçı üretimi hem de perlit üretimindeki akış şemaları verilerek, sistemi oluşturan alt bileşenler tanıtılacaktır. Bu bölümün ilerleyen kısımlarında ise ekserji, eksergoekonomi ve döner fırının modellenmesinde kullanılan yöntem ve metotlar hakkında bilgi verilecektir. Analizlerde izlenen yöntem, kullanılan denklemler ve diğer önemli parametreler ile birlikte, tezin bulgular kısmında elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır.

2.1. Alçının İşlenmesi

Alçıtaşı tabiatta anhidrit, bassanit, jips, albatr, ipek jipsi ve selenit olmak üzere 6 şekilde bulunur. Doğal anhidrit susuz kalsiyum sülfattır. Doğada genellikle alçıtaşı ile birlikte yataklandığı görülür. Bazı ülkelerdeki sülfürik asit üretimi dışında yakın tarihlere kadar fazla bir kullanım alanı bulunamamıştır. Ancak son 30 yıldan bu yana kimya endüstrisinde ve inşaat malzemeleri yapımında önem kazanmış bulunmaktadır [68].

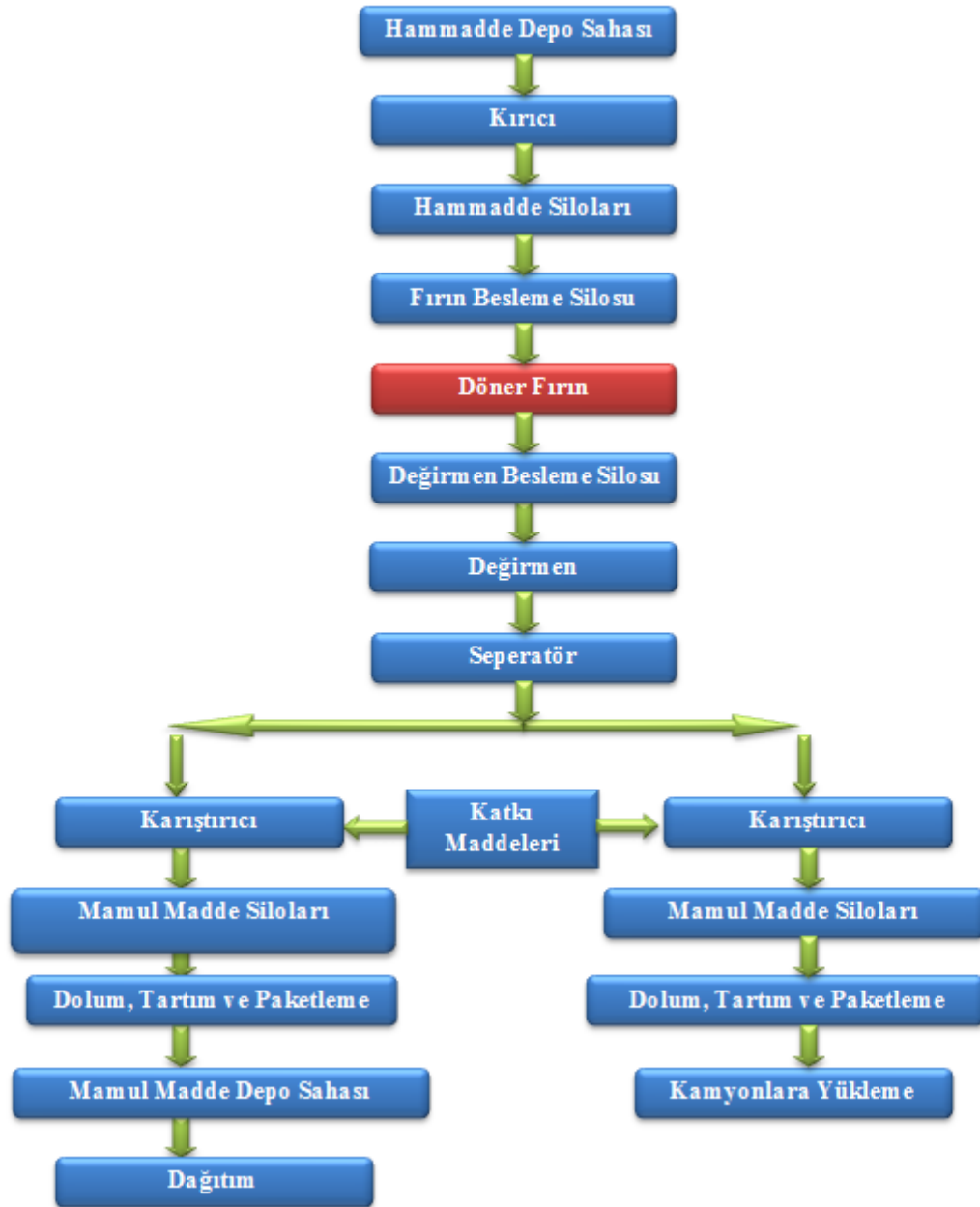
Alçı taşı (jips) doğal olarak oluşan ve bileşiminde iki molekül su bulunduran bir Kalsiyum Sülfat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mineralidir. Alçı taşının bünyesinde bulundurduğu su molekülünün % 15'i buharlaştırılacak şekilde, ısıtılması ve öğütülmesi ile alçı elde edilir. Alçı suyla karıştırılınca tekrar katılaşarak bağlayıcılık özelliği taşıyan bir yapı malzemesine dönüşür. Günümüzde alçı taşı kullanımında, genel toplamın % 5'i zirai amaçlı, % 10-15 kadarı ise endüstriyel kullanım olarak adlandırılabilir uygulamalarda tüketilmektedir. Geri kalan alçı taşının tamamı inşaat sektöründe kullanılan sıva alçısı, kartonpiyer alçısı, saten perdah alçısı ve makine sıva alçısı gibi toz alçı ürünleri ile yapı malzemesi olarak tüketilmektedir [69]. Alçı taşının işlenmesindeki moleküler formülü Eşitlik [2.1] ile verilmektedir [70].



Alçıtaşının işlenmesi (alçı taşının dehidrasyonu) esnasında kullanılan yakıtın cinsi önemlidir. Alçının sağlık, dekoratif amaçlı kullanımı gibi alanlarda tüketilmesinden dolayı renk kalitesinin, yani alçının beyazlığı çok önemlidir. Bu yüzden alçıtaşının işlenmesinde, alçı üzerinde yakıt atıklarının oluşturacağı kirliliğin söz konusu olmaması gerekir.

Bu yüzden imento sekt6r6nden farklı olarak, kullanılan yakıt çeşitliliği bakımından alçı sekt6r6ne kısıtlamalar getirmektedir. Bu bakımdan alçı taşının işlenmesinde doğal gaz ideal bir yakıttır [71].

Alçı sekt6r6, imento ve inşaat sekt6r6 ile paralel olarak ilerlemektedir. Daha 6ncede vurgulandığı gibi alçının birçok uygulama alanı olmasına rağmen, inşaat sekt6r6nde yoğun olarak t6ketilmektedir. Alçı taşının dehidrasyon işlemi, alçının d6ner fırın çıkışındaki sıcaklığını 155 ve 160  C aralığında gerçekleştirilmektedir. Fakat bu durum, alçı taşının farklı b6lgelerde, farklı 6zellikler sergilemesinden dolayı değişebilir. Bazı b6lgelerden elde edilen alçı taşının b6nyesinde bulunan su molek6llerinin miktarında değişkenlik g6zlemlenmiştir. Çimento end6strisinde yoğun olarak kullanılan d6ner fırınların uzunluğu 50 m iken, alçı sekt6r6nde kullanılan d6ner fırınların uzunluğu, yaklaşık olarak 25 m'dir. D6ner fırınların tasarımında, işlenen 6r6n6n istenilen sıcaklığa ulaşması 6nemli rol oynar. Analizleri gerçekleştirilen alçı 6retim tesisinin akış şeması şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Alçı üretimindeki akış şeması

Farklı alanlardan gelen alçı taşı, hammadde depo sahasında toplanmaktadır. Yatay kırıcıda, alçı taşının boyutu 10 mm ye kadar düşürmektedir. Hammadde depo sahası ve yatay kırıcı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Hammadde depo sahası ve yatay kırıcı

Yatay kırıcıdan çıkan alçı taşı, bant tipi taşıyıcılar ile hammadde silolarına doldurulmaktadır. Her biri 250 ton kapasitede hammadde silosu bulunmaktadır. Söz konusu silolar Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



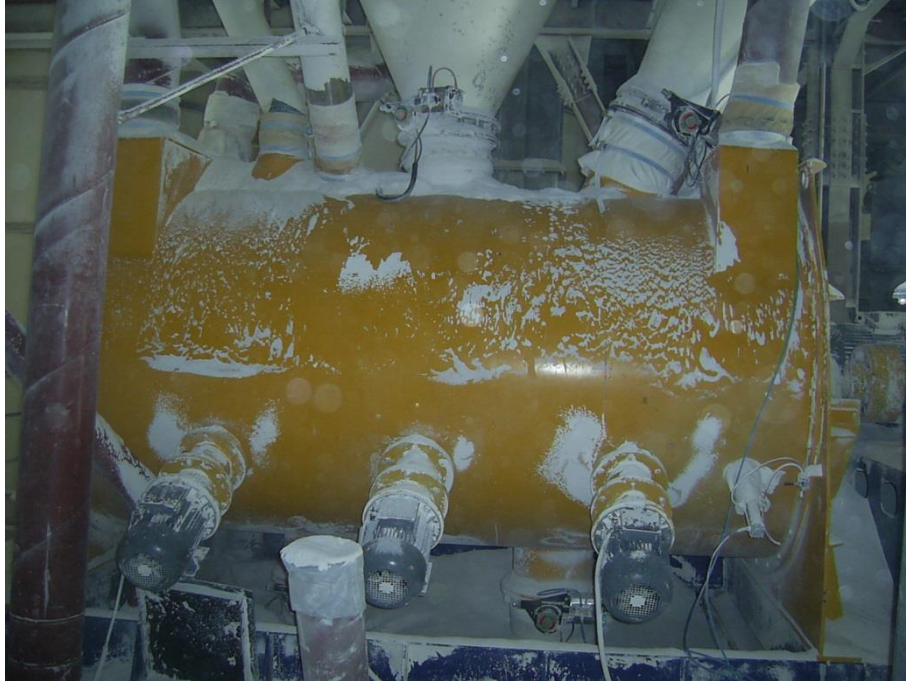
Şekil 2.3. Her biri 250 ton kapasitedeki hammadde siloları

Hammadde silolarında depolanan alçı taşının bir sonraki durağı, fırın besleme silosudur. Fırın besleme silosunun kapasitesi 20 tondur. Alçı taşı, fırın besleme silosu ile döner fırın girişi arasına yerleştirilen, bantlı bir ölçüm sistemi ile fırına giren alçı taşı miktarı belirlenmektedir. Alçı taşı, döner fırına 22 ton/h debide girmektedir. Döner fırına giren alçı taşının büyüklüğünün anlaşılabilmesi için Şekil 2.4’de alçı taşının fırın girişinden, çıkışından ve değirmen çıkışından alınan örneklerin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 2.4. A) Döner fırın girişi, B) Döner fırın çıkışı, C) Değirmen Çıkışı

Alçı taşının debisi, arz-talep durumuna göre değiştirilmektedir. İnşaat sektörünün yoğunlaştığı dönemlerde, döner fırın tam kapasite çalıştırılmaktadır. Yapılan analizler, fırının tam kapasite çalıştırıldığı zaman aralığı için yapılmıştır. Bunun nedeni ise fırının tam kapasite çalışma şartları altında elde edilecek verilerin daha önemli olması ve fırının verimini arttıracak parametrelerin, daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır. Aynı zamanda, döner fırın genellikle söz konusu olan kapasitede daha çok çalıştırılmaktadır. Alçı taşı, döner fırına çevre şartlarında girmektedir. Alçı taşına, döner fırının girişinden önce her hangi bir ön ısıtma uygulanmamaktadır. Döner fırından çıkan malzeme, alçı tozu, kalsiyum sülfat hemihidrat ya da kalsiyum sülfat yarı hidrat olarak adlandırılmaktadır. Döner fırından çıkan alçı tozu, öncelikle değirmen besleme silosuna, değirmene ve seperatöre gönderilmektedir. Seperatörlerden çıkan alçı tozu, karıştırıcılara gönderilmektedir. Söz konusu karıştırıcılar Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Karıştırıcı

Alçı tesisi, müşterilerine geniş bir ürün gamı sunabilmek adına, alçı tozuna farklı maddeler ekleyerek, farklı ürünler elde edilmektedir. Alçı tozuna karıştırılan maddeler ise perlit, kalsit, modifiye nişasta, tartarik asit, sitrik asit ve metil selilözlerdir. Bu katkı maddelerinin hangi ölçüde ve oranda alçı tozu ile karıştırıldığına dair bilgi paylaşımı söz konusu olmamıştır. Bu oranlar ve ölçütler, söz konusu tesisin patentli ürünü olmakla birlikte endüstriyel sır çerçevesinde değerlendirilmektedir. Alçı üretiminin akış şemasındaki en önemli işlem döner fırında gerçekleşmektedir.

Farklı açılardan çekilen döner fırına ait fotoğraflar, Şekil 2.6 ve 2.7’de verilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.6. Döner fırının yanma odası

Döner fırın, döner bölüm ve yansma odası olmak üzere iki bölümde ele alınmıştır. Yanma odasında, sadece doğal gaz yakılmaktadır. Bu bölümün tam bitiminde ise alçı taşının fırına girişi sağlanmaktadır. Bununla birlikte, yanma odasının tam bitimi ile döner bölümün başlangıç kısmı ve alçı taşının giriş bölümü aynı yerdedir.



Şekil 2.7. Döner fırının döndürülen bölümü

Analizleri yapılan döner fırından çıkan alçı tozunun sıcaklığı, 160 °C olarak ölçülmüştür. Döner fırın tam kapasitede çalıştırılmakta olup, üretim kapasitesi 22.8 ton/h olarak belirlenmiştir. Döner fırının yanma odasında, Şekil 2.9’da verildiği gibi 7.8 MW gücünde hem sıvı hem de gaz yakıtları yakabilen bir brülör bulunmaktadır. Döner fırının yanma odası, 6.7 m uzunluğundadır. Yanma odası, yalıtımı çok iyi yapılmamıştır. İlerleyen bölümlerde, analizlerden elde edilen sonuçlar ile daha detaylı olarak ele alınacaktır. Döner fırın içerisinde, yanma sonucu oluşan gazlar ile yatak malzemesi olarak nitelendirebileceğimiz alçı taşı doğrudan temas halindedir. Çimento sektöründe kullanılan döner fırınlardakinden farklı olarak, sıcak gazla ve yatak malzemesi aynı yönde hareket etmektedir. Döner fırının toplam uzunluğu 24.2 m olarak ölçülmüştür. Döner fırından çıkan egzoz gazlarında, bir miktar alçı tozu bulunmaktadır. Bu alçı tozunun çevreye atılmaması ve tekrardan üretim bandına geri kazandırılması bakımından bir filtre sistemi kullanılmıştır. Filtrede, egzoz gazları içerisinde bulunan alçı tozu ayrıştırılarak, üretim bandına gönderilmekte ve filtreden geçen egzoz gazları bacadan çevreye atılmaktadır.

Bacanın belirlenen bir kısmından, bir miktar baca gazı tekrardan döner fırına gönderilmektedir. Fırının yanma odasını üreten şirket ile yapılan görüşmelerde, baca gazı geri dönüşüm uygulamasının gerekli olduğu ve yanmamış hidrokarbonların yanmasına öncülük eden bir sistem olduğu vurgulanmıştır. Aynı zamanda, baca gazı geri dönüşümünün, alçı taşının yüksek sıcaklıklara maruz kalmaması için fırının soğutulması amacı içinde gerekli olduğu bilgisi alınmıştır. Döner fırının iç yapısına ilişkin detaylı bir ölçüm gerçekleştirilmiştir. Döner fırının modellenmesinde kullanılacak olan bu parametrelere ilişkin detaylı bilgi, tezin ilerleyen bölümlerinde verilecektir. Döner fırının iç yapısına ilişkin fotoğraflar ise aşağıda verilmiş ve fırının iç yapısı tanımlanmıştır.

Döner fırın, daha önce de bahsedildiği gibi iki bölümden oluşmaktadır. Döner fırının yanma odasının baş kısmında brülör yerleştirilmiştir. Şekil 2.8’de görülen brülör 7.8 MW gücündedir.



Şekil 2.8. Brülör

Brülörün tasarımı, hem gaz hem de sıvı yakıtların yakılmasına olanak sağlamaktadır. Yakıt esnekliği sunan brülör, daha önce de bahsedilen nedenlerden dolayı, sadece gaz yakıt kullanılmaktadır. Brülörün fırının içerisinden çekilen fotoğrafı Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Brülörün fırın içerisinden görünüşü

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi brülörün sıvı ve gaz yakıtların yakılabilmesi için iki farklı bölümden oluşmaktadır. Orta kısım sıvı yakıtların yakılabilmesi için dış kısımda görülen kanatçıklı yapıya sahip olan bölümde ise gaz yakıtların yakılabilmesi için tasarlanmıştır. Döner fırın belirli zaman aralıklarında bakımı yapılmaktadır. Brülörün bakımı iki ila üç yılda bir yapılırken, bütün olarak yapılan bakım daha kısa zaman aralıklarında yapılmaktadır. Döner fırının iç temizliğinin yapılabilmesi için yanma odasının sonlarına yakın bir bölgede bakım kapağı bulunmaktadır. Bakım kapağından döner fırın içerisine giren personel, fırın içerisine alçı taşı ile birlikte giren ve istenmeyen maddelerin temizliğini yapmaktadır. Döner fırının bakım kapağı Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Döner fırının bakım girişı

Döner fırın içerisinde yakılan hava yakıt karışımı, yanma odası içerisinde bir alev çekirdeği oluşturmaktadır. Bu alev çekirdeğinin doğrudan alçı taşına teması istenmemektedir. Bunun nedeni ise daha kontrollü bir dehidrasyon işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Yanma odasının iç yapısına ilişkin fotoğraf Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



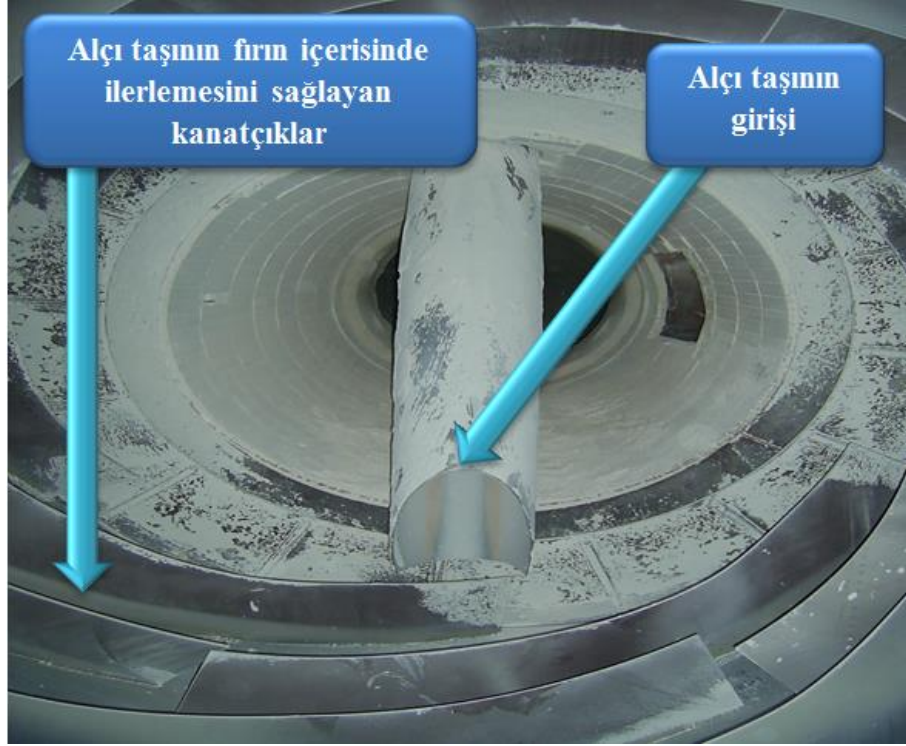
Şekil 2.11. Yanma odasının iç görünüşü

Yanmamış yakıtın yakılması için baca gazlarının bir kısmı tekrardan döner fırın içerisine gönderilir. Yanma odasını da kendi içinde bölümlere ayırırsak, alev çekirdeğinin olduğu bölüm, baca gazı geri dönüşüm bölümü, bakım onarım kapağının bulunduğu bölüm ve yanma odasının, döner fırın bölümü ile birleştirildiği bölüm olarak sınıflandırılabilir. Baca gazlarının, yanma odasına girişi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



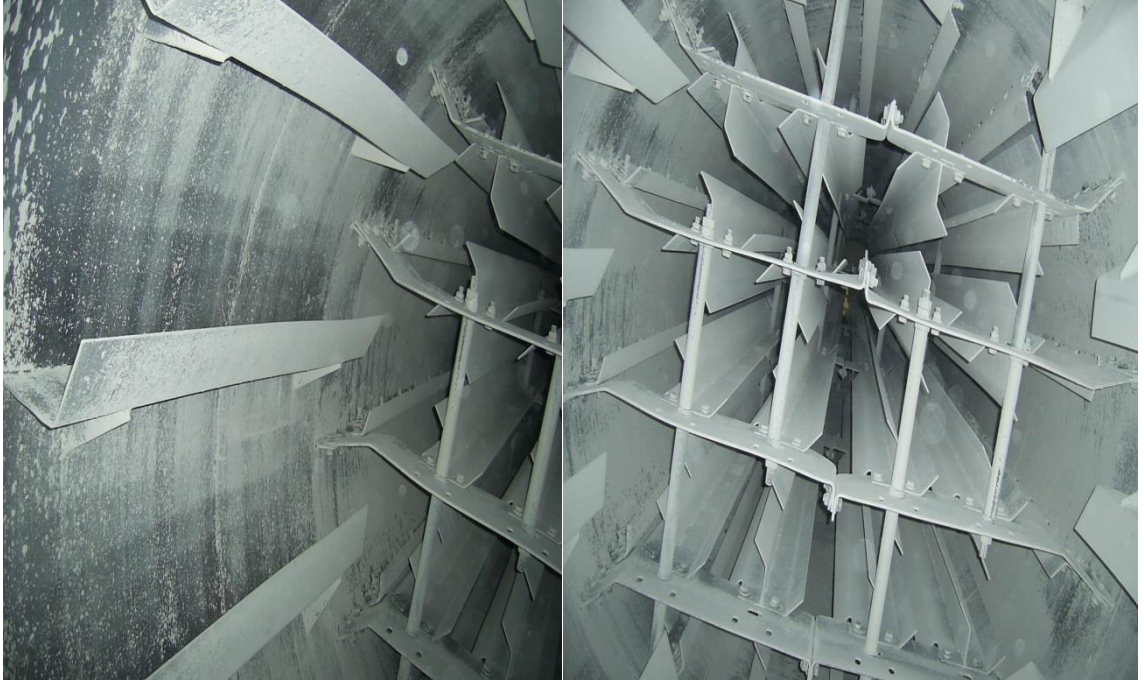
Şekil 2.12. Baca gazının fırına giriş bölümü

Baca gazı, yanma odasına açılan 8 adet delikten fırına girmektedir. Yanmamış yakıtın bu bölümde, yanma sıcaklığına ulaşarak yakılması hedeflenmektedir. Yanma odasının tam bitiminde, fırının döner bölümü başlamaktadır. Bu bölümde, alçı taşının fırına girişi sağlanmaktadır. Döner fırının döner bölümü, döner bölümün başlangıcı ve alçı taşının girdiği bölüm, alçı taşının fırın içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan kanatçık gibi bölümlere ayrılmaktadır. Döner fırının döndürülen bölümünün başlangıç ve alçı taşının fırına girdiği bölüm Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Alçı taşının fırına giriş bölümü

Alçı taşının giriş bölümünde, malzemenin fırın içerisinde ilerlemesini sağlayan kanatçıklar yerleştirilmiştir. Bu kanatçıkların görevi; malzemenin fırın içerisinde homojen bir şekilde dağılması için kullanılmamaktadır. Alçı taşının, fırın içerisine yerleştirilen karıştırıcı kanatçıklara doğru ilerlemesi için bu kanatçıklar kullanılmaktadır. Şekil 2.14’de döner fırının döndürülen kısmı içerisinde malzemenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan kanatçıklar görülmektedir.



Şekil 2.14. Döner fırın içerisine yerleştirilen kanatçıklar

Analizleri gerçekleştiren alçı tesisinde, perlitli alçı üretimi de yapılmaktadır. Bazı alçı üreten firmalar, genleşmiş perlitli farklı firmalardan temin etmektedir. Söz konusu tesise benzer işletmeler ise kendi perlitlerini kendileri üretmektedir.

2.2. Perlitin İşlenmesi

Perlit, magmanın asit fazında oluşan, lavların soğuyup gözle ve mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan volkanik bir cam türünü ifade eder. Ticari kullanımda ise perlit elverişli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında genleşen ve gözenekli bir hale gelen volkanik doğuşumsu (menşeli) ve doğal olarak oluşan asidik bir camdır. Perlit belirli bir tane iriliğinde özel formlarda 900-1100°C arasında ısıtıldığında hacmini yaklaşık 20 kat genişletmekte ve mısır gibi patlayarak yoğunluğu çok hafif bir hale gelmektedir. İnşaat perlitli, duvarlarda, çatılarda, taban ve tavanlarda, ara bölmelerde, kısaca ısı ve ses izolasyonu gereken her alanda muhtelif yöntemlerle kullanılmaktadır.

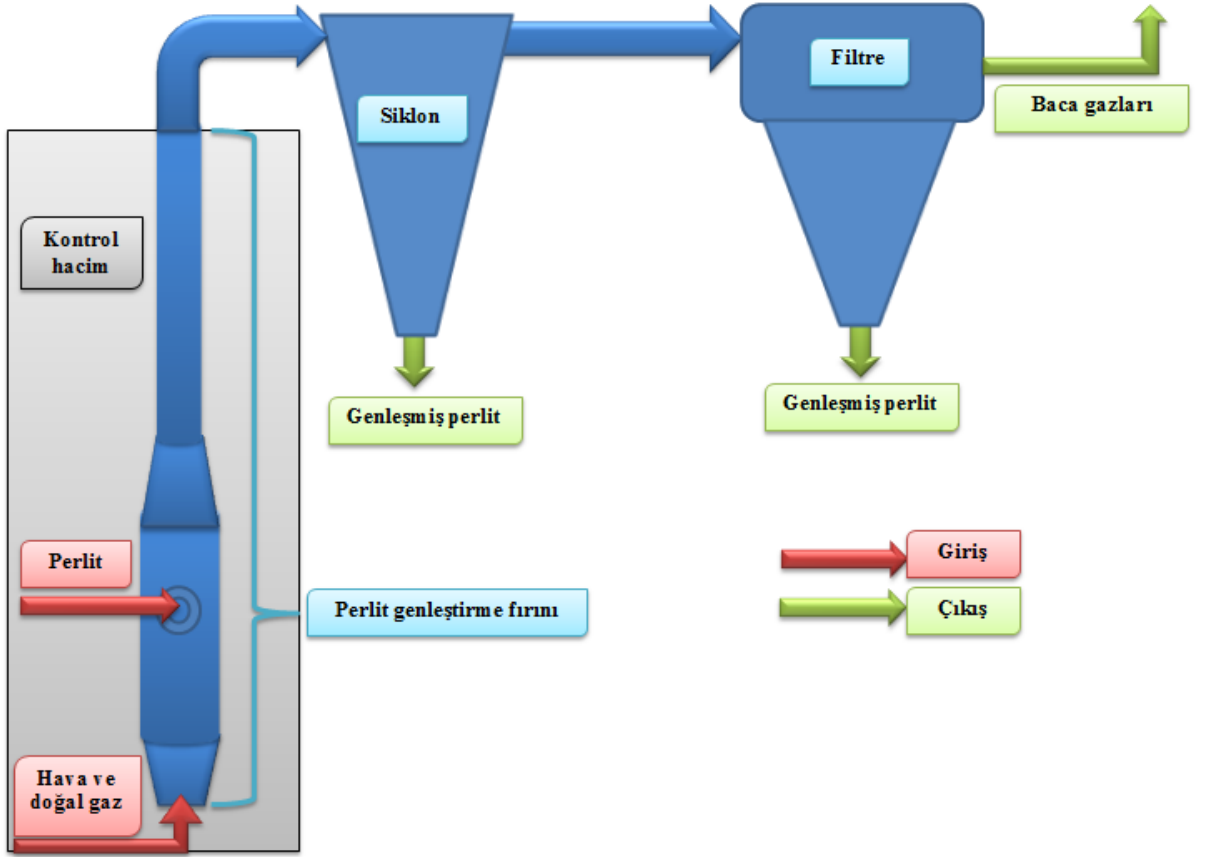
Isı yalıtımı olarak kullanıldığında önemli ekonomik kazanımlar sağlamaktadır [72]. Perlit aynı zamanda tank ve fırınların yalıtımında, döküm sanayinde ve tarım sektöründe de kullanılmaktadır. Perlitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri, Tablo 2.1 ve 2.2’de verilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen tesiste bulunan perlit genleştirme sisteminin akış şeması Şekil 2.15’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Perlitin kimyasal bileşenleri [73].

Bileşenler	Yüzdesel oranları (%)
SiO ₂	71.0–75.0
Al ₂ O ₃	12.5–18.0
Na ₂ O	2.90–4.00
K ₂ O	4.00–5.00
CaO	0.50–2.00
Fe ₂ O ₃	0.10–1.50
MgO	0.03–0.50
TiO ₂	0.03–0.20
MnO ₂	0.00–0.10
SO ₃	0.00–0.10
Cr	0.00–0.10
Ba	0.00–0.10
PbO	0.00–0.50
FeO	0.00–0.10

Tablo 2.2. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri [74].

Renk	Beyaz
Erime noktası	1300 °C
Özgül ısı kapasitesi	0.8371 kJ/kg.°C
Birim ağırlığı	2.2-2.4 g/cm ³
Yoğunluğu	30-190 kg/m ³
Isıl iletkenlik	0.039-0.046 W/m.°C
Ses yalıtımı	18 db (125 Hz)



Şekil 2.15. Perlite genleştirme sisteminin akış şeması

Perlit genleştirme veya patlatma fırını, dikey fırınlar olarak da adlandırılmaktadır. Perlite genleştirme işlemini bir sistem olarak ele aldığımız zaman, bu sistemi oluşturan bileşenler, fırın, ısıtma alanı, baca, siklonlar ve filtre gurubu olarak ele alabiliriz. Isıtma alanı ve baca kısmı, yapılan analizlerde kontrol hacim olarak belirlenmiştir. Perlite genleşme süreci, kontrol hacim içerisindeki bölümlerde gerçekleştirilmektedir. Perlite genleştirme fırının alt kısmında bulunan brülör ile yakıt hava karışımı yakılmaktadır. Perlite genleştirme fırının bir ön analizi gerçekleştirilmiştir. Bu ön analiz sonuçları göz önüne alan tesisin yönetim kadrosu, perlite genleştirme fırınıni değiştirme kararı almıştır. Bu tez kapsamında, analizleri yapılacak olan iki farklı perlite fırını mevcut olmuştur. Ön analize ilişkin ayrıntılı bilgiler kaynak [76] ve [77] de bulunabilir. Analizleri gerçekleştirilecek olan iki farklı perlite genleştirme fırınıni eski ve yeni perlite genleştirme fırını olarak nitelendirilecektir. Ön analizleri gerçekleştirilen eski fırına ilişkin bilgilerden sonra yeni perlite genleştirme fırınına ilişkin bilgiler verilecektir.

Eski perlite fırını dört kısımda inceleyebiliriz. Bu bölümler, ısıtma hacmini oluşturan, brülör, silindirik gövde, alt ve üst koni şeklindeki bölümlerden oluşmaktadır. Dökme demirden imal edilen fırının üst ve alt koni biçimindeki bölümlerin toplam yüzey alanı 1.24 m^2 'dir.

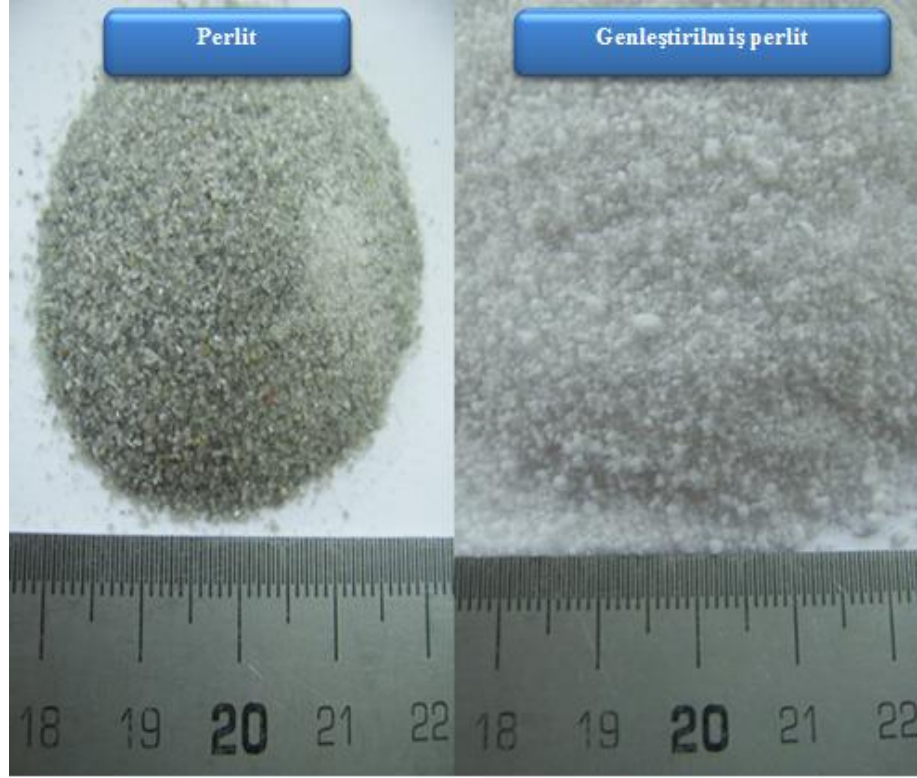
Silindirik gövde üzerine açılan ve 90°'lik açı ile yerleştirilen perlitin fırına giriş delikleri bulunmaktadır. Silindirik gövdenin toplam yüzey alanı ise 2.53 m²'dir. Koni bölümündeki gibi silindirik gövde de dökme demirden yapılmıştır. Perlit fırınından çıkan baca kısmının uzunluğu 20 m'dir. Isıtma hacminin sıcaklığı 850 °C'nin üzerindedir. Perlitin genleşme süreci bu bölümde başlayarak, baca boyunca devam etmektedir. Yakma havası, doğal gaz ve perlit çevre şartlarında fırına girmektedir. Eski fırının analizlerindeki çevre şartlarımız 1 atm ve 0 °C'dir. Isıtma hacminin sıcaklığı 800 °C olarak ölçülmüştür. Baca gazları ve genleşmiş perlitin sıcaklığı 600 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer, kontrol hacminin dışına çıktığı andaki değerleri göstermektedir. Bu değerler, alçı tesisinin otomasyon ünitesinden alınan veriler ile birlikte, -50 ile 1000 °C ölçüm aralığına sahip olan kızılötesi termometre ile ölçülmüştür. Eski perlit fırını günde 7 ton perlit üretimi gerçekleştirmektedir. Bu değer, tesisin üretim kapasitesinin durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Siklonlardan ve filtreden elde edilen genleşmiş perlit, tesisin laboratuvarlarında test edilmektedir. Elde edilen ürün içerisindeki genleşmiş ve genleşmeden çıkan perlit miktarı, bu test ile belirlenmektedir. Fırının bulunduğu bölüm, fırının fotoğraflanmasını engellemektedir. Bundan dolayı, eski fırının fotoğrafları paylaşılamamıştır.

Yeni perlit fırını ise silindirik gövdelerden meydana gelmektedir. Eski fırında olduğu gibi silindirik gövde üzerine açılan ve 90°'lik açı ile yerleştirilen giriş deliklerinden perlit, fırına girmektedir. Hem yeni hem de eski fırınında ham perlit doğrudan, hava yakıt karışımının yakılması ile oluşan alev çekirdeği ile temas halindedir. Yeni perlit fırını da dökme demirden imal edilmiştir. Isıtma hacminin yüzey alanı 10.113 m²'dir. Isıtma hacminin iç sıcaklığı 1123 K'dir ve perlitin genleşme işlemi bu bölümde başlamaktadır. Hava, perlit ve doğal gaz, kontrol hacmine çevre şartlarında girmektedir. Yeni fırın için çevre şartları 1 atm ve 300 K'dir. Yeni perlit fırının yüzey sıcaklığı 473 K iken, genleşmiş perlitin ve baca gazlarının, kontrol hacminden çıkarken ölçülen değeri ise 973 K'dir. Fırından çıkan bacanın dış yüzey sıcaklığı ise 1010 K'dir. Yeni fırının günlük üretim kapasitesi 8.8 tondur. Yeni perlit fırını da, eski perlit fırının yerine yerleştirilmesinden dolayı, tam olarak fotoğraflanamamıştır. Belirlenen en iyi açıdan alınan fotoğrafta ise sadece ısıtma hacminin bir bölümü ile ham perlitin fırına giriş kısımları Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Yeni perlit fırını

Eski ve yeni perlit fırının çalışma koşullarına ilişkin ayrıntılı bilgiler, ilerleyen bölümlerde verilecektir. Genleşmiş ve ham perlitin tanecik boyutu bakımından karşılaştırılması Şekil 2.17’de verilmiştir.



şekil 2.17. Perlit ve genleştirilmiş perlit

şekil 2.17’de görüldüğü gibi gri renkte bulunan ham perlit iken beyaz renkte bulunan ise genleştirilmiş perlittir. Perlit ısıtıldığında hacminin yaklaşık 20 katı kadar genişlemektedir. Ham ve genleştirilmiş perlitin hacimsel olarak farklılığı şekil 2.18’de görülebilir.



Şekil 2.18. Ham perlit ile genişletilmiş perlit arasındaki hacimsel fark

Şekil 2.18’de paylaşılan her iki örneğin de ağırlığı 5 gramdır.

Tezin bu kısmına kadar alçı, perlit, döner fırın, perlit genişletme fırını, alçı üretimi ve perlit üretimine ilişkin bilgiler, ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Tezin bundan sonraki bölümlerinde ise öncelikle yapılacak olan analiz metoduna ilişkin bilgiler paylaşılacaktır. Ardından, analizler gerçekleştirilecek ve tezin bulgular kısmında, analizlerden elde edilen veriler sunulacaktır.

2.3. Ekserji Metodu

Enerji tek başına değerlendirildiği zaman nicelik yönünden önemli veriler elde edilmektedir. Fakat nitelik yönünden eksik kalmaktadır. Bu nedenden dolayı, ekserji metodu kullanılarak nitelik bakımından sistemlerin incelenmesi gerekmektedir. Ekserjinin farklı tanımları Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Literatürde, ekserjinin farklı tanımları [78]

Araştırmacı	Ekserjinin tanımı
Rant [79]	Ekserji, enerjinin belirli bir kısmının, herhangi bir diğer enerji türüne tamamıyla dönüşebilme yeteneği olarak tanımlanır.
Szargut et al. [80, 81]	Ekserji, farklı formlardaki enerji türlerinin kalitesinin bir ölçütüdür ve bazı maddelerin, tersinir bir işlem ile doğadaki genel maddeler ile termodinamik dengeye geldiği zaman, ortaya çıkan iş yapabilme miktarı olarak tanımlanır.
Kotas [82]	Herhangi bir enerji formuna eşdeğer iş, o enerjinin ekserjisinin bir ölçütüdür ve referans şartlar olan çevre parametrelerini kullanan enerji formundan elde edilebilen, maksimum iş olarak tanımlanır.
Shukuya [83]	Entropi, enerji ve maddenin dağılımını ifade eden bir ölçü olarak tanımlanır iken, ekserji, enerji ve maddenin dağılım potansiyelinin bir ölçütü olarak tanımlanır.
Bejan [84, 85]	Ekserji, çevredeki maddeden veya bir miktar maddenin, başka bir forma veya spesifik bir duruma dönüşmesi için gerekli, minimum teorik yararlı ıştır.
Connely ve Koshland [86]	Ekserji, teorik olarak tersinir bir işlem boyunca, bir kaynağın çevresi ile dengeye gelmesiyle elde edilebilen maksimum işi tanımlar.
Clickstormgroup[87]	Termodinamikte, bir sistemin ekserjisi, sistemi bir ısı kaynağı ile dengeye getiren bir süreçte, mümkün olan maksimum ıştır.
Honerkamp[88]	Bir enerji formunun, işe dönüştürülebilir maksimum bölümü, ekserji olarak adlandırılır. Geri kalan kısmı ise anerji olarak adlandırılır.
Tsatsaronis [89]	Bir termodinamik sistemin ekserjisi, sadece sistemin bulunduğu çevre ile etkileşim sürecinde iken, sistemin termodinamik çevre ile tamimiyle termodinamik dengeye geliyor iken, elde edilen teorik maksimum yararlı ıştır.
Cengel ve Boles [90]	Günlük yaşamda, bir kişinin ekserjisi, o kişinin en uygun şartlar altında yapabileceği en iyi iş olarak göz önüne alınabilir.
Geoseries [91]	Ekserji, enerjinin belirli bir miktarı ile yapılabilen, yararlı iş miktarının ve bir enerji kaynağının kalitesini ifade eder.

Isı ve akış işi gibi enerji türlerinin enerji değerlerinin, çevreye (referans ortam) göre, ekserji değeri değişir. Tersinmezlik, anerji, yok olan ekserji, kayıp iş gibi tanımlar ile ifade edilir. Ekserjiyi kendi arasında, potansiyel, kinetik, kimyasal ve fiziksel ekserji olarak tanımlanabilir. Enerjinin niteliğine bağlı olarak değişen bu kavramı, enerjinin niceliğinden ayrılması gerekmektedir. Tablo 2.4’de enerji ve ekserji arasındaki farkların benimsenmesi, enerji verimliliğinde, ekserjinin önemini ifade edilmesi için gereklidir.

Tablo 2.4. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [94]

Enerji	Ekserji
Sadece madde ya da enerji akış parametrelerine bağlıdır ve çevresel parametrelere bağlı değildir.	Madde veya enerji akışı ve çevresel parametrelerin her ikisine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerleri vardır (Einstein’ın bağıntısına göre, $E_{\text{enerji}} = m^2 C^2$ ’ye eşittir.)	Sıfıra eşittir (çevreyle dengede olarak ölü durumda).
Tüm prosesler için termodinamiğin birinci yasasıyla gösterilir.	Sadece tersinir prosesler için termodinamiğin birinci yasasıyla gösterilir (tersinmez proseslerde, kısmen ya da tamamen yok olur).
Tüm prosesler için termodinamiğin ikinci yasasıyla sınırlıdır (tersinir olanlarda dahildir).	Termodinamiğin ikinci yasası nedeniyle tersinir prosesler için sınırlı değildir.
Hareket ya da hareketi üretebilme kabiliyetidir.	İş ya da iş üretme kabiliyetidir.
Bir proses de her zaman korunur; ne vardan yok olur, ne de yoktan var edilir.	Tersinir proseslerde her zaman korunur tersinmez proseslerde her zaman tüketilir.
Miktarın (niceliğin) bir ölçüsüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçüsüdür.

Ekserji kavramının tanımı ve enerji kavramı ile karşılaştırılması yapıldıktan sonra, ekserjinin, enerji verimliliğindeki önemini daha iyi bir şekilde ifade edilebilir.

Ekserji metodu, gerçek kayıpların ve atıkların büyüklüklerini tanımlamak için ve enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanımına olanak sağlayan, yararlı bir araçtır. Bundan dolayı, ekserji ve enerji verimliliğinde büyük bir rol oynar. Ekserjinin önemini, bazı önemli noktaların altını çizerek, enerji verimliliğindeki önemini daha iyi bir şekilde vurgulanmaktadır [95].

Döner fırının ve perlit fırının ekserji analiz yöntemine ilişkin bilgilerin paylaşımı yapılmıştır. Ekserji metodunu endüstri için çok önemli bir araç olduğu söylenmektedir.

Bu metodu, alçı üretimi gerçekleştiren tesiste bulunan ısıl proseslere uygulayarak, daha verimli bir işlem süreci için çözüm önerileri elde edebiliriz. Döner fırının, yeni ve eski perlit fırınlarının ekserji analizlerinde izlenen yöntem Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Ekserji analizlerinde izlenen yol

Ekserji metodu, kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini, göz önüne alınan sisteme uygulayarak, enerji ve ekserji verimini, tersinmezlik oranını, ekserjinin azalma oranını, ısı ve işin etkileşimlerini belirlememizde kullanılan etkin bir yöntemdir [8]. Sabit sınır şartları ve açık sistemler için kütle dengesi Eşitlik [2.2] ile gösterilmiştir.

$$\sum_{giren} \dot{m} = \sum_{çıkan} \dot{m} \quad (2.2)$$

Yine aynı şartların göz önüne alındığı bir sistem için enerjinin korunumu ise Eşitlik [2.3] ile ifade edilebilir [83].

$$0 = \dot{E}_k - \dot{W}_{kh} + \sum_{giren} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) - \sum_{çıkan} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \quad (2.3)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edildiği, her hangi bir iş transferinin söz konusu olmadığı bir enerji denklemi ise Eşitlik [2.4] ile ifade edilen, genel enerji denge denklemidir [7].

$$\dot{E}_k + \sum_{giren} \dot{m}(h) = \sum_{çıkan} \dot{m}(h) \quad (2.4)$$

Genel ekserji denge denklemi ise Eşitlik [2.5] ile gösterilebilir [7, 8, 82].

$$\sum \dot{E}_{X_{giren}} - \sum \dot{E}_{X_{çıkan}} = \sum \dot{E}_{X_{yıkım}} \quad \text{yada} \quad \sum \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{yüzey}} \right) \dot{E}_k - \dot{W}_{kh} + \sum \dot{m}_{giren} \psi_{giren} - \sum \dot{m}_{çıkan} \psi_{çıkan} = \dot{E}_{X_{yıkım}} \quad (2.5)$$

Eşitlik [2.5] deki $\dot{E}_{X_{giren}}$, kontrol hacmine giren parametrelerin ekserji akımını, $\dot{E}_{X_{çıkan}}$ ise çıkan parametrelerin ekserji akımını ve $\dot{E}_{X_{yıkım}}$ ekserji yıkım akımını ifade etmektedir. Kontrol hacmine giren bir madde akımının ekserjisi ise Eşitlik [2.6] ile belirtilmiştir.

$$\dot{E}_X = \dot{E}_X^{fiz} + \dot{E}_X^{kim} \quad (2.6)$$

Herhangi bir madde akımının ekserjisi, fiziksel ve kimyasal ekserji akım değerlerinden oluşabilir. Fiziksel ekserji akımı olarak ifade edilen ve Eşitlik [2.6]'da $\dot{E}_X^{fiz}$ olarak gösterilen değişken, Eşitlik [2.7] ile çözümlenmektedir [7, 8].

$$\dot{E}_X^{fiz} = \dot{m}[(h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty})] \quad (2.7)$$

Eşitlik [2.7] Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasasının kombinasyonunu olan entropi değişimi Eşitlik [2.8] ile ifade edilmektedir [8].

$$(s - s_{\infty}) = \left[C \ln \left(\frac{T}{T_{\infty}} \right) - R \ln \left(\frac{P}{P_{\infty}} \right) \right] \quad (2.8)$$

Eşitlik [2.8]'deki basınç parametresi, sadece gazların entropi değişimini hesaplamak için kullanılmaktadır. Eşitlik [2.6] kimyasal ekserji ifadesinin hesaplanması, fiziksel ekserjinin hesaplanmasından daha zor olduğu söylenebilir. Bir hidrokarbonun (C_aH_b) spesifik standart kimyasal ekserjisi, Eşitlik [2.9] ile ifade edilebilir [96].

$$\bar{\varepsilon}_i^o = \left[\bar{g}_i + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(l)} \right] (T_0, P_0) + a \bar{\varepsilon}_{CO_2}^{kim} + \left(\frac{b}{2} \right) \bar{\varepsilon}_{H_2O(l)}^{kim} - \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{\varepsilon}_{O_2}^{kim} \quad (2.9)$$

$\bar{\varepsilon}^o$, yakıtı oluşturan her bir bileşenin standart kimyasal ekserjisini ifade etmektedir. $\bar{g}_i$ ise molar Gibbs fonksiyonudur. Yakıtların kimyasal ekserjisinin hesaplanmasında, Eşitlik [2.10]'da sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [97].

$$\gamma = \frac{e_{exy}}{AID_y} \quad (2.10)$$

Gaz yakıtların kimyasal ekserjilerini ifade edebilmemiz için deneysel olarak elde edilmiş olan Eşitlik [2.11] ile belirlenebilir.

$$\gamma = 1.033 + 0.0169 \frac{y}{x} - \frac{0.0698}{x} \quad (2.11)$$

Bir gaz karışımından oluşan doğal gaz gibi bir yakıtın birim kimyasal ekserjisi, Eşitlik [2.12] ile hesaplanmaktadır [8, 104].

$$e_{ex}^{kim} = \sum x_i' \bar{e}_i^{kim} + \bar{R} T_{\infty} \sum x_i' \ln x_i' \quad (2.12)$$

Ekserji analizlerindeki ekserji yıkım akımı, Eşitlik [2.13] ile hesaplanmaktadır [8].

$$\dot{E}x_{yıkım} = T_{\infty} \dot{S}_{üretim} \quad (2.13)$$

Özellikle ısı kayıpların ekserji akımı ise Eşitlik [2.14] ile belirlenmektedir.

$$\dot{E}x_l = \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{yüzey}} \right) \dot{E}_l \quad (2.14)$$

Ekserji veriminin hesaplanmasındaki yöntem ise kontrol hacmine giren ve çıkan ekserji akım birimlerinin oranı ile ifade edilmektedir [7].

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}x_{çıkan}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (2.15)$$

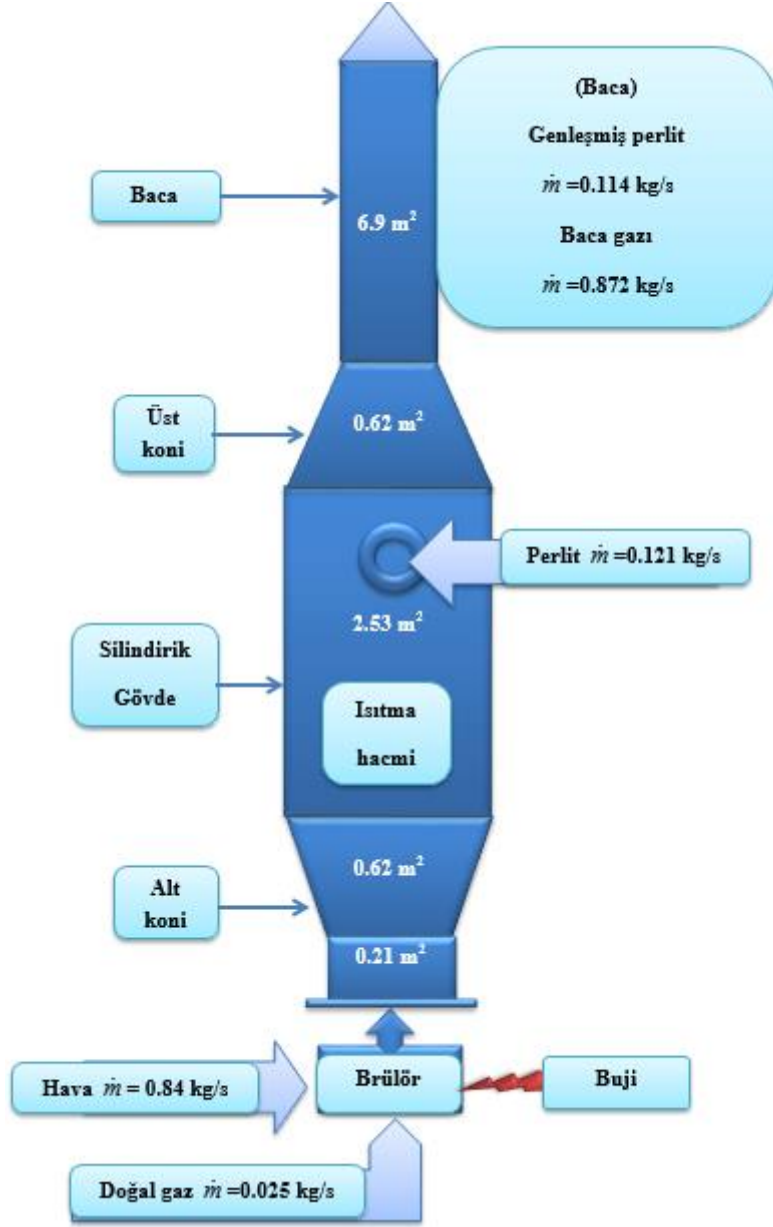
Eski ve yeni perlit fırınının ekserji analizleri ile döner fırının ekserji analizleri, yapılan analizlere göre sunulacaktır. İlk ekserji analizi eski perlit fırınına uygulanmıştır. Bunun nedeni, eski perlit fırınının ve döner fırının ön analizleri gerçekleştirildikten sonra, hazırlanan rapor ışığında, eski perlit fırınının değiştirilmesidir. Eski perlit fırınının ekserji analizinde çok kısıtlı bilgiler ile gerçekleştirilmiştir. Eski ve yeni perlit fırının ekserji analizleri arasında bir farklılık oluşmuştur. Yeni perlit fırınının ekserji analizinde daha fazla bilgi toplanabilmiştir. Yapılan analizler incelendiğinde, iki farklı perlit fırını arasındaki farklılık, daha net bir şekilde anlaşılabilir. Toplanan bilgiler, söz konusu işletmenin tutumuna ve işbirliğine göre şekillenmiştir. Eski perlit fırınında, yakıtı oluşturan bileşenler elde edilememiştir. Yeni perlit fırınının analizlerinde ise daha nitelikli bir bilgi paylaşımı söz konusu olmuştur. Daha öncede bahsedildiği gibi ekserji analizlerinde ilk olarak eski perlit fırınının daha sonra, yeni perlit fırınının ve son olarak döner fırının ekserji analizleri yapılmıştır. Bu sıralamaya göre de yapılan analizler sunulmuştur.

2.4. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizi

Eski perlit fırınının ekserji analizinde yapılan kabuller aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Fırın içerisinde tam yanma gerçekleşmektedir ve N_2 reaksiyona girmemektedir.
- Fırının girişinde ve çıkışındaki basınçlar 1 atm olarak kabul edilmiştir.
- Fırının sabit sınır şartlarında çalıştığı varsayılarak, giren kütlenin çıkan kütleye eşit olduğu ve kontrol hacim içerisindeki zaman bağlı kütle değişiminin olmadığı varsayılmıştır.
- Yakma havası, doğal gaz ve baca gazları, ideal gaz olarak nitelendirilmiştir.
- Kontrol hacmine giren ve çıkan parametrelerin kinetik ve potansiyel enerjileri ihmal edilmiştir.
- Doğal gazın bileşenlerinden sadece metan göz önüne alınmıştır.
- Fırının ekserji analizlerindeki çevre şartları, $P_\infty = 1 \text{ atm}$ ve $T_\infty = 273 \text{ K}$ 'dir.
- Havada bulunan nem ihmal edilmiştir.

Yeni perlit fırınının analizlerinde yapılan kabuller de küçük değişiklikler söz konusudur. Bu değişiklikler, yeni perlit fırınının ekserji analizlerinde sunulacaktır. Eski perlit fırınının analizlerinde, öncelikle kütle dengesi oluşturulmuştur. Yapılan ölçümler neticesinde, yakma havasının kütleli debisi 0.84 kg/s , doğal gazın debisi 0.025 kg/s ve ham perlitin kütleli debisi ise 0.121 kg/s olarak belirlenmiştir. Eski perlit fırını oluşturan kısımlar, kontrol hacmi, akış diyagramı ve kütle dengesi, Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Eski perlit fırınının akış şeması [101]

Perlitin içerisinde bulunan su molekülleri, perlitin genleşmesi ile birlikte buharlaşmaktadır.

Giren perlitin kütlesi, % 5.5'lik bir kayıp, içerisindeki suyun buharlaşması sonucunda azalmaktadır. Doğal gazı oluşturan bileşenler göz önüne alındığı zaman, metan bileşeninin hacimsel olarak % 95'ni oluşturduğu söylenebilir. Doğal gazda sadece metan göz önüne alınarak, analizler yapılmıştır. Doğal gazı oluşturan bileşenlerin hacimsel oranları, eski perlit fırınının analizlerinde elde edilememiştir. Kontrol hacim olarak seçilen eski perlit fırınının kütle dengesi, Eşitlik [2.16] ile hesaplanmıştır.

$$\sum_{giren} \dot{m} = \sum_{çıkan} \dot{m} \quad (2.16)$$

Yakıt hava oranı, Eşitlik [2.17] ile belirlenmiştir.

$$\frac{\dot{m}_{yakıt}}{M_{yakıt}} / \frac{\dot{m}_{hava}}{M_{hava}} = \lambda \quad (2.17)$$

λ yakıt hava oranını göstermektedir. λ 0.05 olarak hesaplanmıştır. Yanma ürünlerinin analizi, Eşitlik [2.18] ve [2.19] kullanılarak hesaplanmıştır [99, 101].

$$\lambda CH_4 + (0.21O_2 + 0.79N_2) \Rightarrow (1 + \lambda) [x_{CO_2} CO_2 + x_{H_2O} H_2O + x_{O_2} O_2 + x_{N_2} N_2] \quad (2.18)$$

$$x_{CO_2} = \frac{\lambda}{1 + \lambda}, x_{H_2O} = \frac{2\lambda}{1 + \lambda}, x_{O_2} = \frac{0.21 - 2\lambda}{1 + \lambda}, x_{N_2} = \frac{0.79}{1 + \lambda} \quad (2.19)$$

x yanma ürünlerinin mol fraksiyonlarını ifade etmektedir. Yanma ürünlerinin molar analizi, Tablo 2.5’de gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Yanma ürünlerinin mol fraksiyonları

Bileşenler	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
Mol	0.75	0.1	0.04	0.09
Fraksiyonu				

Yanma ürünlerini oluşturan bileşenlerin kütleli debilerini, enerji ve ekserji değerlerini ve baca gazını oluşturan bileşenlerin miktarları belirlenebilir. Eski perlit fırınının enerji ve ekserji analizleri ise bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

2.4.1. Eski Perlit Fırınının Enerji ve Ekserji Analizleri

Kontrol hacim olarak seçilen eski perlit fırınının kütle dengesinin oluşturulmasının ardından, enerji dengesi uygulanmıştır. Kontrol hacim için enerji dengesi, Eşitlik [2.20] ile ifade edilebilir [102].

$$0 = -\dot{E}_k + \dot{m}_{yh} h_{yh} + \dot{m}_y h_y + \dot{m}_{per} h_{per} - \dot{m}_{bg} h_{bg} - \dot{m}_{G.per} h_{G.per} \quad (2.20)$$

Eşitlik [2.20]’deki havanın, yakıtın ve yanma ürünlerinin entalpileri, Eşitlikler [2.21], (2.22) ve (2.23) ile hesaplanmıştır[82, 90, 99].

$$h_{yh} = \left[0.79 \frac{h_{N_2}}{M_{N_2}} + 0.21 \frac{h_{O_2}}{M_{O_2}} \right] \quad (2.21)$$

$$h_y = AID \quad (2.22)$$

Doğal gazı oluşturan bileşenler arasındaki metanın hacimsel olarak % 95'lik bir değerde olduğunu daha önceleri ifade edilmişti. Yanma ürünlerinin mol fraksiyonlarının belirlenmesi için yanma eşitliklerindeki yakıt olarak, sadece metan göz önüne alınmıştı. Fakat enerji dengesindeki yakıtın alt ısı değeri olarak doğal gazın alt ısı değeri olan 45.000 kJ/kg değeri göz önüne alınmıştır [90, 101].

$$h_{bg} = \left[0.75 \frac{h_{N_2}}{M_{N_2}} + 0.1 \frac{h_{O_2}}{M_{O_2}} + 0.04 \frac{h_{CO_2}}{M_{CO_2}} + 0.09 \frac{h_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right] \quad (2.23)$$

Yanma ürünlerinin 873 K'deki entalpileri ve yanma havasının 273 K'deki entalpisi belirlenmiştir. O₂, CO₂, H₂O (gaz) ve N₂'nin entalpi ve entropi değerleri referans [90]'dan alınmıştır. Perlitin entropi farkı, Eşitlik [2.24] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta s = C_p \ln \left(\frac{T_{çıkan}}{T_{giren}} \right) \quad (2.24)$$

Elde edilen değerler Tablo 2.6'da gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Kontrol hacminden çıkan ve giren bileşenlerin entropi ve entalpi değerleri

Bileşenler	h (kJ/kg) (273K)	h (kJ/kg) (873K)	s (kJ/kg·K) (273K)	s (kJ/kg·K) (873K)
Doğal gaz	45000	-	0	-
N ₂	280.19	925.57	6.73	7.98
O ₂	245.56	840.59	6.31	7.45
CO ₂	189.38	813.92	4.77	5.94
H ₂ O	497.41	1700.52	10.29	12.59
Perlit	226.863	725.463	$\Delta s = 0.96$	

Enerji dengesindeki toplam ısı kaybı ($\dot{E}_k$) 472.83 kW olarak hesaplanmıştır. Analizde kullanılan eşitlikler, enerji dengesinden elde edilen sonuçlar Ek Tablo 1.1, 1.2 ve 1.3'de gösterilmiştir. Kontrol hacmine giren toplam enerji değeri, 1396 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma sonu ürünleri ve genişlemiş perlit ile birlikte kontrol hacminden çıkan toplam enerji değeri ise 928.3 kW olarak hesaplanmıştır.

Eski perlit fırının ekserji dengesi, Eşitlik [2.25] ile ifade edilmiştir [82].

$$\dot{E}x_k + \dot{E}x_{çıkan} - \dot{E}x_{giren} = \dot{E}x_{yıkım} \quad (2.25)$$

Termal ekserji akımı, Eşitlik [2.26] ile hesaplanmıştır [90].

$$E x_k = \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{yüzey}} \right) \dot{E}_k \quad (2.26)$$

Ekserji kaybı, 321.88 kW olarak bulunmuştur. Kontrol hacmine giren yakıtın ekserjisi, kimyasal ve fiziksel ekserjiden meydana gelmektedir. Yakıt veya benzeri materyallerin toplam ekserji akımları, Eşitlik [2.27] ile hesaplanmaktadır [90].

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{fiz} + \dot{E}x^{kim} \quad (2.27)$$

Doğal gaz, yanma havası ve perlit, kontrol hacmine çevre şartlarında ($h_{yh} = h_{\infty}$ ve $s_{yh} = s_{\infty}$) girmektedir. Bu nedenden dolayı, kontrol hacmine giren doğal gaz, yanma havası ve ham perlitin fiziksel ekserjileri sıfırdır. Kontrol hacmine giren bu parametrelerin fiziksel ekserji akımı Eşitlik [2.28] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_i^{fiz} = \dot{m}((h_{giren} - h_{\infty}) - T_{\infty}(s_{giren} - s_{\infty})) \quad (2.28)$$

$$\dot{E}x_{DG}^{fiz} = 0, \dot{E}x_{N_2}^{fiz} = 0, \dot{E}x_{O_2}^{fiz} = 0, \dot{E}x_{per}^{fiz} = 0 \quad (2.29)$$

Perlit fırınının sadece iki noktasından sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmektedir. Ölçülen sıcaklık değerleri otomasyondan okunarak, bazı set değerleri oluşturulmuştur. Bu değerleri muhafaza etmek ve fırını istenilen koşullarda çalışması sağlanmaktadır. Genel itibari ile fırının çalışmasına, müdahale edilmemektedir. Yetersiz bir otomasyona sahip olan fırının ekserji analizinde, gerekli olan ölçümlerin hepsi, tezin yazarı tarafından yapılmıştır. Kontrol hacmine giren parametrelerin fiziksel ekserji akımı sıfır olsa da, doğal gazın kimyasal ekserji akımının hesaplanması gerekmektedir. Yakma havasının kimyasal ekserji akımı sıfır olarak alınmıştır.

$$\dot{E}x_{N_2}^{kim} = 0, \dot{E}x_{O_2}^{kim} = 0 \quad (2.30)$$

Doğal gazın kimyasal ekserji akımı ise Eşitlikler [2.31] ve [2.32] ile hesaplanmıştır [83, 98, 101].

$$\dot{E}x_{DG}^{kim} = \dot{m}_y e_{DG}^{kim} \quad (2.31)$$

$$e_{DG}^{kim} = \gamma \cdot (AID) \quad (2.32)$$

Eşitlik [2.32]'deki γ değeri, doğal gaz için 1.04 olarak alınmıştır [82]. Yanma ürünlerini oluşturan her bir bileşenin kimyasal ekserji miktarı ise Eşitlik [2.33] ile hesaplanmıştır.

$$e_{ex}^{kim} = \sum x_i' \bar{e}_i^{kim} + \bar{R}T_{\infty} \sum x_i' \ln x_i' \quad (2.33)$$

Eşitlik [2.25] ile ifade edilen ekserji dengesinden ekserji yıkım akımı hesaplanmıştır. Ekserji yıkım akımı 540.83 kW olarak belirlenmiştir.

Ekserji yıkımı, toplam giren ekserjinin % 46.22'sini oluşturmaktadır. Kontrol hacim olarak belirlenen eski perlit fırınının enerji verimi Eşitlik [2.34] ile hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{çıkan}}{\dot{E}_{giren}} \quad (2.34)$$

Eski perlit fırının enerji verimi, % 66 olarak hesaplanmıştır. Fırının ekserji verimi ise Eşitlik [2.35] ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}X_{çıkan}}{\dot{E}X_{giren}} \quad (2.35)$$

Eski perlit fırınının ekserji verimi % 26 olarak hesaplanmıştır.

Daha iyi bir sürdürülebilir çevrenin oluşturulması için çevreye zararlı uygulamaları azaltmak gerekmektedir. Yenilenebilir veya sürdürülebilir enerji tek başına yeterli olmamaktadır. Doğal gaz gibi yenilenemeyen kaynakların daha etkili yöntemler ve teknikler kullanılarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bakış açısıyla eski perlit fırınının sürdürülebilirlik indeksi de hesaplanabilir. Sürdürülebilirlik indeksi Eşitlik [2.36] ile hesaplanmıştır.

$$SI = 1/D_p \quad (2.36)$$

Kontrol hacim olarak belirtilen eski perlit fırınına yalıtım uygulaması yapılmamıştır. Bu nedenden dolayı, enerji ve ekserji kayıpları bir hayli yüksektir. Eğer kontrol hacminin yalıtımı gerçekleştirilmiş olsaydı, aynı miktarda ürünü daha az enerji ile veya daha fazla miktarda ürünün işlenmesi söz konusudur. Yeni perlit genişletme fırınının, toplam enerji kaybının % 85'i engellendiği takdirde, 400 kW değerinde, enerji verimliliği sağlanabilir. Söz konusu enerji miktarının parasal karşılığının hesaplanabilmesi için Eşitlik [2.37] kullanılmıştır.

$$\dot{E}_k = \dot{m}_{k,y} h_y \quad (2.37)$$

Bu yatırımın geri dönüşü, Eşitlik [2.38] ile hesaplanabilir.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{\text{Yeni perlit fırınının maliyeti}}{\text{Aylık parasal tasarruf}} \quad (2.38)$$

2.5. Yeni Perlit Fırınının Ekserji Analizi

Eski perlit fırınının ekserji analizi ile yeni perlit fırınının ekserji analizi arasında, bazı farklılıkların olduğu belirtilmişti. Bu farklılıkların nedenini tekrardan tartışmak gerekirse, yeni perlit fırınının ekserji analizinde, daha nitelikli bilgi elde edilmiştir.

Söz konusu işletmenin bilgi paylaşımındaki tutumu ile yeni perlit fırınının analizinde daha fazla veri toplanmıştır. Her iki fırınında, aynı referans koşullarında analiz edilmek istenmiştir. Fakat eski fırının, yenisi ile değiştirilmesinden dolayı, kış aylarında toplanan veriler ile eski fırınının analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikli hedef olarak, işletmede bulunan ve ısı işlemlerin gerçekleştirildiği prosesleri, tam kapasite çalıştırıldığı periyotlarda analizlerini gerçekleştirmek hedefleniyordu. Bu sayede, proseslerin tam kapasitede ve bir yıl boyunca en sık olarak kullanıldığı periyotlarda elde edilecek analiz sonuçlarının daha iyi yorumlanması sağlanacaktır. Fakat eski perlit fırınının da bu durum sağlanamamış ve kış aylarındaki referans koşullardaki veriler ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Hem eski hem de yeni perlit fırınının analizlerinde, fırınının işlediği ürünün kapasitesinde, bir değişiklik söz konusu değildir. Her iki fırında, yaz ve kış aylarında, kapasiteleri aşılmamaktadır. Yaz aylarında artan talebe karşılık olarak, fırının çalışma süresinde, çok nadir olarak değişkenlik söz konusu olmaktadır. Yeni ve eski perlit fırının analizindeki temel farklılıkları özetlemek gerekirse, doğal gazın içeriği ve farklı referans çevre koşullarında analiz edilmesidir. Yeni perlit fırınının ekserji analizinde yapılan kabuller aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Fırın içerisinde tam yanma gerçekleşmektedir ve N_2 reaksiyona girmemektedir.
- Fırının girişinde ve çıkışındaki basınçlar 1 atm olarak kabul edilmiştir.
- Fırının sabit sınır şartlarında çalıştığı varsayılarak, giren kütlenin çıkan kütleye eşit olduğu ve kontrol hacim içerisindeki zaman bağlı kütle değişiminin olmadığı varsayılmıştır.
- Yakma havası, doğal gaz ve baca gazları, ideal gaz olarak nitelendirilmiştir.
- Kontrol hacmine giren ve çıkan parametrelerin kinetik ve potansiyel enerjileri ihmal edilmiştir.
- Fırının ekserji analizlerindeki çevre şartları, $P_\infty = 1 \text{ atm}$ ve $T_\infty = 300 \text{ K}$ 'dir.
- Havada bulunan nem ihmal edilmiştir.

Doğal gazın dağıtımından sorumlu şirketler, yoğun miktarlarda doğal gaz tüketimine sahip işletmelere, kullandıkları doğal gazın içeriği hakkında bilgi vermektedirler. Elazığ ilinde kullanılan doğal gaz, İran ve Rusya'dan ithal edilen doğal gazdır.

Doğal gazın niteliğinde zaman zaman değişkenlik olsa da, yapılan anlaşmalar sayesinde, doğal gazı oluşturan bileşenlerin, belirlenen değerlerin altında olmasına izin verilmemektedir. Doğal gazın dağıtımından sorumlu işletmenin, analizleri gerçekleştirilen alçı firmasına verilen doğal gazın içeriği ve yanma havasının içeriği Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Doğal gazın ve yakma havasının bileşenleri

Doğal gaz				Yanma havası [98]		
Bileşenler	Kimyasal formül	Hacimsel oranı (%)	Kütlesel oranı (%)	Bileşenler	Kimyasal formül	Hacimsel oranı (%)
Metan	CH ₄	91.94	84.44	Azot	N ₂	77.48
Etan	C ₂ H ₆	3.53	6.08	Oksijen	O ₂	20.59
Propan	C ₃ H ₈	0.90	2.27	Su (g)	H ₂ O (g)	1.9
Bütan	C ₄ H ₁₀	0.38	1.26	Karbon dioksit	CO ₂	0.03
Pentan	C ₅ H ₁₂	0.11	0.45			
Azot	N ₂	2.66	4.26			
Karbon dioksit	CO ₂	0.48	1.21			

Yeni perlit fırınının analizlerinde, öncelikle kütle dengesi oluşturulmuştur. Tablo 2.7'deki veriler kullanılarak, daha iyi ve ayrıntılı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Doğal gazın hacimsel debisi 125 m³/h olarak ölçülmüştür. Doğal gazı oluşturan bileşenlerin, molar kütlesi, alt ısı değerleri, hacimsel debileri, yoğunluğu ve kütlesel debileri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8. Doğal gazı oluşturan her bir bileşenin molar kütlesi, alt ısı değeri, hacimsel ve kütlesel debileri

Doğal gazın bileşenleri	Molar kütle (kg/kmol) [90]	Alt ısı değeri (kJ/kg) [90]	Hacimsel debi (m ³ /h)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütlesel debi (kg/h)
CH ₄	16.043	50,050	114.925	0.651*	74.886
C ₂ H ₆	30.070	47,520	4.412	1.221*	5.388
C ₃ H ₈	44.097	46,340	1.125	1.791*	2.015
C ₄ H ₁₀	58.123	45,370	0.475	2.356*	1.119
C ₅ H ₁₂	72.150	44,910	0.137	2.931*	0.403
N ₂	28.013	-	3.325	1.137*	3.782
CO ₂	44.01	-	0.6	1.787*	1.072
Toplam			125		88.667

*300 K

Doğal gazın kütlesel debisi, 88.667 kg/h olarak belirlenmiştir. Fırının enerji analizinde, yakıtın alt ısı değeri göz önüne alınmıştır. Bunun nedeni ise yanma sonucunda oluşan baca gazlarından biri olan suyun, buhar fazında olmasından dolayıdır. Yanma havasının debisi, hassas bir anemometre kullanılarak ölçülmüştür. Yanma havasının hacimsel debisi, 1015.2 m³/h olarak ölçülmüştür. Yanma havasına ilişkin özellikler, Tablo 2.9'da verilmiştir.

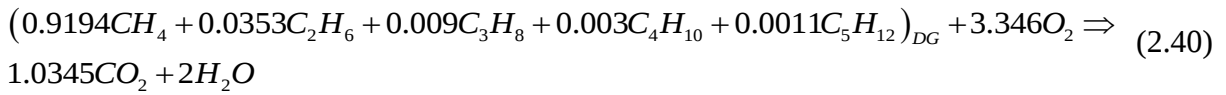
Tablo 2.9. Yanma havasının özellikleri

Yanma havasının bileşenleri	Sıcaklık	Hacimsel (%) [98]	Hacimsel Debi (m ³ /h)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütlesel Debi (kg/h)	Molar kütle (kg/kmol) [90]
N ₂	300	77.48	786.57	1.137*	894.33	28.013
O ₂	300	20.59	209.02	1.299*	271.51	31.998
CO ₂	300	0.03	0.304	1.787*	0.543	44.01
H ₂ O (g)	300	1.9	19.288	0.731*	14.099	18.015
Toplam		100	1015.2		1180.482	

Yanma havasının yoğunluğu göz önüne alındığı takdirde, yanma havasının kütleli debisi 1180.482 kg/h olarak belirlenmiştir. Tam yanma kabulü yapılarak, analizler gerçekleştirilmiştir. Baca gazlarının, kütleli debisi ve bileşenlerinin belirlenmesi önemlidir. Eşdeğerlik oranı, stokiyometrik bir süreç için λ_{st} için güncel yakıt hava oranı belirlenmiştir. Teorik olarak, stokiyometrik bir reaksiyon, sistem içerisindeki yakıt miktarının tam yanması için gerekli olan hava miktarına oranı, stokiyometrik yakıt hava oranı ile tanımlanmaktadır. Stokiyometrik yanma, en ekonomik yanma durumu olarak değerlendirilmektedir. Güncel yakıt hava oranı, Eşitlik [2.39]'de verilmiştir.

$$\frac{Y}{O} \equiv \lambda = \frac{\text{Yakıtın kütlesi}}{\text{Oksijenin kütlesi}} = \frac{0.0232}{0.0754} = 0.307 \quad (2.39)$$

Yakıt hava oranı, 0.307 olarak hesaplanmıştır. Metan (CH₄), etan (C₂H₆), propan (C₃H₈), bütan (C₄H₁₀) ve pentan (C₅H₁₂) doğal gazı oluşturan bileşenlerdir. Yakıt hava oranında, oksijenin (O₂) kütlesi ise yanma havasında bulunan oksijenin kütlesi hesaba katılmaktadır. Yakıtı oluşturan bileşenlerin hacimsel yüzdeleri, doğal gazın ideal gaz olduğu varsayımından dolayı, molar fraksiyonu olarak hesaba katılabilir. Stokiyometrik termokimyasal reaksiyon eşitliği, hidrokarbonların oluşturduğu yakıtın 1 kmol'u için Eşitlik [2.40] yazılabilir [128].



Yakıt hava oranı, Eşitlik [2.41] ile stokiyometrik bir yanma için yazılabilir.

$$\lambda_{st} = \frac{m_{dg}}{m_{oksijen}} = \frac{12 \times 1.345 + 4 \times 2}{3.346 \times 29} = 0.248 \quad (2.41)$$

Karbonun molar kütlesi 12 kg/kmol, hidrojenin molar kütlesi ise 2 kg/kmol ve oksijenin molar kütlesi ise 29 kg/kmol 'dür [90]. Eşdeğerlik oranı, Eşitlik [2.42] ile hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{\lambda}{\lambda_{st}} = \frac{0.307}{0.248} = 1.23 \quad (2.42)$$

Literatürde tartışıldığı gibi eğer eşdeğerlik oranı 0 ve 1 arasında ise meydana gelen yanma yakıt bakımından fakirdir. Aynı zamanda, fakir bir karışım olarak da nitelendirilmektedir. Eğer eşdeğerlik oran 1'e eşit ise meydana gelen yanmaya, stokiyometrik yanma olarak adlandırılmaktadır.

Eşdeğerlik oranının 1’den büyük olması durumunda ise yakıt bakımından zengin olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, zengin karışım ya da yanma olarak da nitelendirilmektedir [100]. Bu perspektifte, yeni perlit fırınında meydana gelen yanmanın, eşdeğerlik oranının 1.23 olmasından dolayı, yakıt bakımından zengin bir karışımın meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum göstermektedir ki, baca gazlarında, yanmamış hidrokarbonların mevcudiyetini belirtmektedir. Aynı zamanda, baca gazlarındaki oksijen miktarının ise sıfır olduğunu belirtmektedir. Bir başka ifade ile yanma havasındaki oksijenin tümü, yakıttaki hidrojen ve karbon ile oksitlenmiştir. Mevcut durumu göz önüne alarak, yanma eşitliği, Eşitlik [2.45] ile ifade edilmiştir. Yanma sonucu oluşan baca gazlarının tam yanma varsayımı ile birlikte, teorik analizi, Eşitlikler [2.43] ve [2.44] ile gerçekleştirilmiştir [98, 128].

$$\frac{\dot{m}_{yakıt}}{M_{yakıt}} / \frac{\dot{m}_{hava}}{M_{hava}} = \bar{\lambda} \text{ yada } \frac{\dot{n}_{yanma \text{ ürünleri}}}{\dot{n}_{hava}} = 1 + \bar{\lambda} \quad (2.43)$$

$$\frac{\left(\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{\dot{m}_{C_2H_6}}{M_{C_2H_6}} + \frac{\dot{m}_{C_3H_8}}{M_{C_3H_8}} + \frac{\dot{m}_{C_4H_{10}}}{M_{C_4H_{10}}} + \frac{\dot{m}_{C_5H_{12}}}{M_{C_5H_{12}}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} \right)_{yakıt}}{\left(\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} \right)_{hava}} = \bar{\lambda} \quad (2.44)$$

$\bar{\lambda}$, molar yakıt hava karışımını ifade etmekte olup, $\bar{\lambda}$, 0.123 olarak hesaplanmıştır. Yanmanın teorik analizinde, yanmamış hidrokarbon olarak, metan göz önüne alınmıştır. Bunun nedeni ise doğal gazın bileşenleri içerisinde, en fazla miktarda metanın bulunmasıdır. Doğal gazın hacimsel olarak % 91.94’ü metandan oluşmaktadır. Yanma açısından incelendiği zaman da, metan diğer bileşenlere nazaran, daha zor oksitlenen bir özelliğe sahiptir. Etan, propan, bütan ve pentan tam olarak oksitlenirken, baca gazlarında sadece, yanmamış hidrokarbon olarak metan görülecektir. Bu durum göz önüne alınarak, meydana gelen termokimyasal reaksiyon ve bileşenlerin katsayıları, Eşitlik [2.45] ile ifade edilmiştir [128].

$$\bar{\lambda} \left(y_{CH_4} CH_4 + y_{C_2H_6} C_2H_6 + y_{C_3H_8} C_3H_8 + y_{C_4H_{10}} C_4H_{10} + y_{C_5H_{12}} C_5H_{12} + y_{N_2} N_2 + y_{CO_2} CO_2 \right) + (y_{O_2} O_2 + y_{N_2} N_2 + y_{H_2O} H_2O + y_{CO_2} CO_2) \Rightarrow [1 + \bar{\lambda}] (x_{CO_2} CO_2 + x_{N_2} N_2 + x_{H_2O} H_2O + x_{CH_4} CH_4) \quad (2.45)$$

Eşitlik [2.46], Eşitlik [2.45]’ün karbon dengesindeki atomik türlerin korunumuna göre ifade edilebilir. Yeni perlit fırınının çerisinde, nükleer bir reaksiyonun meydana gelmediği varsayılmıştır.

$$x_{CO_2} + x_{CH_4} = \left(\bar{\lambda} \left(y_{CH_4} + 2y_{C_2H_6} + 3y_{C_3H_8} + 4y_{C_4H_{10}} + 5y_{C_5H_{12}} + y_{CO_2} \right) + y_{CO_2} \right) / (1 + \bar{\lambda}) \quad (2.46)$$

Eşitlik [2.45]’ün nitrojen dengesinden, Eşitlik [2.47] yazılmıştır.

$$x_{N_2} = \left(\bar{\lambda} (y_{N_2}) + y_{N_2} \right) / (1 + \bar{\lambda}) \quad (2.47)$$

Yine benzer olarak, Eşitlik [2.45]'ün hidrojen ve oksijen dengesinden, Eşitlik [2.48] ve [2.49] yazılabilir.

$$2x_{H_2O} + 4x_{CH_4} = \left(\bar{\lambda} (4y_{CH_4} + 6y_{C_2H_6} + 8y_{C_3H_8} + 10y_{C_4H_{10}} + 12y_{C_5H_{12}}) + 2y_{H_2O} \right) / (1 + \bar{\lambda}) \quad (2.48)$$

$$x_{H_2O} + 2x_{CO_2} = \left(\bar{\lambda} (2y_{CO_2}) + y_{H_2O} + 2y_{O_2} + 2y_{CO_2} \right) / (1 + \bar{\lambda}) \quad (2.49)$$

Eşitliklerdeki λ ve y reaksiyona giren ve yanma sonrasında oluşan ürünlerin molar fraksiyonlarını ifade etmektedir. Baca gazlarının sıcaklığı, 973 K olarak ölçülmüştür. Yanma ürünlerinin molar debisi, Eşitlik [2.43] kullanılarak, 46.278 kmol/h olarak belirlenmiştir. Yanma ürünlerini oluşturan her bir bileşenin kütledebisi, molar fraksiyon kullanılarak belirlenebilir. Yanma ürünlerinin özellikleri ve elde edilen sonuçlar, Tablo 2.10'da gösterilmiştir.

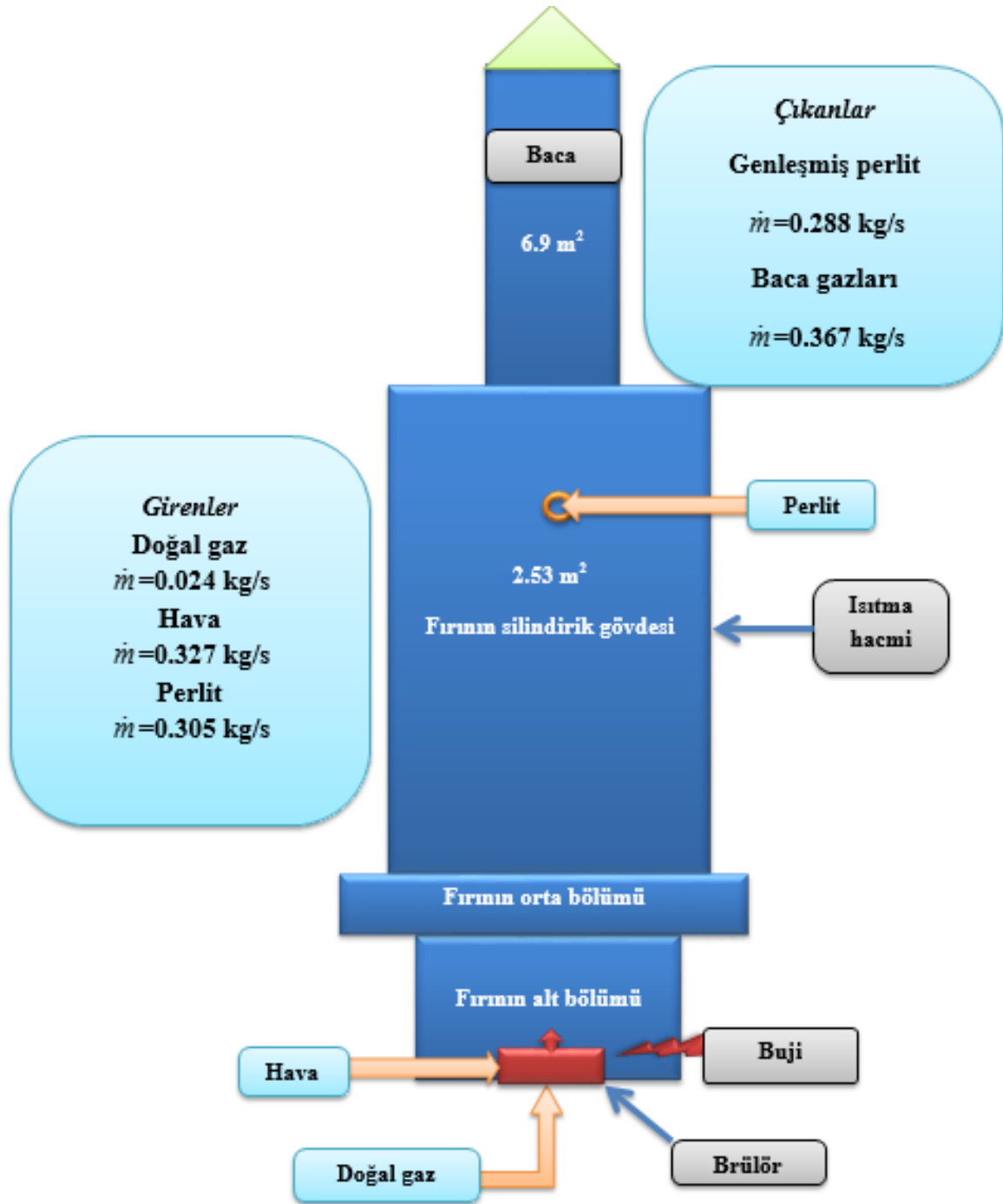
Tablo 2.10. Yanma sonucu oluşan ürünlerin özellikleri

Yanma gazlarının bileşenleri	Mol fraksiyonu	Molar debisi (kmol/h)	Molar kütle (kg/kmol) [90]	Kütledebisi (kg/h)	Perlitteki nem ve içeriğindeki su (kg/h)	Toplam kütledebisi (kg/h)
N ₂	0.6927	32.056	28.013	897.984	-	897.984
CH ₄	0.0196	0.907	16.043	14.551	-	14.551
CO ₂	0.0943	4.208	44.01	185.194	-	185.194
H ₂ O (g)	0.1968	9.107	18.015	164.062	61.20	225.262
Toplam	1	46.278		1262		1323.2

Daha öncede ifade edildiği gibi ham perlitin içeriğinde, belirli bir miktarda su bulunmaktadır. Buna ilave olarak, perlitin üzerindeki nem miktarı ise işletmenin gelişmiş laboratuvarlarındaki ölçüm cihazları kullanılarak belirlenmiştir. Böylece, baca gazlarının toplam kütledebisi, 1323.2 kg/h olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kontrol hacim olarak seçilen yeni perlit fırınının kütle dengesi, yapılan kabuller, ölçümler ve hesaplamalar ışığında, Eşitlik [2.50] ile ifade edilebilir.

$$\sum_{giren} \dot{m} = \sum_{çıkan} \dot{m} \quad (2.50)$$

Kütle dengesi, akış diyagramı, kontrol hacim ve yeni perlit fırını oluşturulan kısımlar, Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Yeni perlit fırının akış şeması ve kütle dengesi [128]

2.5.1. Yeni Perlit Fırınının Enerji ve Ekserji Analizleri

Kontrol hacmi olarak seçilen yeni perlit fırınına, enerji girişi, yanma havası, yakıtın kimyasal ve duyulur enerjisi ve de ham perlit ile gerçekleşmektedir. Kontrol hacimden enerji çıkışı ise yanma ürünlerinin oluşturduğu baca gazları, yetersiz yalıtım sonucunda oluşan ısı kayıpları ve genleşmiş perlit ile gerçekleşmektedir. Kontrol hacminin enerji dengesi uygulandığı zaman, Eşitlik [2.51] elde edilmiştir.

$$-\dot{E}_k + \dot{E}_{yh} + \dot{E}_{DG} + \dot{E}_{per} - \dot{E}_{G.per} - \dot{E}_{bg} = 0 \quad (2.51)$$

Burada, $\dot{E}_k$ enerji kayıplarını, $\dot{E}_{yh}$ yanma havasının fiziksel enerjisini, $\dot{E}_{DG}$ doğal gazın kimyasal ve fiziksel enerjisini, $\dot{E}_{per}$ ham perlitin enerjisini, $\dot{E}_{G.per}$ genleşmiş perlitin enerjisini, $\dot{E}_{bg}$ baca gazlarının fiziksel ve kimyasal enerjisini göstermektedir. Kontrol hacmine giren ve çıkan parametrelerin özgül ısı kapasiteleri Eşitlik [2.52] kullanılarak belirlenmiştir [90].

$$\bar{C}_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + dT^3 \quad (2.52)$$

Eşitlik (2.52) deki $\bar{C}_p$ özgül ısı kapasitesinin, kJ/kmol·K biriminde gösterilmiştir. Her bir parametrenin molar kütlesi kullanılarak, C_p değeri kJ/kg·K olarak elde edilmiştir. Eşitlik [2.52]'de kullanılan a,b,c ve d parametreleri, Ek Tablo 1.7'de gösterilmiştir. Hem perlitin hem de genleşmiş perlitin özgül ısı kapasitelerinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmış ve $C_p = 0.831$ kJ/kg·K alınmıştır. Perlit sadece fiziksel enerjiye sahiptir. Aynı durum, yanma havası için de geçerlidir. Reaksiyon entalpisi ya da standart oluşum entalpisi için yakıtı oluşturan her bir bileşenin entalpilerinin hesaplanması için göz önüne alınması gerekmektedir. Bu entalpi değeri, yakıtı oluşturan bileşenlerin alt ısı değerleri ile ilişkilidir. Enerji denge denklemindeki giriş parametreleri, teorik olarak, deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar ile hesaplanmıştır. Kontrol hacmine giren parametrelerin enerji değerleri, kullanılan eşitlikler, eşitliklerde kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlar, Ek Tablo 1.4'de verilmiştir. Kontrol hacminden çıkan baca gazları, hem kimyasal hem de fiziksel enerji değerlerine sahiptir. Baca gazlarının kimyasal enerjiye sahip olmasının nedeni, yanmamış hidrokarbonların (metan) mevcut olmasıdır. Genleşmiş perlit ise sadece fiziksel enerjiye sahiptir. Perliti oluşturan bileşenlerden biri de, % 5.5 oranında nem içermesidir. Bu nem içeriği, fırın içerisinde buharlaşmaktadır. Böylece, genleşmiş perlitin kütleli debisi 0.288 kg/s olarak belirlenmiştir. Analizleri gerçekleştirilen yeni perlit fırınının dış yüzeyi, farklı sıcaklık değerlerine sahiptir.

Bacanın sıcaklığı 1010 K olarak ölçülmüştür. Fırının üst, orta ve alt bölümlerinin sıcaklıkları ise 473 K olarak ölçülmüştür. Kontrol hacmi olan fırının dış yüzeyinden, doğal taşınım ve ışıınım ile gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları ile enerji kayıpları meydana gelmektedir. Fırından meydana gelen enerji kayıplarının hesaplanmasında kullanılan parametreler, eşitlikler ve elde edilen sonuçlar, Ek Tablo 1.5’de verilmiştir. Toplam kayıp enerji miktarı, 365.459 kW olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, 51.54 kW değerinde hesaplanamayan bir kayıp enerji değeri, enerji dengesinden hesaplanmıştır. Hesaplanamayan bu değer de, toplam enerji kaybı ile birlikte göz önüne alınarak, toplam enerji kaybı 416.999 kW olarak hesaplanmıştır. Yanmayan hidrokarbonların ve enerji kayıplarının oranlarının göz önüne alınması gereklidir. Böylece, kayıp enerji miktarına denk gelen maliyet değerleri hesaplanabilir. Kontrol hacminin yüzeyinden, yetersiz yalıtım sonucu meydana gelen kayıp enerji miktarının 416.999 kW olduğu belirtilmiştir. Bu enerjiyi elde etmek için harcanması gereken doğal gaz miktarından, yetersiz yalıtım sonucu meydana gelen enerji kayıplarının maliyeti hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_k = \dot{m}_{k,DG} AID_{ort} \quad (2.53)$$

Eşitlik [2.53]’de gösterilen AID_{ort} doğal gazın ortalama alt ısı değerini ifade etmektedir. $\dot{m}_{k,DG}$ ise kütleli debisini ifade etmektedir. Kütleli debi, kayıp enerji miktarına denk gelen miktarı ifade etmektedir. Doğal gazın ortalama alt ısı değeri, Eşitlik [2.54] ile hesaplanmıştır.

$$AID_{ort} = \sum X_i \cdot AID_i \quad (2.54)$$

Eşitlikteki X parametresi, doğal gazı oluşturan her bir parametrenin kütle fraksiyonunu ifade etmektedir. Doğal gazın ortalama alt ısı değeri, 49977.36 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Eşitlik [2.53] kullanılarak, $\dot{m}_{k,DG}$, 8.87×10^{-3} kg/s olarak hesaplanmıştır.

Doğal gazın fiyatlandırılma işlemi, hacimsel olarak yapıldığından dolayı, yetersiz yalıtım sonucunda meydana gelen kayıp enerjiye denk gelen doğal gazın kayıp hacimsel debisini hesaplayabiliriz. Doğal gazı oluşturan bileşenlerin ortalama yoğunluğu, Eşitlik [2.55] ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{ort} = \sum X_i \cdot \rho_i \quad (2.55)$$

300 K sıcaklığındaki doğal gazın ortalama yoğunluğu 0.762 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, tezin bulgular bölümünde tartışılmıştır. Yeni perlit fırınının enerji verimi, Eşitlik [5.56] ile hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\sum_{\text{çıkan}} \dot{E}}{\sum_{\text{giren}} \dot{E}} \quad (2.56)$$

Bu eşitliğe göre, yeni perlit fırının enerji verimi % 69 olarak hesaplanmıştır.

Daha öncede bahsedildiği gibi ekserji, bir Termodinamik sistemden elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlanmıştır. Enerjinin korunumu yasası yeni perlit fırınına uygulandıktan sonar, ekserji kavramının ifade edildiği Termodinamiğin İkinci yasası, yeni perlit fırınına uygulanmıştır. Yeni perlit fırınının ekserji dengesi, Eşitlik [2.57] ile ifade edilmiştir [128].

$$\dot{E}x_{yh} + \dot{E}x_{DG} + \dot{E}x_{per} - \dot{E}x_{bg} - \dot{E}x_{G.per} - \dot{E}x_k = Ex_{yıkım} \quad (2.57)$$

Eşitlik [2.57]'deki $Ex_{yıkım}$, ekserji yıkım akımını ifade etmektedir. $\dot{E}x_{yh}$ ise yanma havasının fiziksel ekserji akımı, $\dot{E}x_{DG}$, yakıtın kimyasal ve fiziksel ekserji akımını, $\dot{E}x_{per}$, ham perlitin fiziksel ekserji akımını, $\dot{E}x_{bg}$, yanma sonucu oluşan yanma ürünlerinin veya baca gazlarının fiziksel ve kimyasal ekserji akımlarını, $\dot{E}x_{G.per}$, genleşmiş perlitin fiziksel ekserji akımını ve son olarak $\dot{E}x_k$, kayıp enerjinin ekserji akımını ifade etmektedir. Yanma havasının fiziksel ekserji akımı, Eşitlik [2.58] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{yh} = \dot{m}_{yh} \cdot \left[(h_{yh} - h_{\infty}) - T_{\infty} \cdot (s_{yh} - s_{\infty}) \right] \quad (2.58)$$

Yanma havasının ekserjisi, havanın referans çevre şartlarında ($(h_{yh} = h_{\infty})$ ve $(s_{yh} = s_{\infty})$) olmasından dolayı sıfırdır. Fırında kullanılan yakıtın hem fiziksel hem de kimyasal ekserji değerine sahiptir. Yakıt olarak kullanılan doğal gazın fiziksel ekserji akımı, Eşitlik [2.59] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{DG} = \dot{E}x_{DG}^{fiz} + \dot{E}x_{DG}^{kim} \quad (2.59)$$

Herhangi bir ön ısıtma işlemi durumu olmadığından dolayı, referans çevre şartlarında doğal gaz fırına girmektedir. Sonuç olarak, yakıtın fiziksel ekserji akımı ($(h_{DG} = h_{\infty})$ ve $(s_{DG} = s_{\infty})$) sıfırdır.

Yakıtın fiziksel ekserji akımı ise Eşitlik [2.60] ile hesaplanmıştır [98, 128].

$$\dot{E}x_{DG}^{kim} = \left[\dot{m}_{CH_4} \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_{CH_4}^o}{M_{CH_4}} \right) + \dot{m}_{C_2H_6} \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_{C_2H_6}^o}{M_{C_2H_6}} \right) + \dot{m}_{C_3H_8} \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_{C_3H_8}^o}{M_{C_3H_8}} \right) + \dot{m}_{C_4H_{10}} \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_{C_4H_{10}}^o}{M_{C_4H_{10}}} \right) + \dot{m}_{C_5H_{12}} \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_{C_5H_{12}}^o}{M_{C_5H_{12}}} \right) \right] \quad (2.60)$$

Eşitlik [2.60]'deki $\bar{\varepsilon}^o$ parametresi, yakıtı oluşturan her bir bileşenin standart kimyasal ekserji akımını ifade etmektedir. M ise molar kütle simgelemektedir. Yeni perlit fırınında kullanılan yakıtın kimyasal ekserji akımı 1207.45 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji dengesindeki ham perlitin ekserji akımı, perlitin çevre şartlarında fırına girmesinden dolayı $((h_{per} = h_{\infty}) \text{ ve } (s_{per} = s_{\infty}))$ sıfırdır. Yanma sonucunda oluşan yanma sonu ürünlerinin ekserji analizinde, fiziksel ve kimyasal ekserji akımları ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Yanma sonu ürünlerinin ekserji akımları Eşitlik [2.61] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{bg} = \dot{E}x_{bg}^{fiz} + \dot{E}x_{bg}^{kim} \quad (2.61)$$

Yanma sonu ürünleri, bir gaz karışımı olmasından dolayı, Eşitlik [2.62] ve [2.63] kullanılarak, yanma sonu ürünlerinin kimyasal ekserji akım değerleri hesaplanmıştır.

$$\bar{e}_{ex,i}^{kim} = x_i' \cdot \bar{\varepsilon}_i^o + \bar{R} \cdot T_{\infty} \cdot x_i' \ln(x_i) \quad (2.62)$$

Eşitlik [2.62]'da x ile gösterilen parametre, yanma ürünlerinin mol fraksiyonunu ifade etmektedir. $\bar{e}_{ex}^{kim}$ ise özgül kimyasal ekserji değerini, $\bar{R}$, universal gaz sabitini simgelemektedir [99]. Kütle dengesinde belirtildiği gibi baca gazlarında, zengin karışımdan dolayı, yanmamış hidrokarbonların olduğu görülmüştür. Doğal gazı oluşturan bileşenler arasında, kütle olarak en fazla yoğunlukta bulunan metanın, baca gazları içerisinde bulunmasından dolayı, farklı bir açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir. Yanma sonu ürünlerinin kimyasal ekserji akımları ile birlikte, yanmamış hidrokarbonların da, kimyasal ekserji akımlarının hesaplanması gerekmektedir. Baca gazlarının kimyasal ekserji akımı, Eşitlik [2.63] ile hesaplanmıştır [128].

$$\dot{E}x_{bg}^{kim} = \left[\dot{m}_{N_2} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,N_2}^{ch}}{M_{N_2}} \right) + \dot{m}_{CO_2} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,CO_2}^{ch}}{M_{CO_2}} \right) + \dot{m}_{H_2O} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,H_2O}^{ch}}{M_{H_2O}} \right) \right] + \left[\dot{m}_{CH_4} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{CH_4}^o}{M_{CH_4}} \right) \right] \quad (2.63)$$

Baca gazını oluşturan her bir bileşenin fiziksel ekserji akımı ise Eşitlik [2.62] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{bg}^{fiz} = \dot{m}_{bg} \cdot [(h_{bg} - h_{\infty}) - T_{\infty} \cdot (s_{bg} - s_{\infty})] \quad (2.64)$$

Baca gazlarının fiziksel ekserji akımı, 179.861 kW, kimyasal ekserji akımı ise 210.754 kW olarak hesaplanmıştır. Baca gazlarının toplam ekserji akımı, 396.210 kW olduğu belirlenmiştir.

Ekserji dengesinde ifade edilen genişmiş perlitin fiziksel ekserji akımı ise Eşitlik [2.65] kullanılarak 59.109 kW olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{E}X_{G,per} = \dot{m}_{G,per} \cdot \left[C_{p,G,per} \cdot \left((T_{G,per} - T_{\infty}) - T_{\infty} \cdot \ln \left(\frac{T_{G,per}}{T_{\infty}} \right) \right) \right] \quad (2.65)$$

Genleşmiş perlitin ekserji akımı, 59.109 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji dengesinde ifade edilen bir diğer parametre olan, termal ekserji veya kayıp ekserji akımı ise Eşitlik [2.66] ile belirlenmiştir.

$$\dot{E}X_k = \left[\left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{yüzey}} \right) \cdot E_k \right] \quad (2.66)$$

Yeni perlit fırının ekserji verimi ise Eşitlik [2.67] kullanılarak % 37 olarak bulunmuştur.

$$\eta_{II} = \frac{\sum_{\text{çıkan}} \dot{E}X}{\sum_{\text{giriş}} \dot{E}X} \quad (2.67)$$

Enerji kaynaklarının yenilenebilir ya da sürdürülebilir olarak kullanılması tek başına yetersiz olarak görülmektedir. Aynı zamanda, yenilenemeyen enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum, sadece ekonomik açıdan değerlendirilmemektedir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının, çevreye olan zararlarını minimum indirmesi, önemli bir parametredir. Sınırlı kaynakların kullanımını, öngörülenden daha fazla kullanılmasını sağlayarak, mevcut yenilenemeyen enerji kaynaklarının mevcudiyeti, daha da uzatılabilir. Bu kavramı, sürdürülebilirlik indeksi, Eşitlik [2.68] ile ifade edilmeye çalışılmaktadır.

$$SI = 1 / D_p \quad (2.68)$$

Burada, D_p değeri, ekserji yıkımının, giren ekserjiye bölümüyle elde edilmektedir. Yeni perlit fırınının sürdürülebilirlik indeksi, $SI=2.56$ olarak hesaplanmıştır.

2.6. Döner Fırının Ekserji Analizi

Döner fırının ekserji analizlerinde göz önüne alınması gereken kabuller söz konusudur. Bu kabuller, ihmal edilebilecek parametreler ile birlikte, analizlerde belirlenmesi gereken bazı parametrelerin elde edilememesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Döner fırının ekserji analizde yapılan kabuller:

- Fırın içerisinde tam yanma gerçekleşmektedir ve N_2 reaksiyona girmemektedir.
- Fırının girişinde ve çıkışındaki basınçlar 1 atm olarak kabul edilmiştir.

- Döner fırının sabit sınır şartlarında çalıştığı varsayılarak, giren kütlenin çıkan kütleye eşit olduğu ve kontrol hacim içerisindeki zaman bağlı kütle değişiminin olmadığı varsayılmıştır.
- Yakma havası, doğal gaz ve baca gazları, ideal gaz olarak nitelendirilmiştir.
- Döner fırının döndürülmesinde harcanan elektrik enerjisi, analizlerde göz önüne alınmamıştır.
- Kontrol hacmine giren ve çıkan parametrelerin kinetik ve potansiyel enerjileri ihmal edilmiştir.
- Döner fırının ekserji analizlerindeki çevre şartları, $P_{\infty} = 1 \text{ atm}$ ve $T_{\infty} = 300 \text{ K}$ 'dir.

2.6.1. Döner Fırının Kütle Dengesi

Yapılan kabuller ışığında, kontrol hacmine giren parametrelerin bazı özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi döner fırında yakıt olarak doğal gaz kullanılmaktadır. Doğal gazın dağıtımından sorumlu olan kuruluş, belirli bir değerin üzerinde doğal gaz tüketimi gerçekleştiren kurum ve kuruluşlara, doğal gazın içeriği hakkında, belirli periyotlarda bilgi paylaşımı yapmaktadır. Doğal gaz bir gaz karışımı olduğundan dolayı, doğal gazı oluşturan bileşenler zaman zaman değişkenlik göstermektedir. Doğal gazın dağıtımından sorumlu olan şirketin, analizleri gerçekleştirilen tesise verdiği, doğal gaz içeriği ve yakma havasının bileşenleri Tablo 2.7'de gösterilmiştir.

2.6.1.1. Doğal Gazın Özellikleri

Doğal gazın hacimsel debisi, $456 \text{ m}^3/\text{h}$ ve kütleli debisi 323.186 kg/h olarak ölçülmüştür. Doğal gaz, herhangi bir ön ısıtma işlemine tabii olmadan, referans çevre şartlarında ($P_{\infty} = 1 \text{ atm}$ ve $T_{\infty} = 300 \text{ K}$) firma girmektedir. Doğal gazı oluşturan bileşenlere ilişkin bilgiler Tablo 2.7'de gösterilmiştir. Doğal gazı oluşturan bileşenlerin her birinin molar kütlesi, alt ısı değeri, hacimsel debisi, yoğunluğu ve kütleli debileri Tablo 2.11'de gösterilmiştir. Yanma sonucu oluşan suyun buhar fazında olmasından dolayı, enerji hesaplamalarında, doğal gazın alt ısı değeri göz önüne alınacaktır.

Tablo 2.11. Doğal gazın özellikleri

Bileşenler	Molar kütle (kg/kmol) [90]	Alt ısı değeri (kJ/kg) [90]	Hacimsel debi (m ³ /h)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütleli debi (kg/h)
CH ₄	16.043	50,050	419.246	0.651*	272.929
C ₂ H ₆	30.070	47,520	16.096	1.221*	19.654
C ₃ H ₈	44.097	46,340	4.104	1.791*	7.35
C ₄ H ₁₀	58.123	45,370	1.732	2.356*	4.082
C ₅ H ₁₂	72.150	44,910	0.501	2.931*	1.47
N ₂	28.013	-	11.704	1.137*	13.79
CO ₂	44.01	-	2.112	1.787*	3.911
Toplam			456		323.186

* 300 K

2.6.1.2. Yakma Havaının Özellikleri

Yakma havaının hacimsel bileşenleri Tablo 2.12’de gösterilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, yakma havaının hacimsel debisi 11,537.05 m³/h olarak belirlenmiştir. Yakma havaının özellikleri Tablo 2.12’de gösterilmiştir.

Tablo 2.12. Yakma havaının özellikleri

Bileşenler	Sıcaklık (K)	Hacimsel oran (%) [98]	Hacimsel debi (m ³ /h)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütleli debi (kg/h)	Molar kütle (kg/kmol) [90]
N ₂	302	77.48	8,938.91	1.130	10,100.97	28.013
O ₂	302	20.59	2,375.47	1.291	3,066.74	31.998
CO ₂	302	0.03	3.461	1.775	6.143	44.01
H ₂ O (g)	302	1.9	219.203	0.726	159.142	18.015
Toplam		100	11,537.05		13,332.99	

Yakma havaının kütleli debisi 13,332.99 kg/h olarak belirlenmiştir.

2.6.1.3. Alçı Tozunun ve Alçı Taşının Özellikleri

Eşitlik [2.1]’de görüldüğü gibi alçı taşının bünyesindeki suyun % 15’i buharlaştırıldığı zaman, alçı tozu elde edilmektedir. Alçı taşının kütleli debisi 22,544.64 kg/h olarak ölçülmüştür. Alçı taşının, % 1.12 oranında serbest nem değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nem değeri ile birlikte döner fırın içerisine giren su miktarı ise 255.24 kg/h’dır. Döner fırına giren alçı taşı ve serbest nem ile birlikte toplam kütleli debi 22,800 kg/h olarak belirlenmiştir. Alçı taşıdaki % 15 suyun ve serbest nem buharlaştırıldığı zaman, alçı tozunun kütleli debisi 19,162.8 kg/h olmaktadır.

Baca gazı içerisinde, alçı tozundan buharlaşan ve yanma sonucunda oluşan su buharı miktarı oldukça yüksektir. Alçı taşının ve alçı tozunun özgül ısı kapasitesi, 1.09 ve 0.9 kJ/kg·K'dir.

2.6.1.4. Baca Gazının Özellikleri

Baca gazını oluşturan bileşenlerin içeriği ölçülememiştir. Bu nedenden dolayı, yanmanın tam olduğu varsayımı yapılmıştır. Baca gazına ilişkin ayrıntılı özelliklerin belirlenmesi için tam yama sonucunda oluşan ürünlerin kütleli debilerinin belirlenmesi önemlidir. Yakıt hava oranı, Eşitlik [2.69] ve [2.70] ile belirlenmiştir [98, 128].

$$\frac{\dot{m}_{yakıt}}{M_{yakıt}} / \frac{\dot{m}_{yh}}{M_{yh}} = \lambda \quad \text{yada} \quad \frac{\dot{n}_{yü}}{\dot{n}_{yh}} = 1 + \lambda \quad (2.69)$$

$$\frac{\left(\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{\dot{m}_{C_2H_6}}{M_{C_2H_6}} + \frac{\dot{m}_{C_3H_8}}{M_{C_3H_8}} + \frac{\dot{m}_{C_4H_{10}}}{M_{C_4H_{10}}} + \frac{\dot{m}_{C_5H_{12}}}{M_{C_5H_{12}}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} \right)}{\left(\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} \right)_{yh}} = \frac{18.501}{468.394} = \lambda \quad (2.70)$$

Buradaki λ , yakıt hava oranını gösterir ve değeri 0.0397 olarak hesaplanmıştır. Mevcut durum göz önüne alındığı zaman, yanma eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir [128].

$$\lambda(0.9194 CH_4 + 0.0353 C_2H_6 + 0.009 C_3H_8 + 0.0038 C_4H_{10} + 0.0011 C_5H_{12} + 0.026 N_2 + 0.0048 CO_2) + (0.2059 O_2 + 0.7748 N_2 + 0.019 H_2O + 0.0003 CO_2) \Rightarrow [1+\lambda](x_{CO_2} CO_2 + x_{O_2} O_2 + x_{N_2} N_2 + x_{H_2O} H_2O) \quad (2.71)$$

Baca gazlarının sıcaklığı kontrol hacminin çıkışından alınan ölçümler sonucunda 433 K olarak belirlenmiştir. Yanma ürünlerinin molar debisi, Eşitlik [2.69] kullanılarak, 486.98 mol/h olarak hesaplanmıştır. Yanma sonucu oluşan ürünlerin her birinin kütleli debisini, mol fraksiyonunu ve diğer özellikleri, Tablo 2.13'de gösterilmiştir.

Tablo 2.13. Baca gazının özellikleri

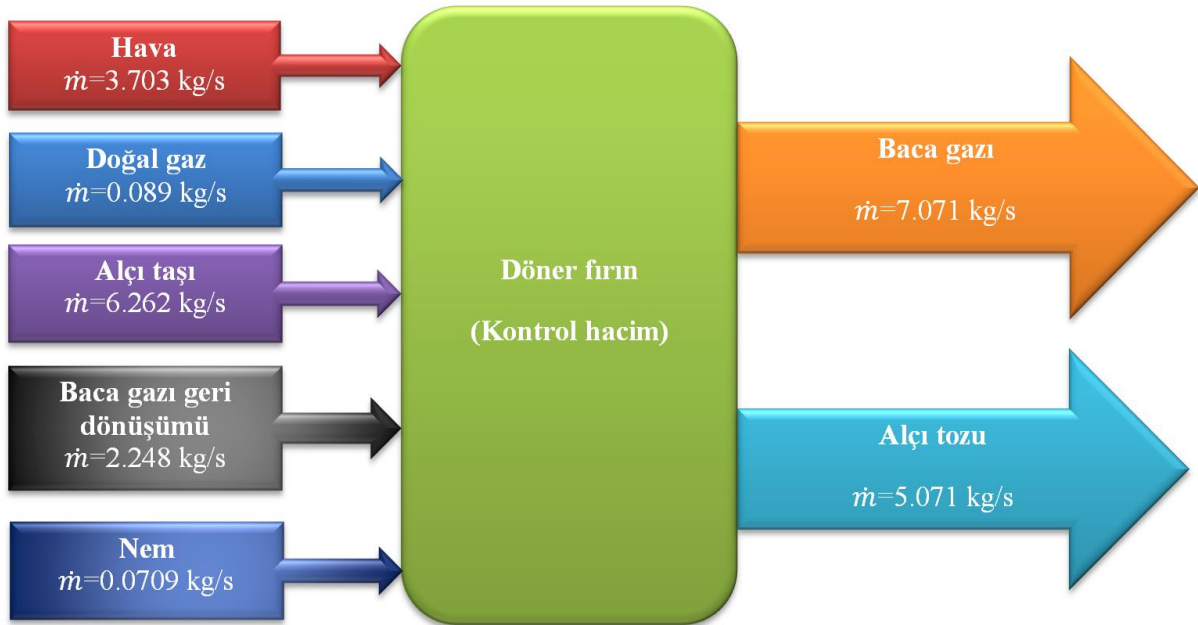
Bileşenler	Mol fraksiyonu	Molar debi (kmol/h)	Molar kütle (kg/kmol) [90]	Kütleli debi (kg/h)	Alçı taşının dehidrasyonu (kg/h)	Baca gazı geri dönüşümü (kg/h)	Baca gazlarının toplam debisi (kg/h)
N ₂	0.746	363.287	28.013	10,176.75	-	4,719.6	14,896.3
O ₂	0.12	58.437	31.998	1,869.867	-	871.2	2,741.06
CO ₂	0.04	19.479	44.01	857.27	-	399.6	1,256.87
H ₂ O (g)	0.094	45.776	18.015	824.654	3,636.94	2,102.4	6,563.99

Baca gazlarının % 10.76'sını oksijen oluşturmaktadır. Baca gazları içerisindeki oksijenin kütleli debisi ise 0.7614 kg/s olarak belirlenmiştir. Reaksiyona girmeyen oksijen miktarı, yakma havasının gerekenden fazla olduğunu göstermektedir.

Bunun nedeni ise yakma havası, doğal gaz ile reaksiyona girecek olan oksijeni sağlamak ile birlikte, alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi için bir momentum kaynağı olarak kullanılmasıdır. Baca gazlarının toplam debisi 25,458.231 kg/h olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, kontrol hacim olarak seçilen döner fırının kütle dengesi oluşturulabilir. Yapılan kabuller ışığında, kontrol hacmi için kütle dengesi, Eşitlik [2.72] ile ifade edilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (2.72)$$



Şekil 2.22. Döner fırının kütle dengesi

Şekil 2.19’da gösterilen yöntemle göre, döner fırının enerji analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

2.6.2. Döner Fırının Enerji Dengesi

Kontrol hacmine giren ve çıkan parametrelerin kinetik ve potansiyel enerjileri ihmal edilmiştir. Döner fırının döndürülmesi için harcanan elektrik enerjisi de, enerji analizinde göz önüne alınmamıştır. Gözönüne alınmayan bu parametrelerin çok küçük değerlerde olmasından dolayı ihmal edilmiştir.

Söz konusu kontrol hacmine uygulanan kütle dengesinden sonra, Termodinamiğin Birinci Kanunu çerçevesinde ifade edilen enerjinin korunumu uygulanmıştır. Kontrol hacim veya döner fırın için enerji dengesi Eşitlik [2.73] ile ifade edilmiştir [129].

$$-\dot{E}_k + \dot{E}_{yh} + \dot{E}_{DG} + \dot{E}_{A.taşı} + \dot{E}_{bgg} + \dot{E}_n - \dot{E}_{bg} - \dot{E}_{A.tozu} = 0 \quad (2.73)$$

Eşitlik [2.73]'da, $\dot{E}_k$ kayıp enerjiyi, $\dot{E}_{yh}$ yakma havasının enerjisini, $\dot{E}_{DG}$ yakıtın toplam enerjisini, $\dot{E}_n$ nemin enerjisini, $\dot{E}_{A.taşı}$ alçı taşının, $\dot{E}_{bgg}$ baca gazı geri dönüşümünün, $\dot{E}_{bg}$ baca gazlarının ve son olarak $\dot{E}_{A.tozu}$ alçı tozunun enerjisini ifade etmektedir. Yakma havasının, doğal gazın ve baca gazlarının özgül ısı kapasitesi, Eşitlik [2.74] kullanılarak hesaplanmıştır [90].

$$\bar{C}_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (2.74)$$

Buradaki, $\bar{C}_p$ özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir. kJ/kmol·K biriminde olan özgül ısı kapasitesini, her bir parametrenin molar kütlesi kullanılarak, kJ/kg·K birimde ifade edilebilir. Üçüncü dereceden bir polinom ile ifade edilen Eşitlik [2.74] deki a, b, c ve d parametreleri, her bir parametre için Ek Tablo 1.7'de gösterilmiştir.

Döner fırında yakıt olarak kullanılan doğal gazın hem fiziksel hem de kimyasal enerjisi göz önüne alınmalıdır. Doğal gazın toplam enerjisi, Eşitlik [2.75] ile 4277.66 kW olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{DG} = \dot{E}_{DG}^{fiz} + \dot{E}_{DG}^{kim} \quad (2.75)$$

Doğal gazın fiziksel enerjisi, Eşitlik [2.76] ile ifade edilmiş ve 56.87 kW bulunmuştur.

$$\dot{E}_{DG}^{fiz} = \dot{m}_{DG} \cdot h_{DG} = \dot{m}_{DG} \cdot C_{p,DG} \cdot T_{DG} \quad (2.76)$$

Yakıtın kimyasal enerjisi için reaksiyon entalpisinin göz önüne alınması gerekmektedir. Reaksiyon entalpisi, doğal gazı oluşturan her bir bileşenin alt ısı değeri ile ilişkilidir. Söz konusu değerlere ve analizde kullanılan parametrelere ilişkin bilgiler Ek Tablo 1.4'de gösterilmiştir. Doğal gazın kimyasal enerjisi, Eşitlik [2.77] ile 4220.78 kW olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{DG}^{kim} = \dot{m}_{DG} \cdot AID \quad (2.77)$$

Yakma havası sadece fiziksel enerjiye sahiptir. Döner fırının enerji dengesini ifade eden Eşitlik [2.73]'deki $\dot{E}_{yh}$ parametresi, Eşitlik [2.78] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{yh} = \dot{m}_{yh} \cdot h_{yh} = \dot{m}_{yh} \cdot C_{p,yh} \cdot T_{yh} \quad (2.78)$$

Eşitlik [2.78]'deki $C_{p,yh}$ havayı oluşturan parametrelerin özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir. Eşitlik [2.74] ile hesaplanan $C_{p,yh}$ için elde edilen değerler EK Tablo 1.4'de gösterilmiştir. Eşitlik [2.78] ile hesaplanan havanın fiziksel enerjisi, 1141.81 kW olarak hesaplanmıştır. Alçı taşı ile birlikte, döner fırına giren enerji değeri Eşitlik [2.79] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{A.taşı} = \dot{m}_{A.taşı} \cdot h_{A.taşı} = \dot{m}_{A.taşı} \cdot C_{p,A.taşı} \cdot T_{A.taşı} \quad (2.79)$$

Alçı taşının özgül ısı kapasitesi 1.09 kJ/kg·K olarak alınmış olup, alçı taşı ile birlikte, kontrol hacmine giren enerji, 2,047.67 kW olarak hesaplanmıştır. Alçı taşı ile birlikte döner fırına giren nem ile birlikte bir enerji girişi söz konusudur. Serbest nem olarak adlandırılan ve alçı taşının üzerinde yoğunlaşan suyun özgül ısı kapasitesi 4.22 kJ/kg·K iken kütleli debisi 0.0709 kg/s olarak belirlenmişti. Serbest nemin enerjisi Eşitlik [2.80] ile 89.75 kW olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_n = \dot{m}_n \cdot C_{p,n} \cdot T_n \quad (2.80)$$

Döner fırına giren son parametre ise baca gazı geri dönüşümüdür. Baca gazlarının geri dönüşümü ile fırına giren kütleli debi 2.26 kg/s olarak ölçülmüştü. Bu gazların sıcaklığı 353 K olarak ölçülmüştür. Baca gazlarının geri dönüşümü ile birlikte döner fırına giren enerji miktarı Eşitlik [2.81] ile hesaplanmıştır ve 987.9 kW bulunmuştur.

$$\dot{E}_{bgg} = \dot{m}_{bgg} \cdot h_{bgg} \quad (2.81)$$

Döner fırına giren toplam enerji miktarı ise 8544.81 kW olarak hesaplanmıştır.

Döner fırına giren parametrelerden sonra, fırından çıkan parametrelerin enerji miktarı göz önüne alınmıştır. Yanma sonucunda, alçı taşı üzerindeki nemin buharlaşması ve alçı taşı bünyesindeki suyun buharlaştırılması ile oluşan baca gazlarının enerjisi, Eşitlik [2.82] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{bg} = \dot{m}_{bg} \cdot h_{bg} = \dot{m}_{bg} \cdot C_{p,bg} \cdot T_{bg} \quad (2.82)$$

Baca gazlarını oluşturan her bir parametrenin özgül ısı kapasitesi, debisi ve sıcaklığı belirlenerek, baca gazları ile birlikte döner fırından çıkan enerji miktarı hesaplanmıştır. Baca gazlarının sıcaklığı 433 K olarak ölçülmüştür. Baca gazları ile birlikte çıkan enerji miktarı ise 3,872.78 kW olarak hesaplanmıştır. Tam yanma kabulü yapıldığından dolayı, yaktı oluşturan tüm hidrokarbonların yandığı varsayılmıştır. Bundan dolayı, baca gazlarının her hangi bir kimyasal enerjiye sahip olmadığı ve sadece fiziksel enerjiye sahiptir.

Kontrol hacim olan döner fırından, kütleli olarak çıkan son parametre alçı tozudur. Alçı tozu ile birlikte döner fırından çıkan enerji miktarı Eşitlik [2.83] ile 2074.37 kW olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{A.tozu} = \dot{m}_{A.tozu} \cdot h_{A.tozu} = \dot{m}_{A.tozu} \cdot C_{p,A.tozu} \cdot T_{A.tozu} \quad (2.83)$$

Döner fırının Termodinamiğin Birinci Kanunu çerçevesindeki enerji verimi, Eşitlik [2.84] ile hesaplanmış ve verim değeri % 69 olarak bulunmuştur.

$$\eta = \frac{\sum_{\text{çikan}} \dot{E}}{\sum_{\text{giren}} \dot{E}} \quad (2.84)$$

2.6.3. Döner Fırının Ekserji Dengesi

Termodinamiğin İkinci Kanunu, ekserji ve entropi kavramları ile enerji sistemlerinin analizindeki yetersizliği kapatmaktadır [107]. Döner fırının ekserji dengesi, Eşitlik [2.85]'deki gibi yazılabilir [129].

$$\dot{E}x_{yh} + \dot{E}x_{DG} + \dot{E}x_{A.taşı} + \dot{E}x_{bgg} + \dot{E}x_n - \dot{E}x_{bg} - \dot{E}x_{A.tozu} - \dot{E}x_k = \dot{E}x_{yıkım} \quad (2.85)$$

Eşitlik [2.85]'deki, $\dot{E}x_{yıkım}$ ekserji yıkım akımını, $\dot{E}x_{DG}$ yakıtın fiziksel ve kimyasal ekserji akımlarını, $\dot{E}x_n$ alçı taşının üzerindeki serbest nemin ekserji akımını, $\dot{E}x_{A.taşı}$ alçı taşının ekserji akımını, $\dot{E}x_{bgg}$ fırına tekrardan gönderilen baca gazlarının ekserji akımını, $\dot{E}x_{bg}$ baca gazlarının kimyasal ve fiziksel ekserji akımlarının toplamını, $\dot{E}x_{A.tozu}$ alçı tozunun ekserji akımını ve son olarak $\dot{E}x_{yh}$ ise yakma havasının ekserji akımını ifade etmektedir. Yakma havasının ekserji akımı, Eşitlik [2.86] ile hesaplanmış olup, 1.15 kW olarak bulunmuştur.

$$\dot{E}x_{yh} = \dot{m}_{yk} \cdot \left[(h_{yk} - h_{\infty}) - T_{\infty} \cdot (s_{yk} - s_{\infty}) \right] \quad (2.86)$$

Yakma havasına herhangi bir ön ısıtma uygulanmamaktadır. Fakat baca gazlarının geri dönüşümünde kullanılan hattın çok yakın bir konumda bulunan yakma havası fanı, fana giren havanın çevre sıcaklığından 2 °C daha yüksek bir sıcaklıkta girmesine neden olmaktadır. Yakıt olarak kullanılan doğal gazın, hem kimyasal hem de fiziksel ekserji akımlarına sahiptir. Fakat yakıtın fiziksel ekserji akımı, herhangi bir ön ısıtma veya benzer bir işleme tabii olmadığından dolayı sıfırdır. Temelde, yakıtın fırına girişteki basıncı ölçülememiştir.

Kontrol hacminin giriş ve çıkışındaki basınçların 1 atm olduğu varsayılmıştır. Yakıtın fırına girişteki haznında belirlenememesinden dolayı, yakıtın kinetik enerjisi belirlenememiştir. Bu durumda, yakıtın toplam ekserji akımı Eşitlik [2.87] ile verilir.

$$\dot{E}X_{DG} = \dot{E}X_{DG}^{fiz} + \dot{E}X_{DG}^{kim} \quad (2.87)$$

Yakıtın fiziksel ekserji akımı, yakıtın çevre şartlarında ($h_{DG} = h_{\infty}$ ve $s_{DG} = s_{\infty}$) kontrol hacmine girmesinden dolayı, sıfırdır. Yakıtın kimyasal ekserji akımı ise Eşitlik [2.88] ile hesaplanmıştır [129].

$$\dot{E}X_{DG}^{kim} = \left[\dot{m}_{CH_4} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{CH_4}^o}{M_{CH_4}} \right) + \dot{m}_{C_2H_6} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{C_2H_6}^o}{M_{C_2H_6}} \right) + \dot{m}_{C_3H_8} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{C_3H_8}^o}{M_{C_3H_8}} \right) + \dot{m}_{C_4H_{10}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{C_4H_{10}}^o}{M_{C_4H_{10}}} \right) + \dot{m}_{C_5H_{12}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{C_5H_{12}}^o}{M_{C_5H_{12}}} \right) \right] \quad (2.88)$$

Kontrol hacmine giren doğal gazın kimyasal ekserji akımı, 4403.59 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji dengesindeki, $\dot{E}X_{A.taşı}$, alçı taşının ekserji akımını ifade ettiği belirtilmiştir. Alçı taşı, çevre şartlarında kontrol hacmine girdiğinden dolayı ($h_{A.taşı} = h_{\infty}$ ve $s_{A.taşı} = s_{\infty}$), ekserjisi sıfırdır.

Kontrol hacmine giren ve çıkan baca gazları, yanma sonucu oluşan gazların ve alçı taşının dehidrasyonu sonucunda elde edilen buharın karışımıdır. Baca gazının ekserji akımı, Eşitlik [2.89] ile bulunur.

$$\dot{E}X_{bg} = \dot{E}X^{fiz} + \dot{E}X^{kim} \quad (2.89)$$

Baca gazı gibi gaz karışımlarının kimyasal ekserji akımı, Eşitlik [2.90] ve [2.91] ile hesaplanmıştır [104].

$$\bar{e}_{ex}^{kim} = x_i' \cdot \bar{\varepsilon}_i^o + \bar{R}T_{\infty} \cdot x_i' \cdot \ln x_i \quad (2.90)$$

Eşitlik [2.90]'deki, x mol fraksiyonudur. $\bar{e}_{ex}^{kim}$ ise özgül kimyasal ekserjiyi ve $\bar{R}$ evrensel gaz sabitini ifade etmektedir [129].

$$\dot{E}X_{bg}^{kim} = \left[\dot{m}_{N_2} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,N_2}^{kim}}{M_{N_2}} \right) + \dot{m}_{O_2} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,O_2}^{kim}}{M_{O_2}} \right) + \dot{m}_{CO_2} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,CO_2}^{kim}}{M_{CO_2}} \right) + \dot{m}_{H_2O} \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ex,H_2O}^{kim}}{M_{H_2O}} \right) \right] \quad (2.91)$$

Baca gazlarını oluşturan her bir bileşenin kimyasal ekserji akımlarının toplamı, baca gazlarının toplam kimyasal ekserji akımını ifade etmektedir. Kimyasal ekserjiye benzer olarak, baca gazlarını oluşturan her bir bileşenin fiziksel ekserji akımı Eşitlik [2.92] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}X_{bg}^{fiz} = \dot{m} \cdot [(h - h_{\infty}) - T_{\infty} \cdot (s - s_{\infty})] \quad (2.92)$$

Yanma odasına, belirli miktarda geri beslenen baca gazlarının fiziksel ekserji akımı 21.39 kW, kimyasal ekserjisi akımı ise 17.357 kW olarak bulunmuştur. Yanma odasına geri beslenen baca gazlarının toplam ekserji akımı, 39.25 kW olarak hesaplanmıştır. Döner fırına giren her bir parametrenin toplam ekserjisi, 4444 kW olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ekserji dengesinde kullanılan değerler ve giriş parametreleri, Tablo 2.14’de gösterilmiştir.

Tablo 2.14. Giren parametreler, ekserji dengesinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar [130]

Giren Parametreler	Bileşenler	T_{∞} (K)	T (K)	Kütleli debi (kg/s)	Δh (kJ/kg)	Δs (kJ/kg·K)	$\dot{E}X^{fiz}$ (kW) (toplaml)	$\bar{\epsilon}^o$ (kJ/kmol) [98]	$\dot{E}X^{kim}$ (kW) (toplaml)
Doğal gaz	CH ₄	300	300	0.0758	0	0	0	836,510	4,403.59
	C ₂ H ₆	300	300	0.0054	0	0		1,504,360	
	C ₃ H ₈	300	300	0.002	0	0		2,163,190	
	C ₄ H ₁₀	300	300	0.0011	0	0		2,818,930	
	C ₅ H ₁₂	300	300	0.00040	0	0		3,477,050	
	N ₂	300	300	0.0036	0	0		-	
	CO ₂	300	300	0.00104	0	0		-	
Yanma havası	N ₂	300	302	2.805	2.13	0.006	1.15	-	-
	O ₂	300	302	0.851	2.05	0.006			
	CO ₂	300	302	0.0017	2.25	0.006			
	H ₂ O (g)	300	302	0.0442	3.98	0.012			
Alçı taşı	CaSO ₄ ·2H ₂ O	300	300	6.262	0	0	0	-	-
Nem	H ₂ O (l)	300	300	0.0709	0	0	0	-	-
Fırına geri beslenen baca gazı	N ₂	300	353	1.311	56.87	0.169	21.89	720	17.357
	O ₂	300	353	0.242	55.15	0.15		3,970	
	CO ₂	300	353	0.111	61.58	0.142		20,140	
	H ₂ O (g)	300	353	0.584	107	0.304		11,710	

Kontrol hacminden çıkan parametrelerden biri olan baca gazlarının ekserjisi, Eşitlikler [2.89-92] kullanılarak hesaplanmıştır. Baca gazlarının fiziksel ekserji akımı 554.73 kW, kimyasal ekserji akımı ise 54.18 kW olarak hesaplanmıştır. Kontrol hacminden çıkan alçı tozu sadece fiziksel ekserji akımına sahiptir. Alçı tozunun ekserji akımı, Eşitlik [2.93] kullanılarak hesaplanmış olup, 109.77 kW olarak bulunmuştur.

$$\dot{E}X_{A,tozu} = \dot{m}_{A,tozu} \cdot \left[C_p \cdot \left((T_{A,tozu} - T_{\infty}) - T_{\infty} \cdot \ln \left(\frac{T_{A,tozu}}{T_{\infty}} \right) \right) \right] \quad (2.93)$$

Kontrol hacmi olan döner fırından çıkan parametreler, ekserji analizinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar Tablo 2.15’de gösterilmiştir.

Tablo 2.15. Çıkan parametreler, ekserji analizinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar

Çıkan parametreler	Bileşenler	T_{∞} (K)	T (K)	Kütleli debi (kg/s)	Δh (kJ/kg)	Δs (kJ/kg·K)	$\bar{\epsilon}^o$ (kJ/kmol) [98]	$\dot{E}X^{fiz}$ (kW) (toplaml)	$\dot{E}X^{kim}$ (kW) (toplaml)
Baca gazı	N ₂	300	433	4.137	144.59	0.281	720	554.73	54.18
	O ₂	300	433	0.761	141.21	0.25	3,970		
	CO ₂	300	433	0.349	161.24	0.24	20,140		
	H ₂ O (g)	300	433	1.823	274.75	0.507	11,710		
Alçı tozu	CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	300	433	5.323	119.7	99.07	-	109.77	-

Kontrol hacminden, yetersiz yalıtım sonucu meydana gelen enerji kayıplarının ekserji değerleri veya termal ekserji akımı, Eşitlik [2.94] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{yüzey}}\right) \cdot \dot{E}_k \quad (2.94)$$

Döner fırının ekserji verimi, Eşitlik [2.95] ile hesaplanmış olup, ekserji verimi, % 16 olarak hesaplanmıştır.

$$\eta_{II} = \frac{\sum_{çıkan} \dot{E}x}{\sum_{giren} \dot{E}x} \quad (2.95)$$

2.7. Eksergoekonomi

Ekserji ve maliyet akımlarının birleştirilmesi fikri, ilk kez Keenan tarafından 1932 yılında tartışılmıştır [47]. Literatürde, yardımcı maliyet eşitlikleri ve verimlerin formüle edilmesi için farklı yaklaşımlar, literatürde önerilmiştir. Bu yaklaşımları iki grupta incelemek mümkündür. Enerji akımlarının iterativ optimizasyonu, sistem ve bileşenlerinin değerlendirilmesi ve üretim akımlarının maliyetlendirilmesine olanak sağlayan eksergoekonomi muhasebesi ile birlikte, marjinal maliyetlerin hesaplanması ve tüm sistemin optimizasyonu için kullanılan Lagrangian temelli yaklaşımlar mevcuttur [108]. Termoekonomiğin hesaba katıldığı termodinamik analizler, ekserji kavramını temel almaktadır. Eksergoekonomik terimi, ekonomik ve ekserji analizlerinin kombinasyonunu tanımlamak için kullanılabilir [104]. Yani, termoekonomik ve eksergoekonomik kavramları bir birinden farklı kavramlardır. Ekserji maliyeti her hangi bir sisteme uygulanmadığı zaman, termoekonomik analiz teriminin kullanılması gerekmektedir. Termoekonomik, çok genel bir kavram olmak ile birlikte, yapılan analize bağlı olarak, eksergoekonomik analiz şeklinde ifade edilmesi yanlış olacaktır [89]. Termoekonomik analizin, enerji analizi ile birlikte kullanılması, eksergoekonomik analizin ise ekserji analizi ile birlikte kullanılması, her iki kavramın arasındaki en büyük farkı göstermektedir.

Bu terimlerden bazıları ve İngilizce olarak kısaltılmış halleri ise;

- Ekserji Ekonomik Yaklaşım (EEA)
- İlk Eksergoekonomik Yaklaşım (FEA)
- Termoekonomik Fonksiyonel Analiz (TFA)
- Ekserjetik Maliyet Teorisi (ECT)
- Mühendislik Fonksiyonel Analiz (EFA)
- Son Giren İlk Çıkar Yaklaşımı (LIFOA)
- Yapısal Analiz Yaklaşımı (SAA)
- Ekserji Maliyet Metodu (SPECO)

Söz konusu bu yöntemlerin karşılaştırılması, literatürde bulunabilir. Eksergoekonomik analizler ve yöntemler arasında en çok tercih edilen metotlardan biri de, ekserji maliyet metodu SPECO'dur. Eksergoekonomik analiz yöntemi, karmaşık termal sistemlerin performansının geliştirilmesinde, farklı yollar belirlenmesi için önemli bir rol oynamaktadır. Ekonomik ve ekserji analizlerinin birleşimini ifade eden eksergoekonomik analiz, elde edilmek istenen hedef ürün ve yan ürünleri içeren işlem akımlarının maliyetini ya da verimsiz çalışma şartlarını oluşturan parametrelerin maliyet üzerindeki etkisini sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır [31].

Materyal ve metodun bu kısmında, her iki perlit fırınının eksergoekonomik analizleri ile birlikte, döner fırının eksergoekonomik analizleri yapılacaktır. Öncelikle, her iki perlit fırını ve döner fırın için ekonomik veriler, analizlerde kullanılan denklemler ve yardımcı eşitlikler sunulmuştur. Yapılan tezin sonuçlarında ve diğer parametrelerde \$ işareti, ABD dolarını simgelemektedir.

2.7.1. Yeni ve Eski Perlit Fırınlarına İlişkin Ekonomik Veriler

Ekonomik bir analizde kullanılan tüm maliyet verilerinin, aynı referans yıl içerisinde olması gerekir. Analizlerde kullanılan tüm veriler, 2013'deki ekonomik verileri ifade etmektedir. Perlit genleştirme sistemi, 2006 yılında kurulmuştur. O zamandan beri, perlitli sıva alçı ve türevlerinin üretiminde kullanılmak için genleşmiş perlit üretimi gerçekleştirilmektedir. Eski perlit fırını, 2013'ün Haziran ayında, yenisi ile değiştirilmiştir. 2006'da kurulan eski perlit fırınının kurulum maliyeti 28,368.79 \$ (40,000 TL)'dir.

2006'daki Dolar-Türk Lirası kuru, Merkez Bankası verilerine göre 1.41'dir [104, 130]. Yeni perlit fırınının maliyeti, 44,973.54 \$ (85,000 TL)'dir. Yeni perlit fırını, daha öncede belirtildiği gibi 2013 yılında kurulumu gerçekleşmesi ile birlikte, Dolar-Türk Lirası kuru ise Merkez Bankası verilerine göre 1.89'dur [106, 130]. Eski perlit fırını, 410.4 kg/h genleşmiş perlit üretebilmesi için 90 kg/h (125.52 m³/h) doğal gaz tüketimi gerçekleştiriyordu. Yeni perlit fırını ise 1036.8 kg/h genleşmiş perlit üretimi gerçekleştirmek için 86.4 kg/h (125 m³/h) doğal gaz tüketmektedir. Doğal gazın, 2013'deki birim fiyatı, 0.478 \$/m³'dür. Eski perlit fırını günde 16 saat çalıştırılıyor iken, yeni perlit fırını günde 7 saat çalıştırılmaktadır. Perlit genleştirme sisteminin yıllık çalışma saati, 300 saat/yıl'dır. 2013 yılının ortasında, eski perlit fırınının yenisi ile değiştirilmesinden dolayı, her iki fırının 2013'de toplam çalıştırıldığı gün 150'dir. 2013'de, eski perlit fırını ile 984.96 ton, yeni perlit fırını ile 1,088.64 ton genleşmiş perlit üretimi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu üretim için eski perlit fırını 301,254 m³, yeni perlit fırını 131,250 m³ doğal gaz tüketimi gerçekleştirmiştir. Yakıt maliyeti açısından değerlendirildiği zaman, eski perlit fırını 984.96 ton genleşmiş perlit üretmek için harcadığı doğal gazı maliyeti 143,999.412 \$ iken, yeni perlit fırını 1,088.64 ton genleşmiş perlit üretimi gerçekleştirmek için harcadığı doğal gazın maliyeti 62,737.5 \$'dır. Bakım ve onarım maliyetleri bakımından her iki fırını incelediğimiz taktirde, eski perlit fırınının bakım ve onarım maliyeti 79.365 \$ iken, yeni perlit fırınının 0 \$'dır. Yeni perlit fırınının, yeni olmasından dolayı, bakım ve onarım gibi bir maliyeti söz konusu olmamıştır.

Türkiye, elektrik üretiminde doğal gazı yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Doğal gaz tüketiminde, doğal gazın yetersiz olmasından dolayı, doğal gaz bakımından zengin olan ülkelerden doğal gaz ithal etmektedir. Bu ve buna benzer birçok etkenden dolayı, Türkiye'de elektrik, göreceli olarak pahalı bir enerjidir. Bu duruma ilave olarak, elektrik tüketimine uygulanan vergiler ve fiyatlar söz konusudur. Bu vergiler ve ilave ücretlendirmeler, kayıp enerji fiyatları, perakende hizmetleri, iletim ve dağıtım sisteminin kullanım ücretleri, % 18 katma değer vergisi, enerji fonu, elektrik tüketim vergisi ve Türkiye Radyo ve Televizyon (TRT) payıdır. Yukarıda belirtilen durumlardan dolayı, elektrik enerjisi, göreceli olarak pahalı olmaktadır. Alçı fabrikasının elektrik tarifi, günün saatlerine göre de değişkenlik göstermektedir. Sonuç olarak, tüm bu durumlar göz önüne alındığı zaman, elektrik enerjisi tüketiminin birim maliyeti, 0.141 \$/kWh olmaktadır. Genleşmiş perlit üretimi için her iki fırın da, 25 kWh elektrik enerjisi tüketmektedir.

Eski perlit fırınının günlük elektrik tüketimi 400 kWh iken, yeni perlit fırınının elektrik tüketimi 175 kWh olmaktadır. 2013'ün ilk 6 ayında kullanılan eski perlit fırınının tükettiği elektriğin toplam maliyeti, 8,507.93 \$ olarak belirlenmiştir. 2013'ün son 6 ayında kullanılan yeni perlit fırınının tükettiği elektriğin maliyeti ise 3,722.22 \$ olarak hesaplanmıştır. İşletmede, perlit fırınının çalışmasından sorumlu olan üç çalışan bulunmaktadır. Bir çalışanın işverene olan maliyeti, 2013 için 629.65 \$/Ay'dır [107, 130]. Fakat işletmenin yönetim yapısında kilit rol oynayan personelin aylık ücreti, diğer çalışanlardan daha fazladır. Sonuç olarak, hem eski hem de yeni perlit fırınlarının çalışmasından sorumlu olan personelin maliyeti, 2,059.3 \$/ay olarak belirlenmiştir. Ham perlit, işletmenin ham perlit üretimi gerçekleştiren şirketlerden satın alınması yolu ile elde edilmektedir. Ham perlitin nakliye ile birlikte oluşan toplam maliyeti 58.20 \$/ton'dur. Her iki perlit fırınının çalışma ömrü ile alakalı kesin bir değer söz konusu değildir. Eski perlit fırını 2006'da kurulan işletme ile birlikte devreye alınmış ve 2013'ün ilk altı ayında da aktif olarak kullanıldıktan sonra, hurdaya çıkmıştır. Bu yüzden fırının ömrü 6.5 yıl olarak belirlenmiştir. Yeni perlit fırınının çalışma ömrü ise 20 yıl olarak tahmin edilmiştir. Bu sistemlerin ömürleri birçok parametreye, çalışma şartlarına ve düzenli bir şekilde bakımlarının yapılmasına bağlıdır.

2.7.2. Döner Fırına İlişkin Ekonomik Veriler

Daha öncede belirtildiği gibi, tüm verilerin 2013 yılı içerisinde alınan verileri ifade etmektedir. Perlit genleştirme sistemi için paylaşılan ekonomik veriler bölümünde ifade edildiği gibi alçı tesisi 2006 yılında kurulmuş ve aktif üretimine başlamıştır. 2006 yılından beri üretim gerçekleştiren tesis, farklı tiplerde alçı üretimi gerçekleştirmektedir. Bunlar; derz dolgu alçısı, yapıştırma alçısı, inşaat alçısı, kartonpiyer alçısı, makine sıva alçısı, perlitli sıva alçısı ve saten perdah alçısıdır. Alçı tesisinin, 2006'daki kurulum maliyeti, 7.5 milyon TL'dir. Söz konusu yatırımın dolar cinsinde karşılığı 5.31 milyon \$'dır. Döner fırın, 19,162.8 kg/h alçı tozu üretmek için 456 m³/h doğal gaz tüketimi gerçekleştirmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi doğal gazın birim fiyatı, 0.478 \$/m³'dür. Alçı üretim tesisi, yıllık 3,283,200 m³/yıl doğal gaz tüketimi gerçekleştirmektedir. Yıllık yakıt maliyeti, 1,569,369.6 \$ olarak belirlenmiştir. Döner fırının yıllık bakım onarım maliyeti, 1851 \$/yıl olarak belirlenmiştir.

Döner fırın, bir yıl içerisinde sadece 2 aylık bir periyotta durdurulmaktadır. Yılın geri kalan on ayında, 24 saat boyunca, alçı üretimi için kullanılmaktadır. Döner fırının çalıştırılmasında tüketilen elektrik 250 kWh olarak hesaplanmıştır. Tesiste farklı pozisyonlarda, 68 çalışan görevlendirilmiştir. Bir çalışanın maliyeti 629.65 \$/Ay olarak belirlenmiştir. Perlit için verilen ekonomik veriler başlığında olduğu gibi şirketin görev dağılımında, önemli görevler üstlenen çalışanların maliyeti daha fazladır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığı zaman, çalışanların toplam maliyeti 44,860.4 \$/ay olarak hesaplanmıştır. Farklı bölgelerden çıkarılan alçı taşı, büyük miktarlarda olduğu zaman, alçı taşının nakliyesi tren ile gerçekleştirilmektedir. Nispeten küçük miktarlarda olan alçı taşı ise kamyonlar ile tesise taşınmaktadır. Söz konusu tesis, alçı taşının çıkarıldığı bölgelerden uzak bir konumda bulunmaktadır. Bu nedenden dolayı, alçı taşının nakliye masrafları yüksektir. Bir ton alçı taşının nakliye maliyeti 11.64 \$'dır. Maliyetlerin saatlik olarak seviyelendirilmesinden dolayı, alçı taşının nakliye masrafları 265.392 \$/h olarak hesaplanmıştır. Döner fırınının çalışma ömrü hakkında kesin bir bilgi mevcut değildir. Bu yüzden, döner fırının çalışma ömrü 30 yıl olarak göz önüne alınmıştır. Perlit fırınının da olduğu gibi döner fırının çalışma ömrü, düzenli periyodik bakımının yapılmasına, çalışma şartlarına, kapasitesinin üzerinde veya tasarımının izin verdiği sınırların dışında kullanımı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir.

Fırınının çalışma ömrü, fırın üreticisi ve alçı üretim tesisinde istihdam edilen teknik personel ile yapılan görüşmeler neticesinde belirlenmiştir. İşletme ve bakım maliyetleri, döner fırınının bakım ve tamir maliyetleri, elektrik tüketim maliyeti, personel maliyeti, alçı taşının üretim maliyeti gibi birçok parametreyi içermektedir.

2.7.3. Eksergoekonomik Analiz

Her iki perlit fırınına ve döner fırına, aynı veya farklı denklemler uygulanmaktadır.

Genel bir ekonomik analizde, maliyet dengesi, sabit sınır şartlarda çalışan tüm sistemler için Eşitlik [2.96] ile formüle edilmektedir [98].

$$\sum_{giren} \dot{C} + \dot{C}_k + \dot{Z} = \sum_{çıkan} \dot{C} + \dot{C}_{i\dot{s}} \quad (2.96)$$

Eşitlik [2.96]'daki, $\dot{C}$ parametresi, ekserji maliyet oranını ifade etmektedir. $\dot{Z}$ ise sermaye maliyet akışını ifade etmektedir. Sermaye maliyet akışı Eşitlik [2.97] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{YM} + \dot{Z}^{B-İM} \quad (2.97)$$

Eşitlik [2.97]'deki $\dot{Z}^{YM}$ ve $\dot{Z}^{B-IM}$ parametreleri ise sırası ile saatlik olarak seviyelendirilmiş yatırım ve bakım-işletme maliyetini göstermektedir. Saatlik olarak seviyelendirilmiş yatırım maliyeti, saatlik olarak seviyelendirilmiş maliyet metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu metot da, altı adımdan oluşan bir algoritma ile yatırım maliyetini saatlik olarak ifade edilmektedir [31, 33, 108, 109, 110]. Analizleri yapılacak olan sistemin şimdiki değeri, Eşitlik [2.98] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{S}D = TYM - Hu \cdot \dot{S}DF_{(i_{ef}, \ddot{o})} \quad (2.98)$$

Eşitlik [2.98]'deki, TYM parametresi, toplam yatırım maliyetini (\$), Hu ise hurda değerini ifade etmektedir. Sistemin hurda değeri, Eşitlik [2.99] ile hesaplanmıştır.

$$Hu = TYM \cdot J \quad (2.99)$$

Eşitlik [2.99]'daki, J değeri, hurda değer oranını ifade etmektedir. Analizlerdeki bu değer, % 10 olarak alınmıştır. Şimdiki değer faktörü ($\dot{S}DF$), Eşitlik [2.100] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{S}DF = \frac{1}{(1 + i_{ef})^{\ddot{o}}} \quad (2.100)$$

Eşitlik [2.100]'deki $\dot{S}DF$, sistemin kurulumunda harcanan tek seferlik maliyetin şimdiki değer faktörü olarak ifade edilmektedir [98]. $\ddot{o}$ ise sistemin ömrünü ifade etmektedir. Eşitlikteki i_{ef} , parametresi ise efektif iskonto oranını göstermektedir. İskonto oranı Eşitlik [2.101] ile hesaplanmıştır.

$$i_{ef} = \left(1 + \frac{pd}{bi}\right)^{bi} - 1 \quad (2.101)$$

Eşitlik [2.101]'deki bi değeri, yıllık bileşik faiz sayısını, pd ise paranın değerini göstermektedir. Yıllık yatırım maliyeti (YYM), Eşitlik [2.102] ile hesaplanmıştır.

$$YYM = \dot{S}D \cdot YGF_{(i_{ef}, \ddot{o})} \quad (2.102)$$

Yatırım geri dönüş faktörü (YGF) Eşitlik [2.103], ekipman maliyeti ise Eşitlik [2.104] ile hesaplanmıştır.

$$YGF = \frac{i_{ef} (1 + i_{ef})^{\ddot{o}}}{(1 + i_{ef})^{\ddot{o}} - 1} \quad (2.103)$$

$$\dot{Z}^T = \frac{\zeta YYM}{3600(s/h)\delta(h/yıl)} \quad (2.104)$$

Eşitlik [2.104]'deki, δ parametresi, bir yıl içerisinde, sistemin çalıştığı toplam saati ifade etmektedir. ζ ise işletme ve bakım maliyeti faktörünü ifade etmektedir. Bu değer, birçok çalışmada 1.06 alınarak tahmini bir değer alınmıştır. Fakat bu çalışmada, işletme ve bakım maliyeti ayrı ayrı hesaplandığı için 1 olarak alınmıştır. Sistemin saatlik olarak seviyelendirilmiş yatırım maliyeti Eşitlik [2.105] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z}^{YM} = \frac{YYM}{\delta} \quad (2.105)$$

İşletme ve bakım maliyetleri, değişken maliyetler ve sabit maliyetler olarak iki bölümde incelenebilir. Sabit maliyetler için işletme ve bakım işçilik maliyetleri, bakım malzeme giderleri, yönetim, destek, dağıtım ve pazarlama, araştırma ve geliştirme gibi kalemler göz önüne alınabilir. Değişken işletme maliyetleri ise sistemin ortalama olarak yıllık yatırım faktörüne bağlıdır. Yakıt maliyetleri, kimyasallar ve atık malzemelerin bertaraf edilmesi değişken parametrelere örnek olarak gösterilebilir [98].

Bakım ve işletme maliyeti, Eşitlik [2.106] ile hesaplanmıştır.

$$B - \dot{I}M = HNM + BT + ETM + \dot{C}M \quad (2.106)$$

Eşitlik [2.106]'deki HNM, hammaddenin nakliye masraflarını, BT, bakım ve tamir masraflarını, ETM, elektrik tüketim maliyetini, $\dot{C}M$ ise sistemin çalışmasından sorumlu çalışanların maliyetini (\$) ifade etmektedir. Yakıt ve hammadde maliyeti, bakım ve işletme maliyetinin bir bileşeni olarak hesaba katılabilir.

Fakat yakıt maliyetleri, bakım ve işletme maliyetlerinden ayrı olarak hesaba katılmıştır. Bunun nedeni ise buna benzer maliyetlerin eksergoekonomik analizde giriş parametresi olarak hesaba katılması gerekliliğidir. Perlit genleştirme fırınlarının ve döner fırına giren hammaddenin ekserji değerleri sıfır olarak hesaplanmıştı. Bu nedenden dolayı, hammadde maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri kapsamında incelenmesi gerekmektedir. Hammaddenin ekserjisi sıfır olduğundan, eksergoekonomik analizde, sıfır maliyet ile söz konusu kontrol hacimlerine girmiş olacaktır. Hammaddenin maliyeti, yukarıda açıklanan durum çerçevesinde, bakım ve işletme maliyetlerine eklenmiştir. Saatlik olarak seviyelendirilmiş bakım ve işletme maliyeti Eşitlik [2.107] ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z}^{B-IM} = \frac{B - \dot{I}M}{\delta} \quad (2.107)$$

Eşitlik [2.96] ile ifade edilen eksergoekonomik denge denklemini, perlit ve döner fırınları için düzenlenmelidir. Söz konusu eşitlik, yeni ve eski perlit patlatma veya genleştirme fırınları için Eşitlik [2.108] ile ifade edilmiştir [130].

$$\dot{C}_{yh} + \dot{C}_{DG} + \dot{C}_{per} + \dot{Z} = \dot{C}_{bg} + \dot{C}_{G.per} + \dot{C}_k \quad (2.108)$$

Perlit için Şekil 2.21 ve 2.23 göz önüne alındığı zaman, yetersiz yalıtım sonucu meydana gelen ısı kayıpları, eski ve yeni perlit fırınından çıkan parametreler, maliyet dengesinin sağ tarafında gösterilmiştir. Baca gazları ve kayıp ısı ile birlikte meydana gelen ekserji transferi, kayıplar olarak göz önüne alınmıştır. Eşitlik [2.96], döner fırın için Eşitlik [2.109] ile ifade edilmiştir.

$$\dot{C}_{DG} + \dot{C}_{yh} + \dot{C}_{A.taşı} + \dot{C}_{bgg} + \dot{Z} = \dot{C}_{bg} + \dot{C}_{A.tozu} + \dot{C}_k \quad (2.109)$$

Döner fırın için Şekil 2.24 göz önüne alındığı zaman, ısı kayıpları ve döner fırından çıkan parametreler, maliyet dengesinin sağ tarafında ifade edilmiştir. Perlit fırınının maliyet dengesinde olduğu gibi ısı kayıpları ve döner fırından çıkan parametreler kayıp olarak göz önüne alınmıştır.

Ekserji maliyet kavramına göre, maliyet akımı ($\dot{C}_i$), Eşitlik [2.110] ile gösterilen ekserji akımı ile birleştirilmiştir [103].

$$\dot{C}_i = c_i \cdot \dot{E}x_i \quad (2.110)$$

Eşitlik [2.110]'daki, c_i , birim ekserji maliyetini ifade etmektedir. Ekserji maliyet oranını gösteren Eşitlikler [2.111], [2.112], [2.113] ve [2.114], kontrol hacmine gire ve çıkan ekserji akımlarını, güç ve ekserji transferini ifade etmektedir.

$$\dot{C}_{giren} = c_{giren} \cdot \dot{E}x_{giren} \quad (2.111)$$

$$\dot{C}_{çıkan} = c_{çıkan} \cdot \dot{E}x_{çıkan} \quad (2.112)$$

$$\dot{C}_{iş} = c_{iş} \cdot \dot{W} \quad (2.113)$$

$$\dot{C}_k = c_k \cdot \dot{E}x_k \quad (2.114)$$

Döner fırın ve perlit fırınlarından elde edilen bir iş söz konusu değildir. Eşitlik [2.113] göz önüne alınmadan, yeni ve eski perlit fırınlarının maliyet dengesi, Eşitlik [2.115] ile gösterilmiştir [130].

$$c_{yh} \dot{E}x_{yh} + c_{DG} \dot{E}x_{DG} + c_{per} \dot{E}x_{per} + \dot{Z} = c_{bg} \dot{E}x_{bg} + c_{G.per} \dot{E}x_{G.per} + c_k \dot{E}x_k \quad (2.115)$$

Aynı durum döner fırın için de göz önüne alındığı zaman, Eşitlik [2.116] elde edilmiştir.

$$c_{DG} \dot{E}x_{DG} + c_{yh} \dot{E}x_{yh} + c_{A.taşı} \dot{E}x_{A.taşı} + c_{bgg} \dot{E}x_{bgg} + \dot{Z} = c_{bg} \dot{E}x_{bg} + c_{A.tozu} \dot{E}x_{A.tozu} + c_k \dot{E}x_k \quad (2.116)$$

Eksergoekonomik analizde kullanılan yardımcı eşitlikler ise aşağıdaki satırlarda gösterilmiştir. Perlit fırınları için yardımcı eşitlikler;

$$\frac{\dot{C}_{DG}}{\dot{E}x_{DG}} = \frac{\dot{C}_{bg}}{\dot{E}_{bg}} \quad (c_{DG} = c_{bg}) \quad (2.117)$$

Eşitlik [2.117]'deki C_{DG} ve c_{bg} , doğal gazın ve baca gazlarının birim ekserji maliyetini ifade etmektedir.

$$\frac{\dot{C}_{DG}}{\dot{E}x_{DG}} = \frac{\dot{C}_k}{\dot{E}_k} \quad (c_{DG} = c_k) \quad (2.118)$$

Eşitlik [2.118]'deki C_k , kayıp ekserjinin birim ekserji maliyetini göstermektedir. Söz konusu parametre, Eşitlik [2.119] kullanılarak belirlenmiştir [98].

$$c_{DG} \cdot \dot{E}x_k = c_{DG} \dot{E}x \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{yüzey}} \right) \quad (2.119)$$

Yanma havası, referans çevreden alınmakta olup, birim ekserji maliyeti sıfırdır.

$$c_{yh} = 0 \quad (2.120)$$

Yakma havası, perlit fırınına beslemek için kullanılan fanın harcadığı enerji ve tükettiği elektriğin maliyeti, bakım ve işletme masrafları kapsamında değerlendirilmiştir. Bu durum, perlit fırınında olduğu gibi döner fırının eksergoekonomik analizi için de geçerlidir. Döner fırının eksergoekonomik analizinde kullanılan yardımcı eşitliklere, aşağıdaki satırlarda yer verilmiştir.

$$\frac{\dot{C}_{DG}}{\dot{E}x_{DG}} = \frac{\dot{C}_{bg}}{\dot{E}x_{bg}} = \frac{\dot{C}_{bgg}}{\dot{E}x_{bgg}} \quad (c_{DG} = c_{bg} = c_{bgg}) \quad (2.121)$$

Eşitlik [2.121]'deki C_{DG} , c_{bg} ve c_{bgg} , doğal gazın, baca gazlarının ve baca gazı geri dönüşümünün birim ekserji maliyetleri ifade etmektedir.

$$\frac{\dot{C}_{DG}}{\dot{E}x_{DG}} = \frac{\dot{C}_k}{\dot{E}x_k} \quad (c_{DG} = c_k) \quad (2.122)$$

Burada, C_k , kayıp ekserjinin birim ekserji maliyeti olup, değeri döner fırın için Eşitlik [2.123] kullanılarak belirlenmiştir [98].

$$c_{DG} \cdot \dot{E}x_k = c_{DG} \dot{E}x \left(1 - \frac{T_\infty}{T_{yüzey}} \right) \quad (2.123)$$

Perlit fırınında olduğu gibi döner fırında da, yanma havası referans çevre ortamından alınmaktadır. Yanma havasının ekserji sıfır olmasından dolayı, birim ekserji maliyeti sıfırdır. Yanma havası için kullanılan fanın tükettiği elektrik maliyeti ise bakım ve işletme maliyetleri kapsamında değerlendirilmiştir.

$$c_{yh} = 0 \quad (2.124)$$

Yakıt maliyetleri de, bakım ve işletme maliyetleri kapsamında incelenebilir. Fakat ısı sistemlerindeki yakıt maliyetinin öneminden dolayı, yakıt maliyeti bakım ve işletme maliyetleri kapsamında ayrı olarak değerlendirilmiştir. Literatürde, kullanılan yakıtın birim ekserji maliyetinin hesaplanmasında, farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlardan biri de Eşitlik [2.125] ile gösterilmiştir.

$$c_{DG} = \frac{SF_{DG}}{TLD \cdot AID \cdot 10^{-6} (GJ / kJ)} \quad (2.125)$$

Eşitlik [2.125]'deki, SF, doğal gazın satış fiyatını (TL), TLD, Türk Lirası – ABD Dolar kurunu, AID ise doğal gazın alt ısı değerini (kJ/kg) ifade etmektedir. Burada c_{DG} , yakıtın birim ekserji maliyetini ifade etmektedir. Yakıtın alt ısı değeri, kullanılan yakıtın enerji değeri ile ilgili bir parametre olup, ekserji kavramı kapsamında göz önüne alınan bir parametre değildir. Ayrıca, birçok sistemde, kullanılan yakıtta ön ısıtma uygulanması söz konusudur. Buna benzer durumlarda ise yakıtın kimyasal ekserjinin yanı sıra, fiziksel ekserjisinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Eşitlik [2.125]'de, yakıtın fiziksel ekserjisinin de ifade edildiği bir parametre yoktur. Herhangi bir durum için kullanılan eşitliklerin kullanılabilirliği, o eşitliğin, doğruluğuna, tüm durumları içine alabilecek ve ön görebilecek bir eşitlik olmasına bağlıdır.

Bu tez kapsamında, Eşitlik [2.125] yerine, yakıtın birim ekserji maliyetini hesaplamak için farklı ve yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem, hem perlit fırınları hem de döner fırında tüketilen yakıtın birim ekserji maliyetini hesaplamak için kullanılmıştır. Yakıtın birim ekserji maliyeti Eşitlik [2.126] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$c_{DG} = \frac{Y\dot{S}M}{\dot{m}_{DG} \cdot YBKE \cdot 10^{-6} (GJ / kJ)} \quad (2.126)$$

Eşitlik [2.126]'daki, $Y\dot{S}M$, yakıtın saatlik maliyetini (\$/h) ve $\dot{m}$ ise yakıtın kütleli debisini ifade etmektedir (kg/h). YBKE ise yakıtın birim kütlelerinin ekserjisini ifade etmektedir. $Y\dot{S}M$, Eşitlik [2.127] ile hesaplanmıştır.

$$Y\dot{S}M = \frac{YYM}{\delta} \quad (2.127)$$

Eşitlik [2.127]'deki, YYM, yakıtın yıllık maliyetini göstermektedir. 2013 yılında, her iki perlit fırınında tüketilen yakıtın yıllık maliyeti 143,999.412 \$ iken, döner fırında tüketilen yakıtın yıllık maliyeti 1,569,369.6 \$'dır. $Y\dot{S}M$ 'nin saatlik olarak seviyelendirilmiş yakıt maliyeti olduğu tekrardan hatırlatılmalıdır.

Bunun nedeni ise yakıtın ekserjetik terimlerindeki yakıt maliyeti ile aynı birime sahip olmasıdır. Birimleri aynı olan bu iki parametrenin aynı parametreyi ifade etmediği unutulmamalıdır. YBKE, Eşitlik [2.128] ile hesaplanmıştır [130].

$$YBKE = \left(\sum X_i \cdot Ex_i^{kim} \right) + \left(\sum X_i \cdot Ex_i^{fiz} \right) = \sum X_i \frac{\bar{e}_i^o}{M_i} + \sum X_i Ex_i^{fiz} \quad (2.128)$$

Eşitlik [2.128]'deki, X , yakıtı oluşturan bileşenlerin kütle fraksiyonunu göstermektedir. Ex ise yakıtı oluşturan bileşenlerin birim ekserjisini ifade etmektedir (kJ/kg). $\bar{e}_i^o$ standart kimyasal ekserjiyi (kJ/kg) ve M_i ise molar kütleli ifade etmektedir (kg/kmol). Perlit fırınlarına ve döner fırına giren yakıtın, sadece kimyasal ekserjiye sahip olduğunu, ekserji analizlerinde vurgulanmıştır. Perlit fırınları için perlitin birim ekserji maliyeti Eşitlik [2.129] ile döner fırın için alçının birim ekserji maliyeti ise Eşitlik [2.130] ile hesaplanmıştır [130].

$$c_{G.per} = \frac{c_{DG} \left[(\dot{Ex}_{DG}) - (\dot{Ex}_k + \dot{Ex}_{bg}) \right] + c_{yh} \dot{Ex}_{yh} + c_{per} \dot{Ex}_{per} + \dot{Z}}{\dot{Ex}_{G.per}} \quad (2.129)$$

$\dot{Ex}_{per}$, ham perlitin referans çevre şartlarında fırına girmesinden dolayı, ham perlitin ekserjisi sıfırdır.

$$c_{A.tozu} = \frac{c_{DG} \left[(\dot{Ex}_{DG} + \dot{Ex}_{bgg}) - (\dot{Ex}_k + \dot{Ex}_{bg}) \right] + c_{yh} \dot{Ex}_{yh} + c_{A.taşı} \dot{Ex}_{A.taşı} + \dot{Z}}{\dot{Ex}_{A.tozu}} \quad (2.130)$$

Ham perlitte olduğu gibi alçı taşı da döner fırına çevre şartlarında girmektedir. Bundan dolayı, alçı taşının ekserjisi sıfırdır. Eşitlikler [2.129] ve [2.130] tekrardan düzenlendiği zaman, perlit fırınları için Eşitlik [2.131], döner fırın için Eşitlik [2.132] elde edilmiştir [130].

$$c_{G.per} = \frac{c_{DG} \left[(\dot{Ex}_{DG}) - (\dot{Ex}_k + \dot{Ex}_{bg}) \right] + \dot{Z}}{\dot{Ex}_{G.per}} \quad (2.131)$$

$$c_{A.tozu} = \frac{c_{DG} \left[(\dot{Ex}_{DG} + \dot{Ex}_{bgg}) - (\dot{Ex}_k + \dot{Ex}_{bg}) \right] + \dot{Z}}{\dot{Ex}_{A.tozu}} \quad (2.132)$$

Hem perlit fırınlarına hem de döner fırına giren ve çıkan parametreler göz önüne alınarak birim ekserji maliyetleri hesaplanmıştır. Ekserji yıkımının birim ekserji maliyeti ise bir başka yardımcı eşitlik ile ifade edilmektedir. Her iki perlit fırını ve döner fırın için ekserji yıkımının maliyeti Eşitlik [2.133] ile hesaplanmıştır [31].

$$\dot{C}_{yıkım} = c_{DG} \dot{Ex}_{yıkım} \quad (2.133)$$

Perlit genleştirme fırınlarının, eksergoekonomik analiz bakımından performansı Eşitlik [2.134] ile hesaplanmıştır [104, 130].

$$f_{\text{perlit fırın}} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_{DG} (\dot{E}x_{\text{yıkım}} + \dot{E}x_k)} \quad (2.134)$$

Eksergoekonomik faktör olarak da adlandırılan ve Eşitlik [2.134] ile perlit fırınları için ifade edilen bu parametre, döner fırın için Eşitlik [2.135] ile ifade edilmiştir [98].

$$f_{\text{döner fırın}} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_{DG} (\dot{E}x_{\text{yıkım}} + \dot{E}x_k)} \quad (2.135)$$

Üretilen perlitin maliyeti Eşitlik [2.136] ile alçının maliyeti ise Eşitlik [2.137] ile hesaplanmıştır.

$$MC_{G, \text{per}} = \frac{\dot{C}_{G, \text{per}}}{\dot{m}_{G, \text{per}}} \quad (2.136)$$

$$MC_{A, \text{tozu}} = \frac{\dot{C}_{A, \text{tozu}}}{\dot{m}_{A, \text{tozu}}} \quad (2.137)$$

2.8. Döner Fırının Sayısal Modellenmesi

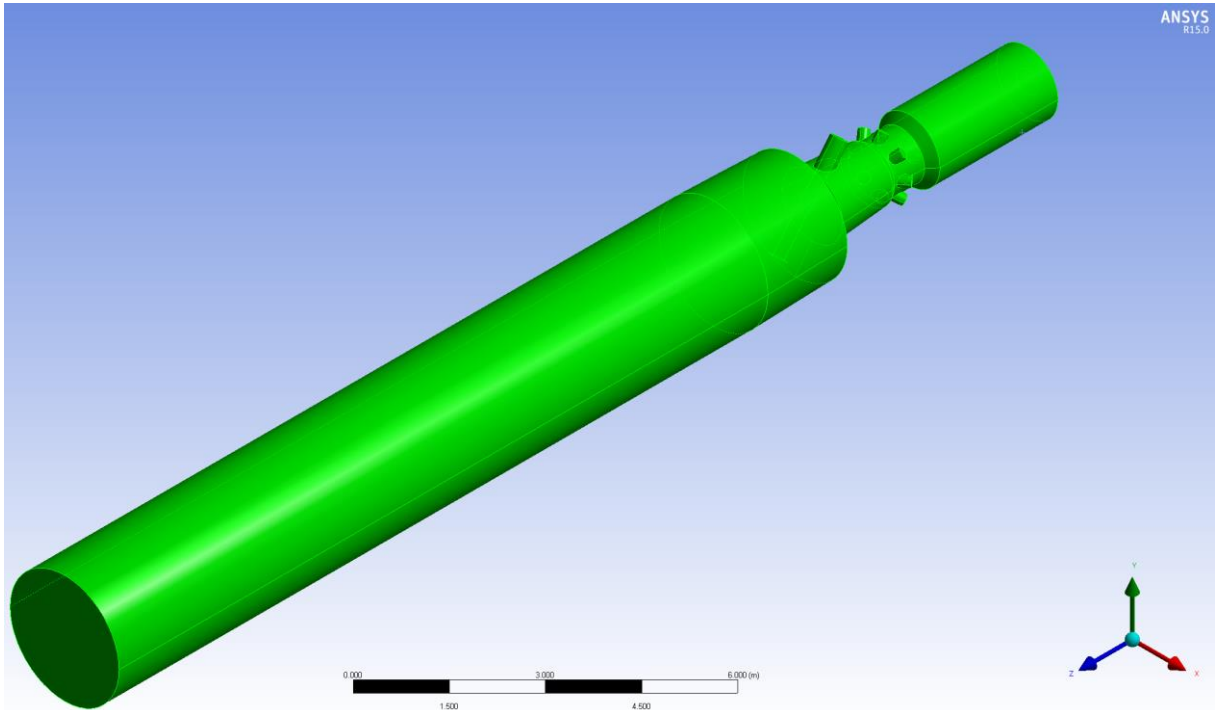
Endüstriyel fırınların HAD analizleri, literatürdeki güncel konulardan biridir. Bu çalışmaların hedefi, söz konusu fırında gerçekleşen işlemin iyileştirilmesidir. Bu hedef kapsamında fırınlarda, sıcaklık, CO ve CO₂' nin fırın içerisindeki dağılımı, hız alanları, fırında kullanılan brülörün kalibrasyonu ve iyileştirilmesi, önce ve sonra kavramı kapsamında elde edilen sonuçların irdelenmesi, deneysel ve HAD analizlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması, fırın içerisinde meydana gelen alevin karakteristik özellikleri ve aldığı şeklin incelenmesi ve son olarak fırın içerisinde akış alanına brülörün etkisi şeklinde verilir. Araştırmacılar tarafından oluşturulan modeller, mineralojik ve kimyasal reaksiyonların meydana geldiği birçok döner fırın uygulamalarında, ürün kalitesi, miktarı, yakıt tipi, alternatif brülörler gibi birçok durumda, farklı endüstriyel alanlar için yararlı araçlar olarak kullanılmaktadır. Tezin kapsamında oluşturulan HAD modelinin temel amacı, baca gazı geri dönüşümünün etkileri ve alçı taşının fırına beslendiği hattın, brülör tarafından oluşturulan alev yapısına olan etkileri ve yanma odası içerisinde yanmaya etki eden çeşitli parametrelerin incelenmesidir.

Oluşturulan HAD modeli, bire bir fırının ölçümleri ile aynı olacak şekilde oluşturulmuştur. Öncelikli hedef olarak, döner fırının bire bir modellenmesi hedeflenmiş, fırın içerisindeki kanatçıklı yapıya sahip olan bölümün döndürülmesi ve son olarak fırına beslenen alçı taşının fırın içerisindeki dağılımı ve parçacık dinamiği ile ilgili verilerin irdelenmesiydi. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı ile alçı taşının fırın içerisindeki dağılımının belirlenmesi hedefler arasındaki parametreleri oluşturmaktadır.

Materyal metot bölümünde, döner fırının sayısal olarak modellenmesi iki başlık altında sunulmuştur. Basitleştirilmiş fırın geometrisinin ağ yapısı ve sayısal modellemede kullanılan yöntem, söz konusu bu iki başlığı ifade etmektedir.

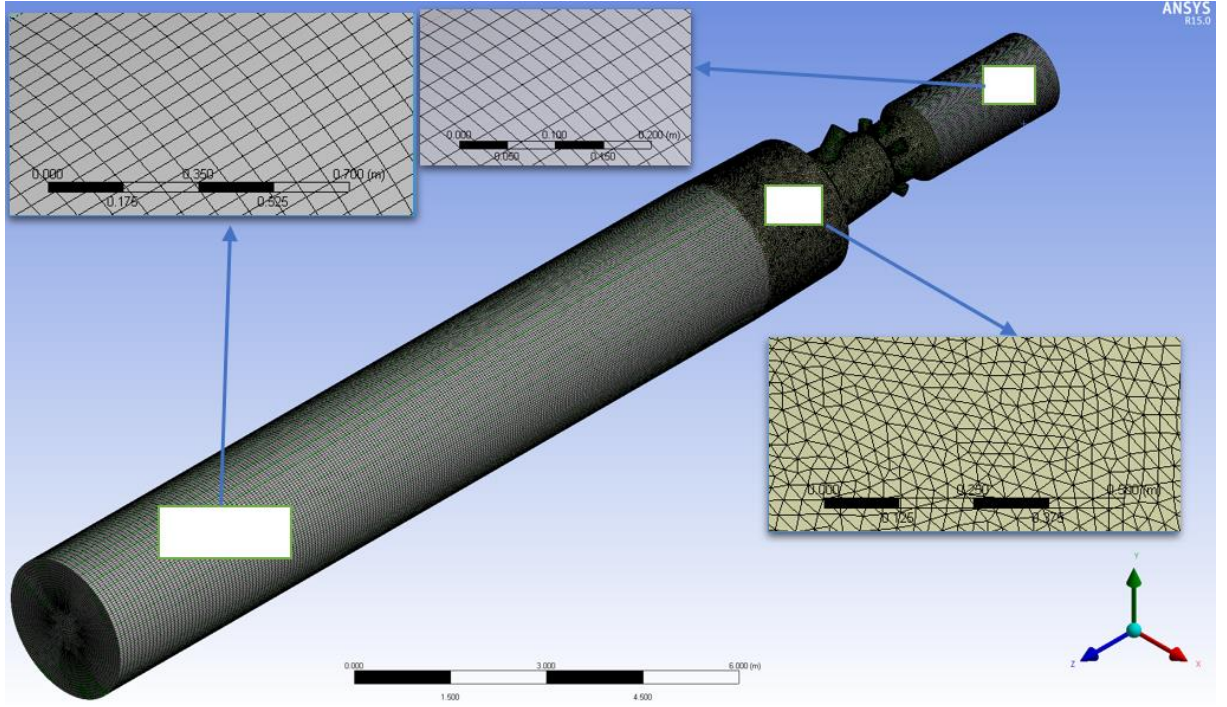
2.8.1. Basitleştirilmiş Döner Fırın Geometrisinin Ağ Yapısı

Fırın geometrisinde basitleştirme ve son olarak elde edilen ağ yapısı ile döner fırının HAD modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Döner fırının HAD modellemesinde, ANSYS 15 çatısı altındaki Fluent paket programı kullanılmıştır. Döner fırının bilgisayar ortamında çizilen bire bir modeline ağ yapısı oluşturulmuştur. Çizimi yapılan döner fırın Şekil 2.23’de gösterilmiştir.



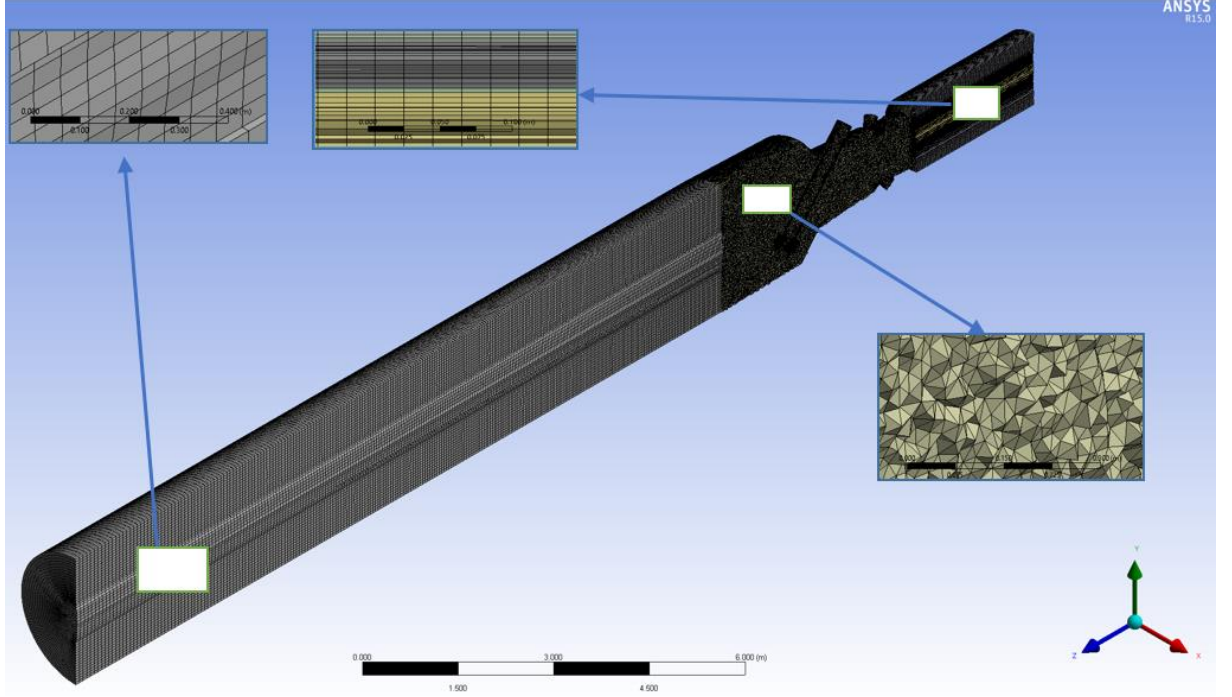
Şekil 2.23. Döner fırının, üç boyutlu katı modeli

Karmaşık bir geometriye sahip olan döner fırın için iki farklı ağ yapısı kullanılarak, döner fırının ağ yapısı oluşturulmuştur. Kare, dikdörtgen ve üçgen şeklinde oluşturulan ağ yapılarının, döner fırının genel ağ yapısı üzerindeki detay görüntüleri, Şekil 2.24’de gösterilmiştir.



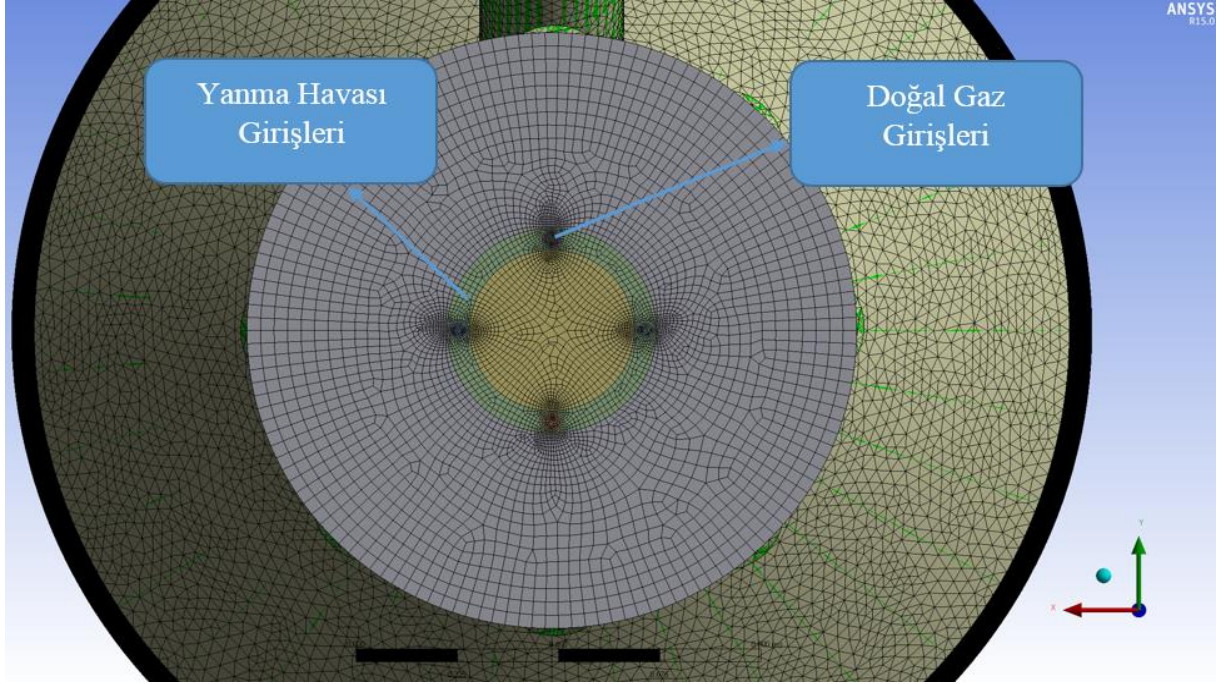
Şekil 2.24. Döner fırının genel ağ yapısı üzerindeki detay görüntüleri

Oluşturulan ağ yapısının, döner fırının kesit görünüşü içindeki durumu ise Şekil 2.25’de gösterilmiştir.



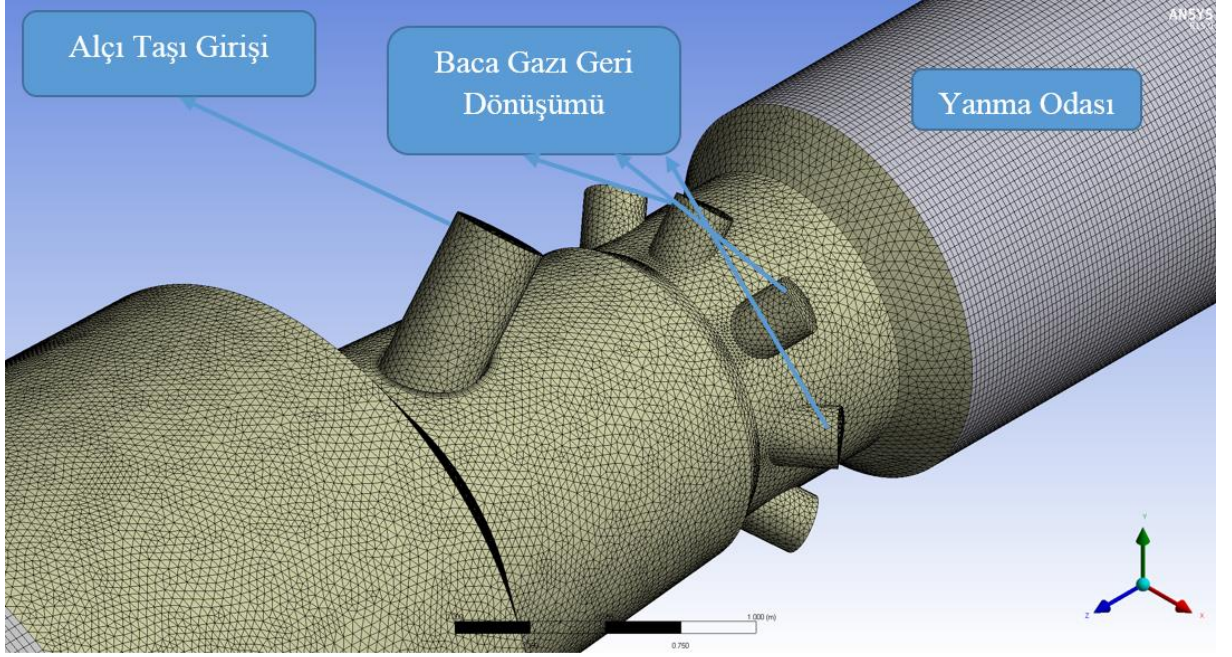
Şekil 2.25. Döner fırının kesit görünüşü içindeki ağ yapısının durumu

Döner fırının sayısal modellenmesi için oluşturulan geometri ve ağ yapısının, yanma odasında brülör yerleştirildiği bölüm, yanma havası girişleri ve doğal gaz girişleri Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Şekilde ok ile gösterilen yeşil alanın tümü yanma havasının girişini temsil etmektedir. Aynı şekilde ok ile gösterilen ve ağ yapısının yoğunlaştığı doğal gaz girişleri görülmektedir.



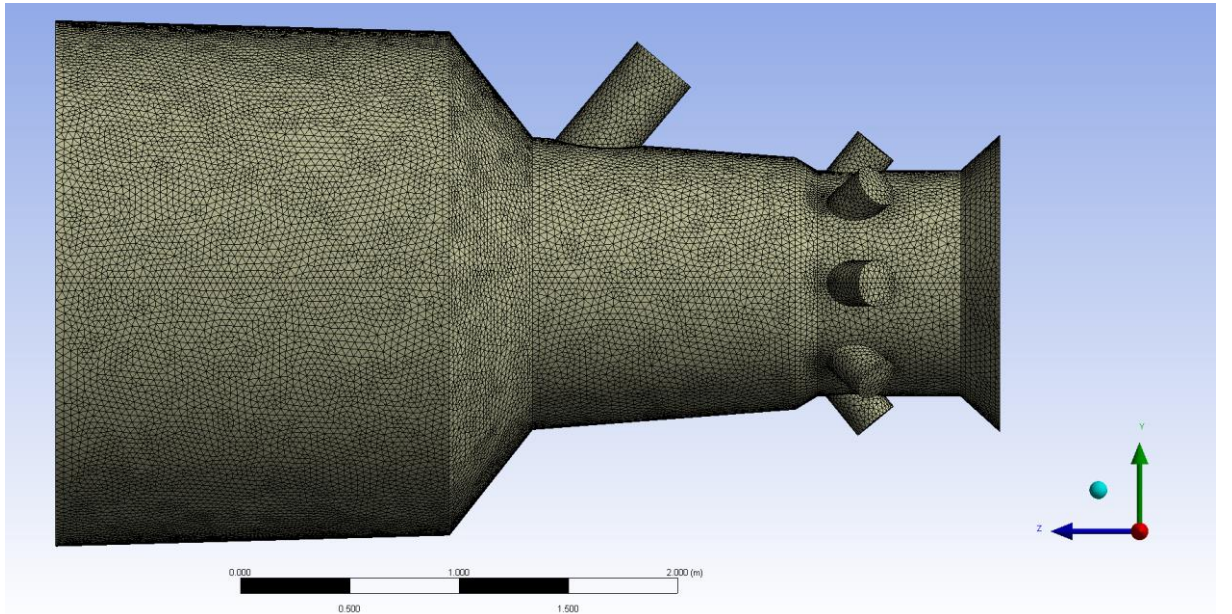
Şekil 2.26. Yanma havası ve doğal gaz girişleri

Döner fırının yanma odasının, alçı taşının giriş bölümü ve baca gazlarının giriş bölümü Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Oluşturulan model üç bölümde incelendiği zaman yanma odası, baca gazlarının giriş yaptığı bölüm ve döner fırının alçı taşı ile yanma sonu ürünlerinin iyi bir şekilde karışımının sağlanması için döndürülen bölümü olarak incelenebilir.



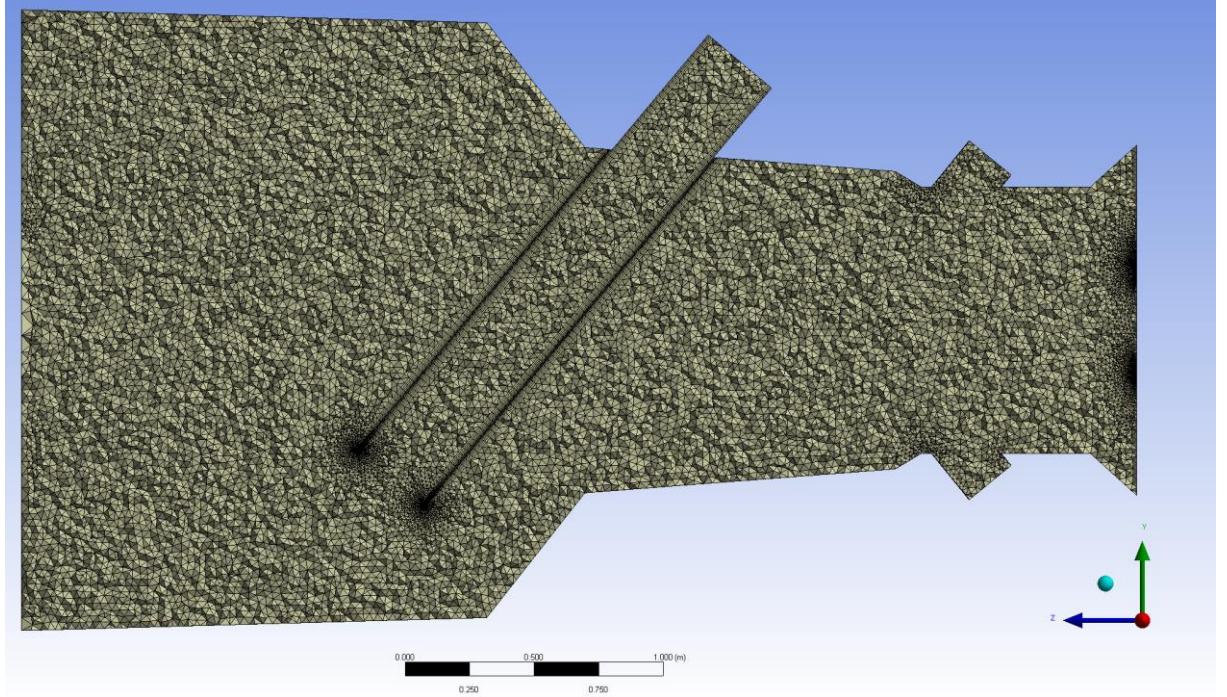
Şekil 2.27. Yanma odası, alçı taşı ve baca gazı geri dönüşüm girişi

Oluşturulan döner fırının ağ yapısında, üçgen ve kare ağ yapıları kullanılmıştır. Söz konusu bu durumun, oluşturulan geometrinin karmaşık bölümlerine üçgen ağ yapısının kullanılması ile daha iyi bir ağ yapısı elde edilmiş olmasıdır. Modellenen döner fırının, baca gazlarının geri dönüşümünün sağlandığı bölüme üçgen ağ yapısı uygulanmıştır. Söz konusu hacmin ağ yapısı Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28. Baca gazının fırına giriş yaptığı bölümün ağ yapısı

Şekil 2.28’de gösterilen ve baca gazlarının giriş yaptığı bölümün kesit görünüşü ve söz konusu hacmin iç ağ yapısı, Şekil 2.29’da gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Baca gazlarının döner fırına giriş yaptığı bölümün kesit görünüşü ve ağ yapısı

Döner fırının modellenmesinde, baca gazı girişlerinin durdurulduğu ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durum için tekrardan ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısına ilişkin şekiller EK Şekil 1.10 – 12’de gösterilmiştir. Skewness değerinin değerlendirme ölçütü Tablo 2.16’da verilmiştir.

Tablo 2.16. Skewness değerinin değerlendirilmesi [111]

Skewness Değeri	Hücre Kalitesi
1	Bozulmuş
0.9 – <1	Kötü
0.75 – 0.9	Zayıf
0.5 – 0.75	Uygun
0.25 – 0.5	İyi
>0 – 0.25	Mükemmel
0	Eşkenar

Üçgen ağ yapısının kalite göstergesi olan Skewness değerine benzer olarak, kare ve dikdörtgen şeklinde oluşturulan ağ yapılarının kalite göstergesi olarak, oluşturulan ağ yapısının ortogonal değeri önem kazanmaktadır.

Skewness değerinin tam tersine, ortogonal ağ kalitesi değerinin 1'e yakın olması arzu edilmektedir. Döner fırın modeline uygulanan sweep ve otomatik ağ oluşturma yöntemleri ile toplam 2570790 düğüm ve 6225553 element elde edilmiştir. Döner fırının ikinci durumu için oluşturulan ağ yapısında, 2765629 düğüm ve 6174302 element elde edilmiştir. Oluşturulan ağ yapısının doğruluğu ve uygunluğu ile ilgili istatistikler aşağıdaki Tablo 2.17'de verilmiştir.

Tablo 2.17. Oluşturulan ağ yapısına ilişkin istatistiksel veriler

Mevcut durum				İkinci durum			
Ortogonal ağ kalitesi		Skewness değeri		Ortogonal ağ kalitesi		Skewness değeri	
En az	0.230	En az	7.49E-05	En az	2.14E-03	En az	1.47E-04
En çok	0.999	En çok	0.898	En çok	0.999	En çok	0.995
Ortalama	0.894	Ortalama	0.186	Ortalama	0.897	Ortalama	0.184

Daha önce de belirtildiği gibi döner fırının sayısal modellenmesinde Fluent paket programı kullanılmıştır. Modellemede kullanılan metotlar ve ayrıntılı bilgiler ise aşağıdaki başlık altında tartışılmıştır.

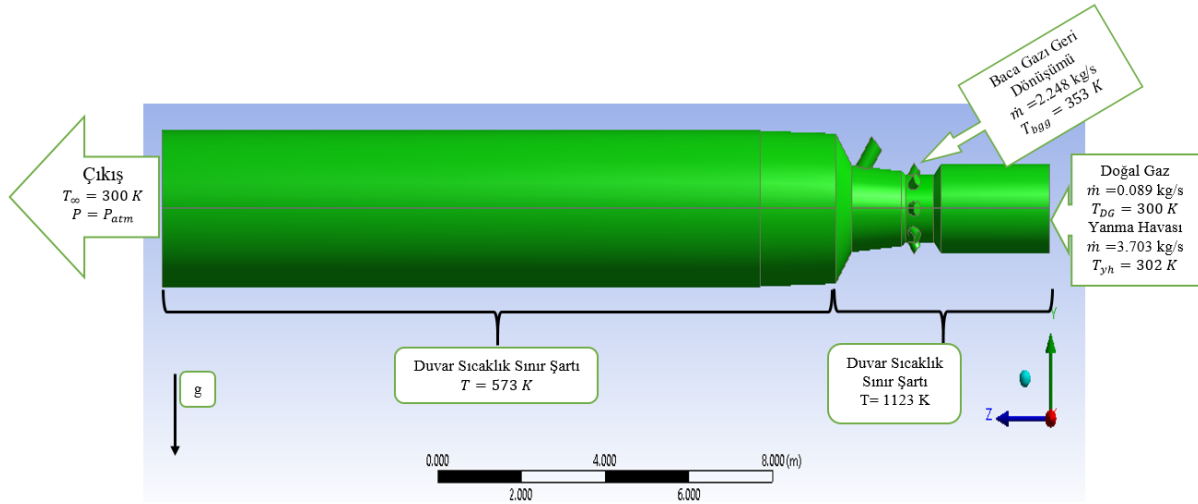
2.8.2. Sayısal Analizde Kullanılan Metotlar

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, sayısal analiz metotlarını kullanarak, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerini belirli bir yaklaşımla çözen bir temeldir. Son yıllarda özellikle karmaşık ve üç boyutlu problemlerin çözümünde Fluent, CFX, Star CD ve benzeri birçok paket programlar tercih edilmektedir. Tez kapsamındaki döner fırının sayısal modellenmesinde Fluent paket programı kullanılmıştır.

Sınır şartları belirlenen modelin çıkış şartları, modelin yakınsama kriterlerini oluşturmaktadır. Deneysel yöntemler ile belirlenen parametrelere, oluşturulan modellerin yakınsama kriterlerini yansıtabacaktır. Bazı çalışmalarda ise oluşturulan modelin yakınsama kriteri olarak, aşamalı analizler yapılmıştır. Örneğin yanma işleminin meydana geldiği bir döner fırın için sadece hava akışının fırın içerisindeki davranışları göz önüne alınmıştır. Sonraki aşamalarda ise fırın içerisindeki fiziksel olaylar göz önüne alınarak her defasında, tekrardan modelleme yöntemi izlenmiştir. Böylece, oluşturulan modelin hangi fiziksel etkilerin meydana geldiği göz önüne alındığında, karşılaşılabilecek problemleri belirleyerek oluşturulan modelin doğruluğu sınanmıştır. Çok karmaşık problemlerin modellenmesinde ise oluşturulan ağ yapısının, sınır şartlarının, yapılan kabullere ve fırın içerisinde meydana gelen fiziksel olayların değerlendirme şekline bağlıdır.

Bu çalışmada yapıldığı gibi alçı taşının fırına beslenmesi durumunun göz önüne alınmamasından dolayı, fırının çıkışından alınan sonuçlar ile ölçülen sonuçlar arasındaki fark büyük olacaktır. Fırın çıkışından alınan ölçüm, sayısal modelleme ile fırın çıkışından elde edilen sonuçları karıştılamayacaktır. Bu neden ile fırın çıkışından elde edilen bulgular, yapılan kabuller ışığında, döner fırının doğruluk kriterini yansıtamaz. Söz konusu bu çalışmanın doğruluk kriteri ise fırına giren parametreler ve sınır şartlarının doğru bir şekilde probleme uygulanması ile belirlenmiştir. Döner fırının modellenmesinde kullanılan modeller ve yöntemle ilişkin ayrıntılı bilgi ise aşağıdaki satırlarda tartışılmıştır.

Döner fırının sayısal modellenmesi kapsamında göz önüne alınan modeller; enerji denklemlerinin gereksinimi, türbülansın fırın içerisindeki yanma olayında RNG k-ε model tercih edilmiştir. Yanma sonucunda oluşan yanma ürünlerinden fırın cidarlarına ve gazlar arasındaki ısı transferi, ışıınım yoluyla gerçekleşmektedir. Işıının çözümü için DO ışıınım modeli tercih edilmiştir. Yanma modeli için fırının tasarım parametreleri göz önüne alınarak, ön karışimsız yanmanın meydana geldiği görülmektedir. Kullanılan paket programın sunduğu yanma modelleri arasından ön karışimsız yanma modeli göz önüne alınmıştır. Söz konusu kullanılan modeller ile ilgili ayrıntılı teorik bilgi, ANSYS tarafından oluşturulan bilgi havuzundan elde edilebilir. Döner fırının modellenmesinde kullanılan tüm modeller, yapılan literatür araştırması sonucunda belirlenmiştir [112, 113, 114].



Şekil 2.30. Döner fırının modellemesinde sınır şartlarının geometri üzerinde gösterilmesi

Sabit sınır şartlardaki süreklilik denklemi, Eşitlik [2.138]'de verilmiştir [112,113].

$$\nabla(\rho u_i) = 0 \quad (2.138)$$

Eşitlik [2.138]'deki, ∇ simgesi gradyen operatörünü ifade etmektedir. Koordinat düzlemi içindeki hız parametreleri, basınç, yerçekimi ve kaldırma kuvvetini içeren momentum denklemi Eşitlik [2.139]'da verilmiştir [112,113,114].

$$\nabla(\rho \vec{u}_i \vec{u}_j) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.139)$$

Eşitlik [2.139]'daki p terimi, sabit basıncı ifade etmektedir. $\bar{\bar{\tau}}$, gerilme tensörünü, ρ , yoğunluğu, $\vec{g}$, yer çekimini, $\vec{F}$ ise diğer kuvvetleri ifade etmektedir. Gerilme tensörünün ifade edildiği denklem, Eşitlik [2.140] ile gösterilmiştir [114].

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \quad (2.140)$$

Eşitlik [2.140]'daki μ , moleküler viskoziteyi ve I ise birim tensörünü ifade etmektedir. Enerjinin korunumu, Eşitlik [2.141]'de verilmiştir [112,114,115].

$$\nabla(\rho u_i h) = \nabla(\Gamma_h \nabla h) + S_h \quad (2.141)$$

Eşitlik [2.141]'deki S_h ışınlama ısı transferini ve yanma oranları içermektedir [115, 114,113]. İdeal gazlar için ifade edilen entalpi, Eşitlik [2.142] ve [2.143] ile ifade edilmiştir.

$$h = \sum_i m_i h_i \quad (2.142)$$

$$h = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT \quad (2.143)$$

Türbülans modeli olarak RNG k-ε model tercih edilmiştir. RNG k-ε modeli anlık Navier – Stokes eşitliklerinden türetilmiştir [112,113]. RNG k-ε modelin türetilmesinde, yeniden normalleştirme grup metodu (renormalizasyon grup teorisi) olarak adlandırılan bir istatistiksel teknik kullanılmaktadır [114]. Söz konusu model, Standart k-ε modeli formunda benzerliklere sahip olsa da, RNG k-ε model ilave terimler içerdiği ve düşük Reynolds sayısının etkilerini de göz önüne almasından dolayı daha doğru sonuçların elde edileceği iddia edilmektedir [125]. RNG k-ε model için transport eşitlikleri, Eşitlikler [2.144] ve [2.145]'de verilmiştir.

$$\nabla(\rho k e u_i) = \nabla(\alpha_k \mu_{eff} \nabla k e) + G_u + G_b - \rho \varepsilon \quad (2.144)$$

$$\nabla(\rho \varepsilon u_i) = \nabla(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_1 \frac{\varepsilon}{k e} (G_u + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k e} - R_\varepsilon \quad (2.145)$$

Eşitlik [2.144] ve [2.145]'deki G_u hız gradyenti anlamından dolayı türbülans kinetik enerjinin üretimini ifade etmektedir. G_u , Eşitlik [2.143] ile hesaplanmaktadır [125].

$$G_u = -\overline{\rho u_i' u_j'} \nabla u_j \quad (2.146)$$

G_b ise kaldırma kuvvetinden dolayı, türbülans kinetik enerji üretimini ifade etmektedir ve Eşitlik [2.147] ile hesaplanmaktadır [125].

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla T \quad (2.147)$$

Türbülans viskozitesi μ_t , k ve ε 'nin kombinasyonu ile hesaplanmaktadır. Türbülans viskozitesi Eşitlik [2.148] ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k\varepsilon^2}{\varepsilon} \quad (2.148)$$

C_1 , C_2 , C_μ α_k ve α_ε değerleri, sabit değerler olup, sırası ile 1.42, 1.68, 0.0845, 1 ve 1.3 olarak alınmıştır. α_k ve α_ε değerleri sırası ile $k - \varepsilon$ için Prandtl sayılarının yoğunluk etkileridir [112 – 114].

Döner fırınlar içerisindeki ısı transferinin yoğunlukla ışınlama ile gerçekleştiğine daha önceden değinilmişti. Yapılan literatür araştırmasında, ışınlama ile ısı transferinin modellenmesi için farklı yaklaşımlar tercih edilmiştir. P-1 ışınlama modeli ve DO ışınlama modeli yoğun olarak kullanılan ışınlama modellerindendir. İki model arasında hangisini daha çok kullanıldığı tartışılacak olursa, P-1 ışınlama modelinin daha fazla tercih edildiği görülmektedir [125].

Bunun nedeni ise P-1 ışınlama modelinin, diğer modellere nazaran daha basit ve kullanılan bilgisayara daha az işlem yükü getirmesinden dolayıdır. Bu çalışmada DO ışınlama modeli tercih edilmiştir. DO ışınlama modeli, daha doğru sonuçların elde edilmesinde P-1 ışınlama modelinden daha iyi bir performans sergilemektedir. Fakat DO ışınlama modelinin tercih edilmesi, kullanılacak bilgisayarın işlem yükünü arttıracaktır. DO ışınlama modeli, alan denklemleri olarak $\vec{s}$ yönündeki ışınlama ile gerçekleşen ısı transfer eşitliğini içermektedir. DO ışınlama modeli Eşitlik [2.149]'da verilmiştir [114].

$$\nabla \cdot \left(I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \right) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.149)$$

Döner fırında yakıt olarak doğal gazın yanması sonucu, yüksek miktarlarda enerjinin açığa çıktığını, fırının enerji ve ekserji analizlerinden belirlenmiştir. Meydana gelen yanma olayının sınıflandırılması, oluşturulacak olan modellemenin doğruluk kriterlerine önemli etkileri olacaktır. Yanmanın sınıflandırılmasına etkiyen birçok parametre mevcuttur.

Bunlar; zamana bağlı değişkenlerin mevcudiyeti, koordinat parametreleri, karışım koşulları, öncelikli reaktifler, akış koşulları, öncelikli reaktiflerin fazları, reaksiyon oranı, taşınım tipleri, akışın sıkıştırılabilirlik derecesi ve oluşan alevin karakteristik özellikleridir [100]. Yanma problemlerinin sınıflandırılması Tablo 2.18’de gösterilmiştir.

Tablo 2.18. Yanma problemlerinin sınıflandırılması [100]

Yanma durumu	Sınıflandırma durumları
Zamana bağlı	Sabit veya değişken
Koordinat parametreleri	Bir ve iki boyutlu düzlemsel, iki boyutlu asimetrik ya da üç boyutlu
Reaktiflerin karışım durumu	Ön-karışimli, kısmi ön karışimli veya ön karışimsız
Akış durumu	Laminar ya da türbülanslı
Reaktiflerin fazları	Tek faz, çift faz ya da çok fazlı
Reaksiyon durumu	Homojen ya da heterojen
Reaksiyon oranı	Kimyasal dengede ya da sonlu oran
Taşınım tipi	Doğal veya zorlanmış taşınım
Akışın sıkıştırılabilirlik derecesi	Sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz
Yanma sonucu oluşan dalgaların hızı	Parlama (ses altı yanma dalgası) veya patlama (süpersonik yanma dalgası)

Tablo 2.20’de paylaşılan yanmanın modellenmesi durumu, döner fırının sayısal modellenmesi için değerlendirildiği zaman, sabit sınır şartlarda, üç boyutlu, ön karışimsız, türbülanslı akış durumu, tek fazlı, heterojen reaksiyon, kimyasal denge oranı, zorlanmış taşınım tipi, sıkıştırılamaz akış derecesi ve parlama sonucu oluşan ses altı yanma dalgaları meydana gelmektedir. Döner fırının modellenmesinde kullanılan yanma modeli, karışım fraksiyonu teorisidir.

Türbülans ve kimyasal reaksiyonların etkileşimi, muhtemel yoğunluk fonksiyonu olan bir varsayım şekli için hesaba katılmaktadır. Karışım fraksiyonu ile ilgili denklem Eşitlik [2.150]’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (2.150)$$

Karışım fraksiyonu için ANSYS Fluent paket programı kapsamında karışım fraksiyonu değişimi için bir korunum denklemi çözülmektedir. Nükleer bir reaksiyon söz konusu olmadığından dolayı, karışım fraksiyonu değişimi için kullanılan denklem, Eşitlik [2.151]’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}^2) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_g \mu_t \cdot (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 \quad (2.151)$$

Döner fırının sayısal analizine ilişkin yöntem, materyal ve metotlar tartışılmıştır.

Tez kapsamında yapılan döner fırının HAD modellenmesine ilişkin daha fazla teorik bilgi, referans [114]'de bulunabilir. Döner fırının modellenmesinde üç senaryo üzerinde durulmuştur. Bunlar, döner fırının güncel çalışma şartları, hem baca gazlarının kapatıldığı hem de alçı taşının fırına giriş yaptığı bölümün kaldırılması durumları için modellemeler yapılmıştır. Fırın tasarımına ilişkin bulgular tartışılacaktır. Fakat döner fırının modellenmesinde, fırın tasarımına ilişkin modellemelerin yapılması söz konusu değildir. Yapılan tezin kapsamı, alçı fabrikasının enerji verimliliği açısından daha iyi bir işlem gerçekleştirebilecek öneriler, bulgular ve yöntemler elde etmektir. Fırın tasarımına ilişkin çalışmalar ise bir başka çalışmanın konusunu ifade etmektedir. Yapılan bu tezde, döner fırının modellenmesindeki tartışılan parametreler, analizleri yapılan alçı fabrikasının imkânları doğrultusunda, yapabileceği veya müdahale edebileceği parametreler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Döner fırının modellenmesinde kullanılan sınır şartları ise kütle, enerji ve ekserji analizlerinden elde edilen ve fırından yapılan ölçümler ile elde edilen değerler kullanılmıştır. Döner fırının sayısal modellemesi, fırının güncel çalışma durumu için elde edilen veriler ışığında gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi için fazla miktarda yanma havası fırın içerisine beslenmektedir. Böylece tam yanma meydana gelmektedir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar da bu doğrultuda elde edilmiştir. Şekil 3.26 ve 3.27'ye bakıldığı zaman, tam yanmanın meydana geldiği görülmekte ve fırına giren hidrokarbonların tamamının oksitlendiği görülmektedir.

Söz konusu bu duruma ilave olarak, baca gazlarının yanma odasına geri beslendiği bölümdeki hacimsel daralma, gazların hızını arttırırken basıncının düşmesine neden olmaktadır. Şekil 3.23'ye bakıldığı taktirde, beklendiği gibi yanma sonucunda oluşan gazların söz konusu bölümde basıncının düştüğünü ve hızının arttığı görülmektedir. Döner fırının güncel çalışma şartları göz önüne alınarak oluşturulan modelden elde edilen veriler, modelin fırının güncel çalışma şartlarına yakınsadığını göstermektedir. Baca gazı geri dönüşümünün kesilmesi durumunda, döner fırının iç sıcaklığının artması söz konusu olacaktır. İşletme yönetiminden alınan izin ile baca gazı geri dönüşümü kapatılarak fırın çalıştırılmıştır. Döner fırın otomasyonundan alınan veriler göstermiştir ki, döner fırının çalışma sıcaklığı artmıştır. Belirli bir sıcaklığa ayarlanan ve çalışma sıcaklıklarının çok üzerine çıkmaya başlayan iç sıcaklık değeri, döner fırın iç sıcaklığının çok yüksek değerlere çıkmakta olduğunu göstermiştir. Tekrardan baca gazlarının fırına beslenmesine başlanarak, fırın içerisindeki gazların sıcaklığı düşürmüştür. Söz konusu bu durum, döner fırının HAD analizlerinden elde edilen bulgular ile uyushmaktadır.

Literatürdeki döner fırınların modellenmesi üzerine yapılan ve paket programların kullanıldığı araştırmalarda, farklı yöntemler benimsenerek problemin çözümlendiğine kanaat getirilmiştir. Programların çözüm kontrolü sekmelerinde, belirli bir iterasyon sayısı belirlenerek, problemin çözümünde söz konusu iterasyon sayısına varıldığında problemin çözümlendiği belirlenmiştir. Literatürde çözümlenen bir modeli kıstas kabul ederek çözüm yöntemi belirlenen çalışmalarda mevcuttur. Sabit sınır şartlar altında döner fırının sayısal modellemesinde, belirli bir iterasyon sayısı belirlenmemiştir. Problemdeki farklı parametrelerin, iterasyon sayısına bağlı olarak değişmediği kanaatine varılana kadar, farklı iterasyon sayılarında problemdeki parametreler kontrol edilmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmada ise problemin çözüm kriterleri düzenlenerek, problemin sabit çalışma şartlarına gelmesi ile program tarafından sonlandırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan analizlerden elde edilen parametreler, bir sonraki bölüm olan bulgular ana başlığı altında incelenmiştir. Materyal ve metot kısmındaki gibi perlit genleştirme fırınlarının enerji ve ekserji analizleri, döner fırının enerji ve ekserji analizi, perlit genleştirme fırınlarının eksergoekonomik analizleri, döner fırının eksergoekonomik analizi ve son olarak döner fırının HAD modellemesindeki akışa göre, elde edilen bulgular paylaşılmıştır.

3. BULGULAR

Tezin bu bölümünde, ekserji, eksergoekonomi analizler ve döner fırının sayısal analizinden elde edilen bulgular tartışılmıştır. Materyal ve metot kısmındaki, analiz sıralamasına göre, eski ve yeni perlit fırınlarının enerji ve ekserji analizlerden elde edilen bulgular sunulmuştur. Bu analizlerden sonra, döner fırınının enerji ve ekserji analizinden elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Proseslerin enerji ve ekserji analizlerinden sonra, eksergoekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Perlit fırınlarının eksergoekonomik analizlerinden elde edilen bulgular paylaşıldıktan sonra, döner fırınının eksergoekonomik analizinden elde edilen bulgular sunulmuştur. Son olarak da, döner fırının sayısal modellemesinden elde edilen bulgular, tezin bu bölümünde paylaşılmıştır.

3.1. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular

Eski perlit fırınının bileşenleri olan silindirik gövde, baca, üst ve alt koni şeklindeki bölümler yalıtılmamıştır. Meydana gelen enerji ve ekserji kayıpları, toplam giren enerjinin % 33.87'sini, toplam giren ekserjinin ise % 27.11'ni oluşturmaktadır. Bu değerler, eski perlit fırının, kötü bir tasarıma sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, ham perlit doğrudan, brülör tarafından oluşturulan alevin üzerine düşmektedir. Bu durum, oluşan alev ile ham perlit arasındaki ısı transferini kötü bir şekilde etkilemektedir. Kontrollü bir ısıtma işlemini de zorlaştırmaktadır. Ayrıca, yanma verimi ve yanma kinetiği de bu durumdan etkilenebilmektedir. Fırının dış yüzeyi termal genleşmelerden dolayı, paslanmış ve yer yer çatlaklar oluşmuştur. Bununla birlikte, fırının otomasyon ünitesi de yetersizdir. Tüm perlit genleştirme sistemi göz önüne alındığı zaman, sadece iki noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmektedir. İleri otomasyon üniteleri, farklı çalışma şartları için sistemin iyileştirilmesi ve insan temelli hataların önlenmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yeni ve daha iyi bir otomasyon sisteminin kullanılması, sistemin çalışma verimini arttıracaktır.

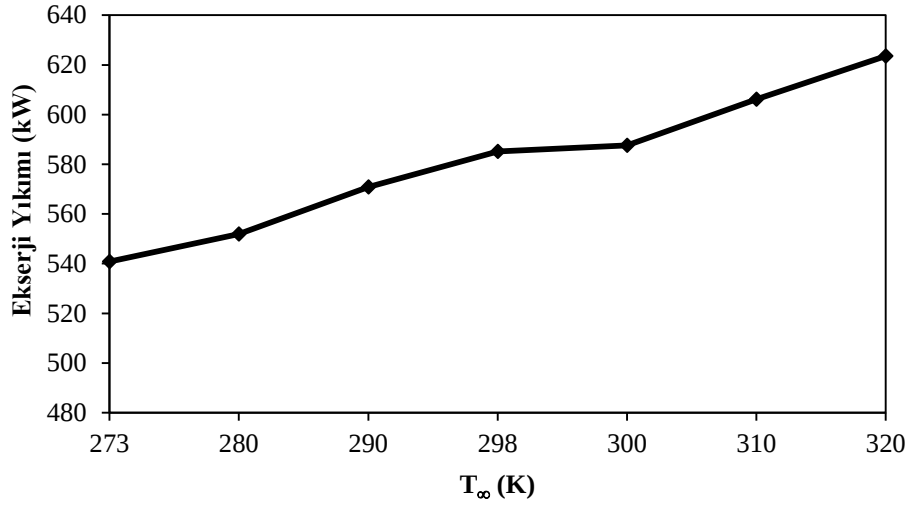
Eski perlit fırınına giren doğal gaz, ham perlit ve yakma havasına ön ısıtma uygulaması yapılmamaktadır. Söz konusu parametreler, referans çevre şartlarında fırına girmektedir. Baca gazları, fırına giren toplam enerjinin % 60.2'sini oluşturmaktadır.

Baca gazları ile birlikte çevreye atılan bu enerjinin, fırına giren parametrelerin ön ısıtma uygulamasında kullanılabilir. Baca gazlarının toplam enerji 928.3 kW olduğu düşünüldüğünde, farklı ısı değiştirgeçleri ile birlikte, tesisin kendi ısıtma sistemini kullanarak ön ısıtma işlemini gerçekleştirebilir.

Perlit genleştirme fırınları gibi doğrudan özel bir endüstriyel prosesin enerji ve ekserji analizi, yapılan literatür araştırmasında bulunamamıştır. Bu nedenden dolayı, elde edilen sonuçları, benzer ve farklı endüstriyel alanlarda kullanılan fırınlar ile karşılaştırılabilir. Perlit fırınına benzer fırınların enerji verimleri, genellikle % 82.9 olarak hesaba katılabilir [23]. Eski perlit genleştirme fırınının enerji verimi % 66 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak farklı endüstriyel fırınların ekserji verimi ise % 40 ila % 50 arasında değiştiği görülmektedir [101,25, 26]. Eski perlit fırınının ekserji verimi ise % 26 olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının enerji ve ekserji verimleri, diğer fırınların verimleri ile karşılaştırıldığı zaman, perlit fırınının verim değerlerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, eski perlit fırınının çok yüksek oranlarda, enerji verimliliği sağlama potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi enerji ve ekserji kayıplarının yüksek olmasındaki en büyük etkenin yalıtım olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

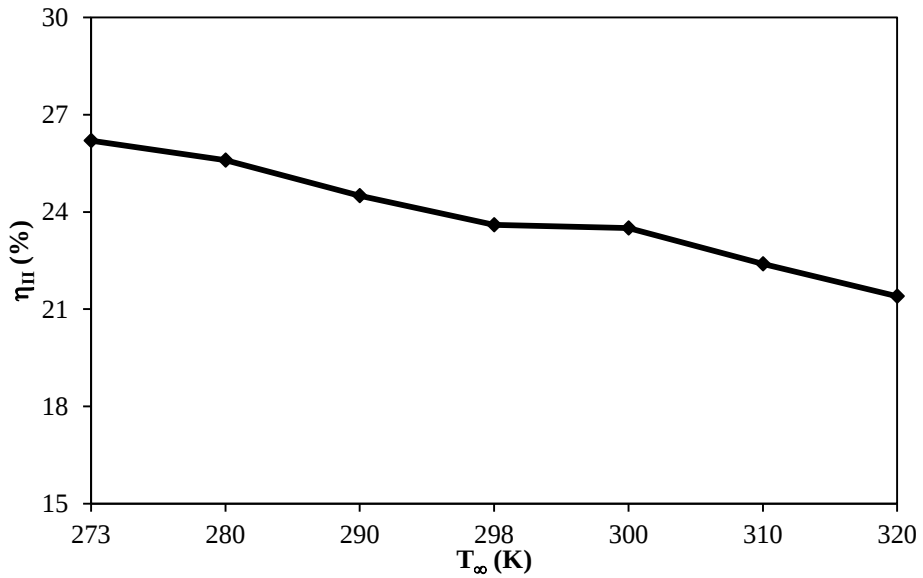
Referans çevre şartları ekserji analizinde, en önemli parametrelerdendir. Hem entalpi hem de ekserji referans çevre şartlarına bağlıdır.

Eski perlit fırının, ekserji analizi sabit çevre ve kış şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çevre koşullarının değişken olmasından dolayı, elde edilen sonuçların, farklı çevre koşullarındaki değerlerinin de belirlenmesi, sistemin ekserji analizini zenginleştirecektir. Şekil 3.1’de eski perlit fırınının farklı çevre koşullarındaki ekserji yıkımını göstermektedir.



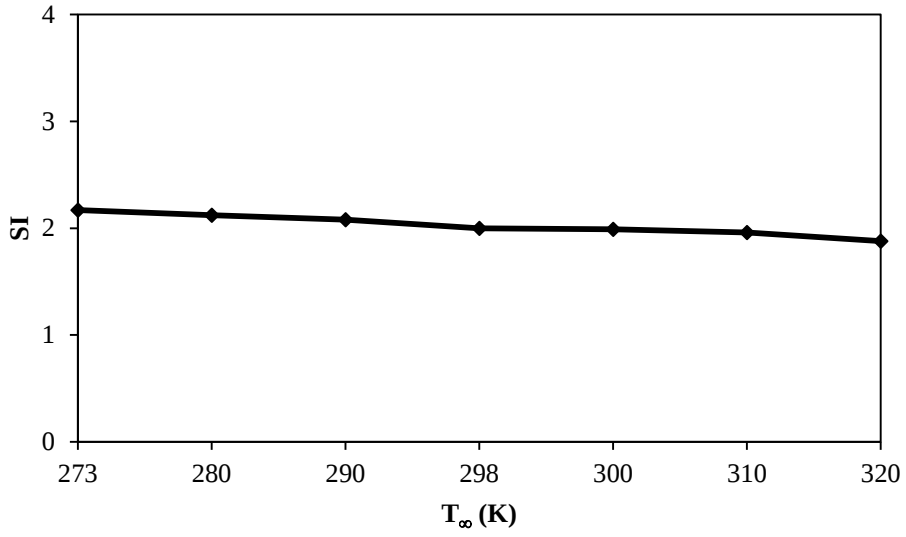
Şekil 3.1. Referans çevre sıcaklığının ekserji yıkımı üzerindeki etkisi [101]

Kontrol hacmine giren toplam ekserjinin % 46.22'si, fırında meydana gelen ekserji yıkımına eşittir. Ekserji yıkımının, referans çevre sıcaklığı ile birlikte artış göstermesi, eski perlit fırının ekserji verimi üzerinde, olumsuz bir etkisi olacağını söyleyebiliriz. Referans çevre sıcaklığının eski perlit fırının ekserji verimi üzerindeki etkisi, Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Referans çevre sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi [101]

Referans çevre sıcaklığının ekserji yıkımı ve verimi üzerindeki etkisine benzer olarak, sürdürülebilirlik indeksi üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir. Referans çevre sıcaklığının sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi, Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

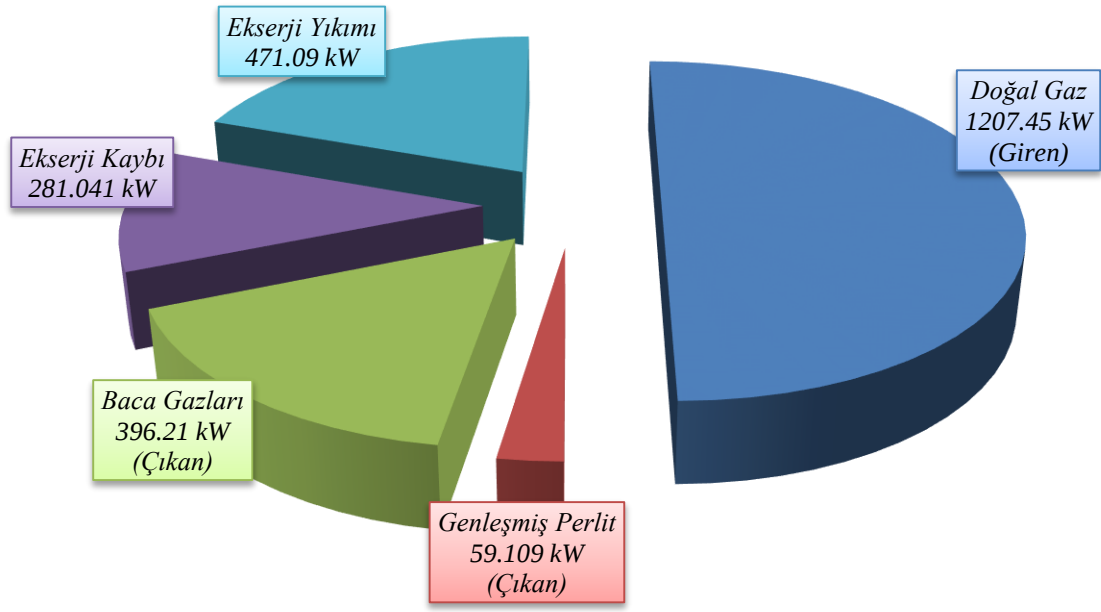


Şekil 3.3. Referans çevre sıcaklığının sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi [101]

Enerji ve ekserji kayıpları yalıtım uygulamaları ile engellenebilirdi. Eski perlit fırınının, yalıtımlı bir fırınla değiştirilmesi durumunda, yapılan yatırımı 11 aydan daha kısa bir süre içerisinde geri ödeyebilecektir. Literatürde, enerji verimliliğinin sağlanması için birçok metot tartışılmıştır. Bunlardan biri de, yakıt hava oranının ayarlanmasıdır. Eski perlit fırınının hava fazlalık katsayısı 1.94 olarak hesaplanmıştır. Fakat hava fazlalık katsayısının arzu edilen değeri 1.05 ile 1.1 arasında değişmektedir [89].

3.2. Yeni Perlit Fırınının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular

Yeni perlit fırını farklı yüzey sıcaklıklarına sahiptir. Termal ekserji, fırının farklı yüzey sıcaklıkları durumu göz önüne alınarak belirlenmiştir. Böylece, yeni perlit fırınından referans çevreye olan ekserji kaybı 281.041 kW olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırınına giren ve çıkan tüm ekserji parametreleri belirlendikten sonar, ekserji yıkımı, ekserji dengesi olan Eşitlik [2.57]'den çekilebilir. Yeni perlit fırının da meydana gelen ekserji yıkımı, 471.09 kW olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar pasta diyagramı olan Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yeni perlit fırınının ekserji dengesinin pasta diyagramında gösterilişi [127]

Yeni perlit fırının, enerji, ekserji ve çevresel parametreler göz önünde bulundurularak analizleri gerçekleştirilmiştir. Fırında meydana gelen yanmanın, eşdeğerlik oranının 1.23 olarak hesaplanmasıyla, yakıt bakımından zengin olduğu ve yetersiz miktarda oksijenin fırına gönderildiği belirlenmiştir. Bu durum, baca gazları içerisinde oksijenin olmadığı ve yanmamış hidrokarbonların mevcudiyetini ifade etmektedir. Yeni perlit fırınının baca gazlarına her hangi bir geri dönüşüm veya baca gazlarındaki yanmamış hidrokarbonların yakılabilmesi için alternatif bir uygulama söz konusu değildir. Yanmamış hidrokarbonlar, doğrudan referans çevre ortama bırakılmaktadır. Kontrol hacminden baca gazları ile birlikte çıkan enerji miktarı, giren enerji miktarının % 51.84'nü oluşturmaktadır. Bununla birlikte, baca gazları ile birlikte, kontrol hacmi olan yeni perlit fırınından çıkan ekserji miktarı, fırına giren toplam ekserjinin % 32.81'ni oluşturmaktadır. Yeni perlit fırını, günde 8 saat çalıştırılmaktadır. Yetersiz yakma havasının fırına beslenememesinden dolayı, meydana gelen yanmamış hidrokarbon (Metan) miktarı, 3456 kg/Ay olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırının kütle dengesi analizi, yakıt hava oranının ayarlanması ve iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Doğal gaz yanma verimi yüksek yakıtlardan biridir. Bu nedenden dolayı, hava fazlalık katsayısının, arzu edilen seviyelerde sabitlenmesi gerekmektedir. İleri otomasyon üniteleri ve uygulamaları ile endüstriyel fırınlarını daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [115]. Dolayısıyla, hava fazlalık katsayısı, daha iyi bir yanma verimi elde etmek için arzu edilen seviyelerin kontrolü için kullanılabilir.

Fırın verimini arttırmak için en iyi uygulamalardan biri de ileri otomasyon sistemleri ile fırının çalışma parametrelerini kontrol etmektir. En önemli parametreler, perlit-yakıt oranı, yanma havası fazlalık katsayısı, perlitin parçacık boyutu ve fırına beslenen perlitin fırın içerisindeki dağılımıdır. Fırının maksimum verimi, öncelikli parametrelerin bir kereye mahsus olarak ayarlanmasından ziyade, değişken şartlar bakımından, bu parametrelerin ayarlanması ile sağlanabilir. Endüstriyel fırınların daha iyi bir verim değeri ile kullanılması için göz önüne alınacak olan değerleri iyileştirmek için ekserji kaybı gibi önlenemeyen ve ekserji yıkımı gibi önlenemeyen parametrelerin tanımlanması gerekmektedir [100]. Tanımlanan parametrelere yönelik çözüm önerilerinin geliştirilip uygulanması ile yeni perlit fırını gibi endüstriyel fırınların çalışma verimleri arttırılabilir.

Kontrol hacim olarak seçilen yeni perlit fırının yüzeylerinden meydana gelen, enerji ve ekserji kayıpları, fırına giren toplam enerji ve ekserji değerlerinin, % 30.9 ve % 23.27'si olduğu hesaplanmıştır. Fırın yüzeyi, oksitlenmiş bir yüzey olarak göz önüne alınmıştır. Bunun nedeni, fırının dış yüzeyi, oksitlenmeye karşı, koruyucu boya veya katmanlar ile korunmuyor olmasıdır. Fırının dış yüzey sıcaklığı, 473 K olarak ölçülmüştür. Yalıtım yetersiz olmasından dolayı, enerji ve ekserji kayıpları artmaktadır. Fırın dış yüzey sıcaklığının yüksek seviyelerde olmasından dolayı da, fırının dış yüzeyinin çevre şartlarından etkilenerek, oksitlenmesini engelleyecek, koruyucu boyalar göz önüne alınamamaktadır. Oksitlenen dış fırın yüzeyinde meydana gelen ısı transfer mekanizmalarından en yoğunu, ışıınım ile gerçekleşmektedir. Oksitlenmiş yüzeylerin ışıınım yayma oranı 0.78'dir. Yeni perlit fırının dış yüzeyinden, ışıınım ile meydana gelen enerji kaybı, 340.52 kW olarak hesaplanmıştır. Toplam enerji kaybı (416.999 kW) göz önüne alındığı zaman, ışıınım ile enerji kaybı toplam enerji kaybının % 81.65'ni oluşturmaktadır. Aynı zamanda, fırının sabitlenmesi için kullanılan bağlantı elemanları ve belirlenemeyen diğer parametrelerden dolayı, 51.54 kW değerinde, hesaplanamayan bir enerji kaybı söz konusudur. Yeni perlit fırının baca bölümünün dış yüzey sıcaklığı 1010 K olarak ölçülmüştür. Yeni perlit fırının üst, orta ve alt ısıtma bölümlerinin dış yüzey sıcaklıkları 473 K olarak ölçülmüştür. Sisteme giren doğal gaz, yakma havası ve ham perlite her hangi bir ön ısıtma işlemi uygulanmamaktadır. Fırına giren bu parametreler, enerji ve ekserji analizleri bölümünde de ifade edildiği gibi referans çevre şartlarında fırına girmektedir. Isı geri dönüşümü, birçok uygulamada ön ısıtma işlemleri ile geliştirilmektedir. Baca gazları, ısı değiştirgeçleri ile ön ısıtma uygulamaları için kullanılabilir. Baca gazlarının ön ısıtma uygulamaları için kullanılabilir bir potansiyele sahiptir. Toplam giren enerjinin % 69.11'i, baca gazlarından çevreye atılmaktadır.

Baca gazları içerisindeki yanmamış hidrokarbonların, ön ısıtma işlemi için kullanılamayacağına da belirtilmesi gerekmektedir. Yeni perlit fırınına giren parametreler, genleşmiş perlitin ve yanma sonu ürünlerinin toplam 932.461 kW'lık bir enerji ile ön ısıtma uygulaması için kullanılabilir. Daha öncede belirtildiği gibi ön ısıtma uygulaması için öncelikle, hava yakıt karışımının ayarlanarak, yanma veriminin artırılması ve yanmamış hidrokarbonların da yakılması gerekmektedir. Giren parametrelere ön ısıtma uygulanması, yeni perlit fırının enerji ve ekserji verimini arttıracaktır. Buna örnek olarak, ön ısıtma uygulaması ile endüstriyel fırınların verimi artırmakta ve ısı kayıplarını azaltmaktadır. Bu yöntemin uygulanması ile çimento sektöründeki döner fırın uygulamalarından 0.08-0.111 GJ/t termal enerjinin geri dönüşümü sağlanmış olmakla birlikte, 8.44-9.3 kg-CO₂/t emisyon miktarında azalma olmuştur [116].

Daha öncede belirtildiği gibi, yeni perlit fırının enerji verimi % 69 olarak hesaplanmıştı. Benzer endüstriyel fırınların enerji verimi, genel olarak % 82.9 olarak verilmektedir [23]. Yeni perlit fırını diğer fırınlar ile karşılaştırıldığı zaman, yeni perlit fırınının enerji veriminin çok düşük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, yeni perlit fırının enerji verimliliğinin artırılması açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bunun en büyük göstergesi olarak, yetersiz yalıtımdan dolayı meydana gelen enerji kayıpları gösterilebilir. Ayrıca, yeni perlit fırınının üretici firması ve teknik personelin, fırın kurulumu yapıldıktan sonra, fırının iyileştirilmesi, gerekli ayarlamaların ve düzenlemeleri yapmadığı görülmektedir. Bunun göstergesi olarak, hava yakıt karışımının ayarlanmamış olması gösterilebilir.

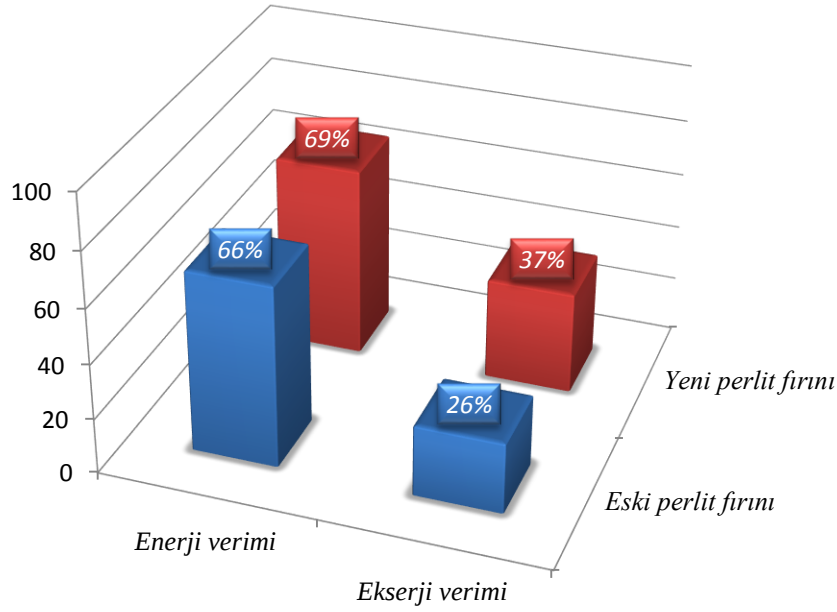
Yeni perlit fırının verimi, iyi bir kontrol sağlayan ve farklı stratejiler ile desteklenen, uygun bir otomasyon sistemi, giriş parametrelerinin ön ısıtma uygulanması, fırının iyileştirilmesi ve son olarak yüksek verime sahip yalıtım malzemeleri ile yalıtılması ile arttırılabilir. Sonuç olarak, yeni perlit fırını, eskisini aratmayacak şekilde, genleşmiş perlit üretmek için gerekenden çok daha fazla enerji tüketmektedir. Fakat daha fazla genleşmiş perlit ya da daha az enerji ile aynı miktarda genleşmiş perlit elde edilebilir. Eski perlit fırınına nazaran, yeni perlit fırını saatte 1036.8 kg genleşmiş perlit üretmektedir. Eğer yeni perlit fırınının optimizasyonu yapıldığı takdirde, gerçek üretim kapasitesi de belirlenmiş olacaktır.

Ekserji analizinden elde edilen bulgular ve bu bulguların da değerlendirilmesi gerekmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi yeni perlit fırınının ekserji verimi % 37 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ekserji verimi, literatürdeki benzer endüstriyel fırınların analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Benzer fırınların ekserji verimi, % 40 ila % 50 arasında değiştiği görülmektedir [24,25,26]. Yeni perlit fırınının ekserji kaybı, 281.041 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı ise 471.09 kW olarak belirlenmiştir. Ekserji yıkımı, toplam giren enerjinin % 39'dur. Ekserji yıkımı, her hangi bir gerçek işlemde dolayı meydana gelen, tersinmezliklerden dolayı meydana gelmektedir. Yapılan işlemde meydana gelen ekserji kayıpları engellenebilir ya da en aza indirilebilir iken, ekserji yıkımındaki önlenabilir ve önlenemez ekserji yıkımlarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu sayede, parametreler göz önüne alınarak ve iyileştirerek, ekserji yıkımı değeri azaltılabilir. Yeni perlit fırınının üretim aşamasında, fırın üreticisi firma tarafından, entropi üretiminin azaltılması ilkeleri hesaba katılarak, fırının tasarımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Entropi üretiminin azaltılması, basınç kayıpları, kütle transferi ve ısı transferinden dolayı meydana gelen tersinmezliklerin, termodinamik açıdan yetersizliklerinin optimizasyonu ve modellenmesi anlamına gelmektedir. Eğer mühendislik sistemleri ve bu sistemlerin bileşenlerinin entropi üretimindeki rolleri azaltılırsa, bu sistemlerin ekserji yıkımındaki payı da azaltılmış olacaktır [117].

3.2.1.Eski ve Yeni Perlit Fırınlarının Karşılaştırılması

Eski perlit fırınının enerji ve ekserji analizleri, sınırlı veriler ışığında gerçekleştirildiği belirtilmişti. Yeni perlit fırınının enerji ve ekserji analizleri ise eskisine oranla, daha iyi veriler ile gerçekleştirilmiştir. Yeni ve eski perlit fırınının enerji ve ekserji verimleri, Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

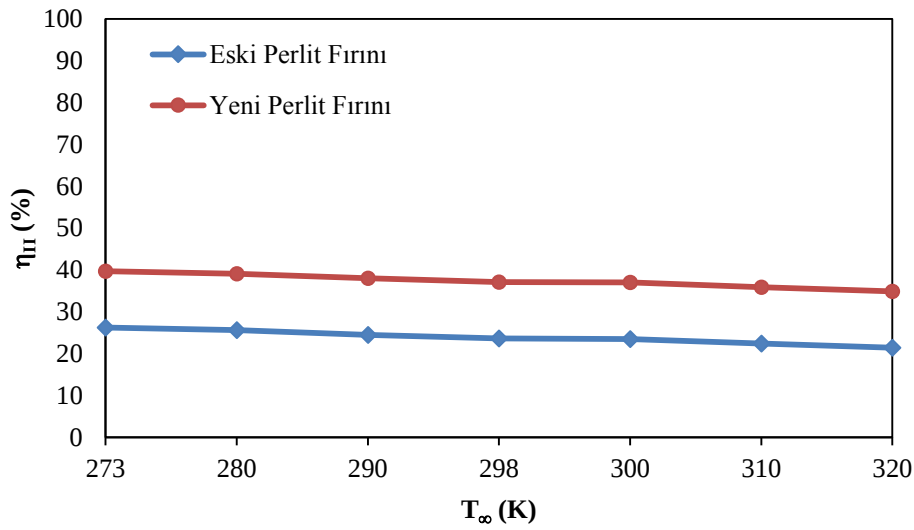


Şekil 3.5. Yeni ve eski perlit fırınlarının karşılaştırılması [127]

Enerji analizi, referans çevre koşullarından bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir. Yeni ve eski perlit fırınlarının enerji analizleri, Şekil 3.5 ile karşılaştırılabilir. Yeni perlit fırınının enerji veriminin eski fırına nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Yeni perlit fırınının yalıtımı yetersiz olmasına rağmen, enerji verimi üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Fakat söz konusu yalıtımın yetersiz olması ve hava yakıt oranından dolayı kaynaklanan enerji kayıpları yüksek olması, enerji verimini etkilemektedir. Yeni ve eski perlit fırınlarının enerji verimleri arasındaki farkın az olmasındaki nedeni; yalıtım yetersiz olması ve hava yakıt oranından dolayı kaynaklanan enerji kayıpları yüksek olmasıdır. Eski perlit fırınının yüzey sıcaklığı 1073 K iken, yeni perlit fırınının yüzey sıcaklığı ise 473 K olarak ölçülmüştür. Yeni perlit fırınının yalıtımının eskiye oranla daha iyi olduğu açık bir şekilde söylenebilir. Fakat yeni fırının yalıtımının yeterli olduğu söylenemez. Eski perlit fırınının yenisi ile değiştirilmesi işleminde, sadece ısıtma hacminin değiştirilmesi söz konusudur. Fırın otomasyonu, fırının bacası ve perlit patlatma sistemini oluşturan diğer sistem bileşenleri, yatırım kapsamına alınmamıştır. Enerji analizinden elde edilen veriler, en fazla enerji kayıplarının fırın bacasından meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum her iki fırın için de geçerlidir.

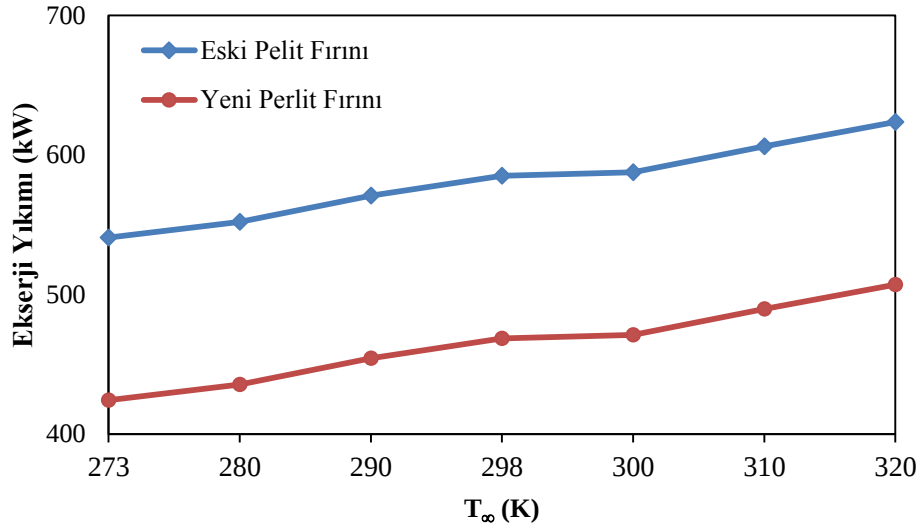
Şekil 3.5’de gösterilen ekserji verimleri, fırınların karşılaştırılması açısından, sağlıklı bir analiz yapmamızı engellemektedir. Bunun nedeni ise her iki fırının farklı referans çevre durumlarına göre yapılmasıdır.

Eski perlit fırının ekserji analizlerinde çevre sıcaklığı 273 K iken, yeni perlit fırınının ekserji analizlerinde çevre sıcaklığı 300 K'dir. Ekserji analizindeki en önemli parametrelerden biri de çevre şartlarıdır. Ekserjinin çevre şartlarına bağlı bir parametre olması, eski ve yeni fırınlarının, ekserji verimlerinin karşılaştırılmasını engellemektedir. Ekserji veriminin ve yıkımının referans çevre sıcaklığına bağlı olarak değişmesi, her iki fırının ekserji verimi açısından karşılaştırılmasına yardımcı olabilmektedir. Şekil 3.6'de, her iki perlit fırınının ekserji veriminin, referans çevre sıcaklığı ile birlikte değişimi görülmektedir.



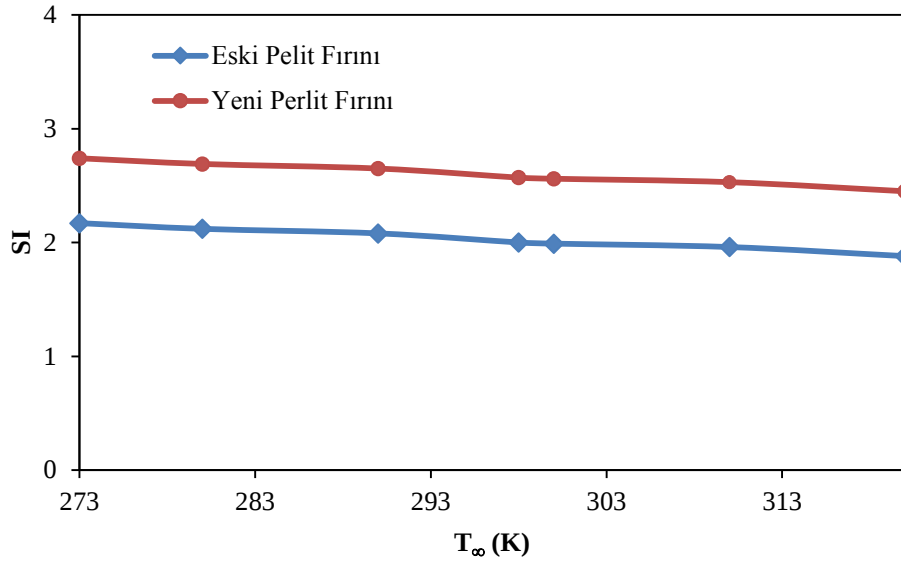
Şekil 3.6. Referans çevre sıcaklığının, yeni ve eski perlit fırınlarının ekserji verimi üzerindeki etkisi [127]

Yeni perlit fırınının ekserji verimi, eski fırından daha fazla olduğu, Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere, yeni perlit fırınının ekserji dengesindeki çıkan ekserji parametrelerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri, yanmamış hidrokarbonların, baca gazları ile birlikte, çevreye atılmasıdır. Ayrıca, eski perlit fırını saatte 410.4 kg genleşmiş perlit üretirken, yeni perlit fırını saatte 1036.8 kg genleşmiş perlit üretmektedir. Genleşmiş perlit ile birlikte kontrol hacminden çıkan ekserji değeri, yeni perlit fırınında daha fazladır. Bu durum, Şekil 3.7'de gösterilen, her iki fırınının referans çevre sıcaklığına göre, ekserji yıkımının değişkenliğini gösteren grafikten de anlaşılabilir.



Şekil 3.7. Referans çevre sıcaklığının, her iki fırında meydana gelen ekserji yıkımı üzerindeki etkisi [127]

Referans çevre sıcaklığının, ekserji yıkımına ve kontrol hacmine giren parametrelere olan etkisinden dolayı, sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi, Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Referans çevre sıcaklığının, sürdürülebilirlik indeksi üzerindeki etkisi [127]

Ekserji kayıplarına bağlı tersinmezliklerin azaltılması, perlit üretiminin çevresel etkilerini azaltacaktır. Ayrıca, benzer perlit sistemlerinin, farklı iklim şartlarına sahip coğrafyalarda kullanılabilir. Farklı iklim şartlarında ve benzer tasarım parametrelerine sahip perlit fırınlarının ekserji verimlerinin belirlenmesi, perlit endüstrisi için yararlı olabilmektedir.

3.3. Döner Fırının Ekserji Analizinden Elde Edilen Bulgular

Döner fırına giren ve çıkan tüm parametreler göz önüne alındığı zaman, sadece kayıp enerji miktarı hesaplanmamıştır. Döner fırının büyüklüğü ve değişen yüzey sıcaklıklarından dolayı, kayıp ısı miktarı, enerjinin korunumu yasasına göre ifade ettiğimiz Eşitlik [2.73] ile hesaplanmıştır. Kayıp ısı miktarı, 2597.65 kW olarak hesaplanmıştır. Döner fırına giren parametrelerin enerji analizlerinden elde edilen ve kullanılan değerler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Döner fırına giren parametrelerin enerji değerleri [128]

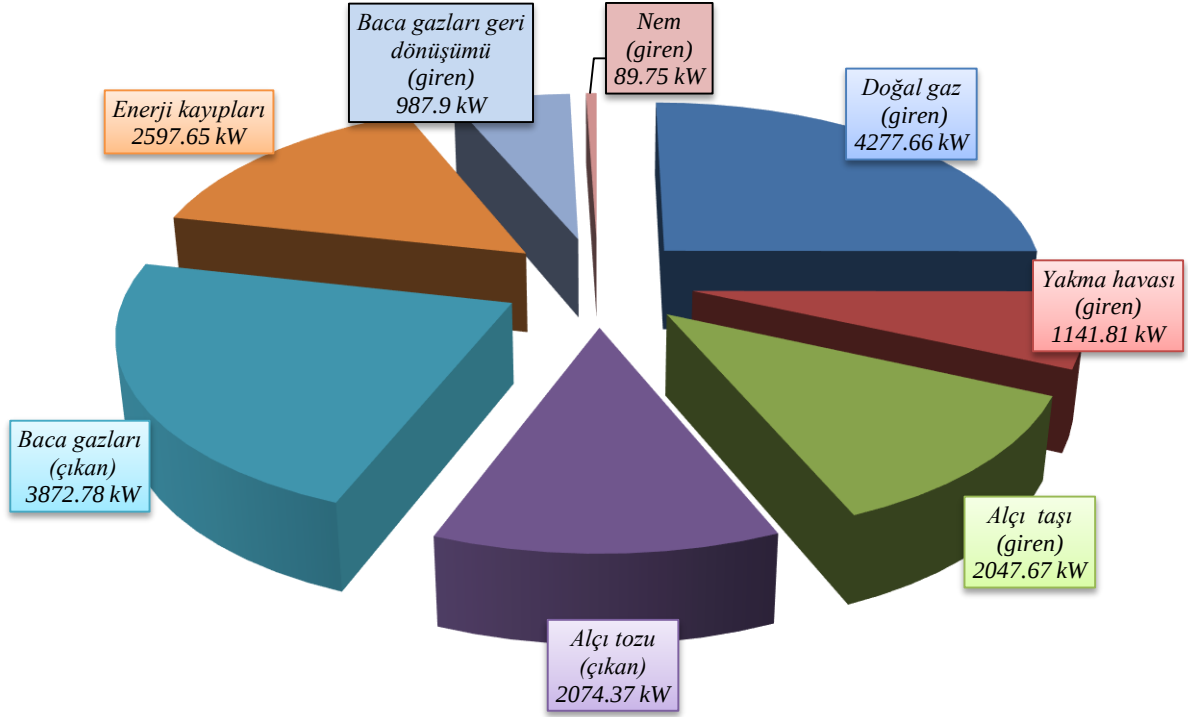
Giren parametreler	Bileşenler	T (K)	Kütleli debi (kg/s)	C_p (kJ/kg·K)	h (kJ/kg)	$\dot{E}^{fiz}$ (kW) (toplamlar)	AID (kJ/kg) [90]	$\dot{E}^{kim}$ (kW) (toplamlar)
Doğal gaz	CH ₄	300	0.0758	2.231	669.57	56.87	50,050	4,220.78
	C ₂ H ₆	300	0.0054	1.767	530.17		47,520	
	C ₃ H ₈	300	0.002	1.680	504.17		46,340	
	C ₄ H ₁₀	300	0.0011	1.717	515.36		45,370	
	C ₅ H ₁₂	300	0.00040	1.718	515.55		44,910	
	N ₂	300	0.0036	1.038	311.40		-	
	CO ₂	300	0.00104	0.668	200.62		-	
Yakma havası	N ₂	302	2.805	1.038	313.54	1,141.81	-	-
	O ₂	302	0.851	0.920	277.98		-	-
	CO ₂	302	0.0017	0.848	256.19		-	-
	H ₂ O (g)	302	0.0442	1.869	564.67		-	-
Alçı taşı	CaSO ₄ ·2H ₂ O	300	6.262	1.09	327	2,047.67	-	-
Nem	H ₂ O (s)	300	0.0709	4.22	1266	89.75	-	-
Baca gazlarının geri dönüşümü	N ₂	353	1.311	1.043	368.28	987.90	-	-
	O ₂	353	0.242	0.937	331.08			
	CO ₂	353	0.111	0.893	315.53			
	H ₂ O (g)	353	0.584	1.891	667.69			

Döner fırından çıkan alçı tozunun ve baca gazlarının enerji analizinden elde edilen sonuçlar ve kullanılan parametreler, Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Döner fırından çıkan parametrelerin enerji değerleri [128]

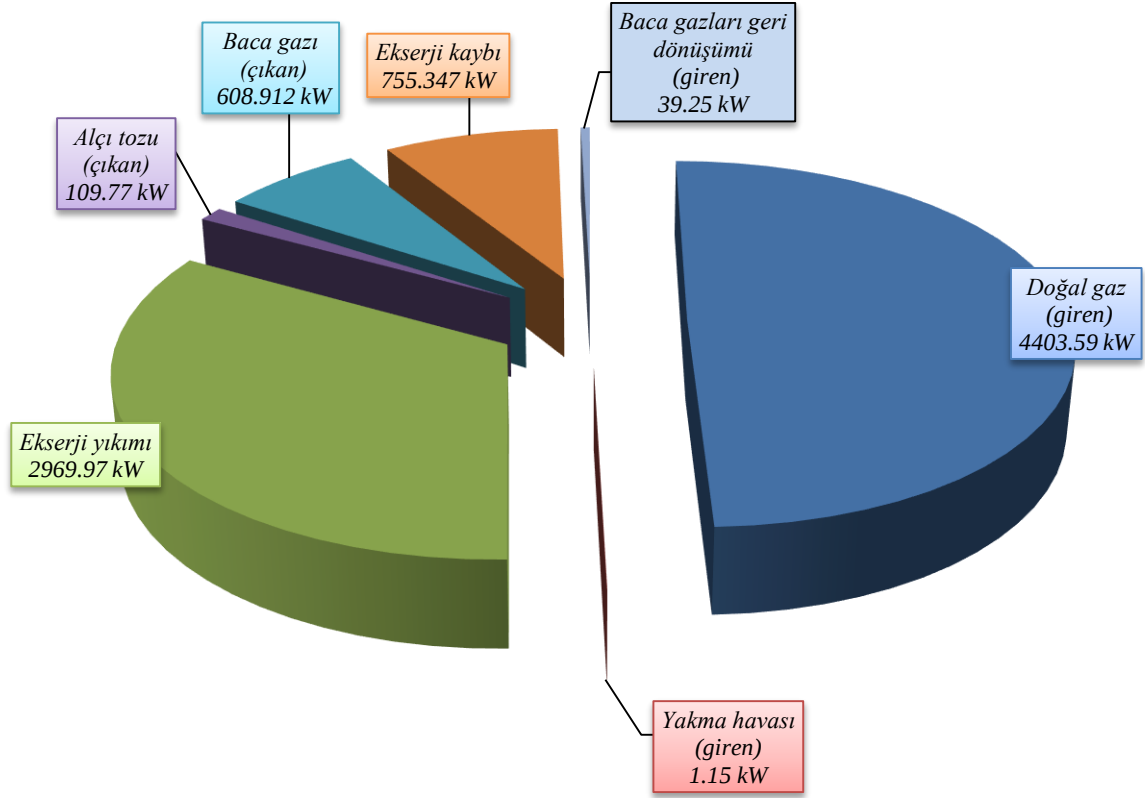
Çıkan parametreler	Bileşenler	T (K)	Kütleli debi (kg/s)	C_p (kJ/kg·K)	h (kJ/kg)	$\dot{E}^{fiz}$ (kW) (toplamlar)
Baca gazları	N ₂	433	4.137	1.053	456.009	3,872.78
	O ₂	433	0.761	0.963	417.148	
	CO ₂	433	0.349	0.958	415.192	
	H ₂ O (g)	433	1.823	1.929	835.446	
Alçı tozu	CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	433	5.323	0.9	389.7	2,074.37

Kontrol hacmi olan döner fırının enerji dengesinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3.9 ile pasta diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Döner fırının enerji dengesi [128]

Döner fırının enerji verimi % 69 olarak belirlenmiştir. Döner fırından meydana gelen ekserji kayıpları, 755.347 kW olarak hesaplanmıştır. Döner fırının ortalama yüzey sıcaklığı 423 K olarak belirlenmiştir. Şekil 3.10’da, kontrol hacmi olan döner fırının ekserji dengesinde elde edilen sonuçlar, pasta diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Döner fırının ekserji dengesi [128]

Döner fırının ekserji verimi, % 16 olarak hesaplanmıştır.

3.4. Yeni ve Eski Perlit Fırınının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulgular

Çalışmada yeni ve eski olmak üzere iki farklı perlit genleştirme fırınının eksergoekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Sunulan tüm veriler, daha öncede belirtildiği gibi 2013 yılı için geçerlidir.

Yatırım maliyetinin saatlik olarak seviyelendirilmesi ve işletme-bakım maliyetlerinde saatlik olarak seviyelendirilmesi için Eşitlikler [2.105] ve [2.107] kullanılmıştır. Eski perlit fırınının şimdiki yatırım bedeli 26,883.82 \$ iken, yeni fırının yatırım bedeli 44,359.82 \$'dır. Hurda değeri, ömrünü tamamlamış sistemlerin maliyetini ifade etmektedir. Eski perlit fırınının hurda değeri, 2,836.879 \$ olarak belirlenmiştir. Yeni perlit fırınının hurda değeri ise Eşitlik [2.99] kullanılarak, 4,497.354 \$ olduğu hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının şimdiki değer faktörleri, 0.5234 ve 0.1364 olarak hesaplanmıştır.

Eski perlit fırınının yıllık yatırım maliyeti, 5,907.269 \$ iken, yeni perlit fırınının yıllık yatırım maliyeti, 5,379.092 \$ olarak hesaplanmıştır.

Eski perlit fırınının yatırım geri dönüş faktörü 0.2197 iken, yeni perlit fırınının yatırım geri dönüş faktörü, 0.1212 olarak hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının, saatlik olarak seviyelendirilmiş yatırım maliyeti, 2.461 \$/h ve 5.122 \$/h olarak hesaplanmıştır. Her iki fırın arasında büyük bir üretim kapasitesi farkı söz konusudur. Bu fark, yatırım maliyet akışında da görülmektedir. Saatlik olarak seviyelendirilmiş işletme ve bakım, Eşitlik [2.107] kullanılarak hesaplanmıştır. İşletme ve bakım maliyetine etki eden bazı parametreler söz konusudur. Bu parametreler hammaddenin ve nakliyesinin maliyeti, bakım-onarım maliyeti, elektrik tüketim ve çalışan maliyetleridir. Bu parametrelerin toplam, saatlik olarak seviyelendirildiğinde, eski perlit fırınının işletme ve bakım maliyeti 32.611 \$/h iken, yeni perlit fırınının işletme ve bakım maliyeti 75.654 \$/h olarak hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının sermaye maliyet akımları, sırası ile 35.072 \$/h ve 80.777 \$/h olarak hesaplanmıştır. Sermaye maliyet akışı Eşitlik [2.97] kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Saatlik olarak maliyet seviyelendirme metodunun sonuçları [129]

Eski Perlit Fırını		Yeni Perlit Fırını	
$\$D$	26,883.82 (\$)	$\$D$	44,359.82 (\$)
Hu	2,836.879 (\$)	Hu	4,497.354 (\$)
$\$DF$	0.52345	$\$DF$	0.1364
i_{ef}	% 10	i_{ef}	% 10
$Y\dot{M}$	5,907.269 (\$)	$Y\dot{M}$	5,379.092 (\$)
YGF	0.2197	YGF	0.1212
$\dot{Z}^{YM}$	2.461 (\$/h)	$\dot{Z}^{YM}$	5.122 (\$/h)
$\dot{Z}^{B-IM}$	32.611 (\$/h)	$\dot{Z}^{B-IM}$	75.654 (\$/h)
$\dot{Z}$	35.072 (\$/h)	$\dot{Z}$	80.777 (\$/h)

Doğal gazın birim ekserji maliyeti, Eşitlik [2.125] kullanılarak hesaplanmıştır. $Y\dot{S}M$ eski perlit fırını için 59.999 \$/h iken, yeni perlit fırını için bu değer 52.28 \$/h olarak hesaplanmıştır. Eşitlik [2.128] ile ifade edilen birim kütlenin ekserjisi 49,011.74 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Doğal gazın birim ekserji maliyeti, eski perlit fırını için 13.601 \$/GJ, yeni perlit fırını için 12.345 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Her iki fırına giren yakıt ekserji maliyetleri, sırası ile 57.287 \$/h ve 53.651 \$/h olarak hesaplanmıştır. Ekserji kaybı maliyeti Eşitlik [2.118] ile hesaplanmıştır. Eksi perlit fırınının neden olduğu kayıp ekserji maliyeti 15.749 \$/h iken, yeni perlit fırını için 12.480 \$/h olarak hesaplanmıştır. Baca gazlarının ekserji maliyetleri, eski perlit fırını için 13.723 \$/h, yeni perlit fırını için 20.119 \$/h olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının ürettiği genleşmiş perlitin birim ekserji ve ekserji maliyeti, sırası ile 648.309 \$/GJ ve 62.886 \$/h olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırını ile üretilen genleşmiş perlitin birim ekserji maliyeti ve ekserji maliyeti, 492.186 \$/GJ ve 104.343 \$/h olarak hesaplanmıştır.

Ekserji yıkımı maliyeti ise eski fırın için 26.467 \$/h iken, yeni fırın için bu değer 20.924 \$/h olarak hesaplanmıştır. Her iki fırının eksergoekonomik analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.4 ve 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Eski perlit fırınının ekserji ve birim ekserji maliyetleri [129]

Eski Perlit Genleştirme Fırını		
Parametreler	Ekserji Maliyeti	Birim Ekserji Maliyeti
Doğal Gaz	$\dot{C}_{DG} = 57.287 \text{ $/h}$	$c_{DG} = 13.601 \text{ $/GJ}$
Yanma Havası	$\dot{C}_{yh} = 0 \text{ $/h}$	$c_{yh} = 0 \text{ $/GJ}$
Perlit	$\dot{C}_{per} = 0 \text{ $/h}$	$c_{per} = 0 \text{ $/GJ}$
Ekserji Kayıpları	$\dot{C}_k = 15.749 \text{ $/h}$	$c_k = 13.7606 \text{ $/GJ}$
Genleşmiş Perlit	$\dot{C}_{G.per} = 62.886 \text{ $/h}$	$c_{G.per} = 648.309 \text{ $/GJ}$
Baca Gazları	$\dot{C}_{bg} = 13.723 \text{ $/h}$	$c_{bg} = 13.601 \text{ $/GJ}$

Yeni perlit fırınının birim ekserji ve ekserji maliyetleri Tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Yeni perlit fırınının birim ekserji ve ekserji maliyeti [129]

Yeni Perlit Genleştirme Fırını		
Parametreler	Ekserji Maliyeti	Birim Ekserji Maliyeti
Doğal Gaz	$\dot{C}_{DG} = 53.651 \text{ $/h}$	$c_{DG} = 12.345 \text{ $/GJ}$
Yanma Havası	$\dot{C}_{yh} = 0 \text{ $/h}$	$c_{yh} = 0 \text{ $/GJ}$
Perlit	$\dot{C}_{per} = 0 \text{ $/h}$	$c_{per} = 0 \text{ $/GJ}$
Ekserji Kayıpları	$\dot{C}_k = 12.480 \text{ $/h}$	$c_k = 12.344 \text{ $/GJ}$
Genleşmiş Perlit	$\dot{C}_{G.per} = 104.343 \text{ $/h}$	$c_{G.per} = 492.186 \text{ $/GJ}$
Baca Gazları	$\dot{C}_{bg} = 20.119 \text{ $/h}$	$c_{bg} = 14.109 \text{ $/GJ}$

Ekserji kavramı temelinde üretim maliyeti, eski perlit fırını için 0.153 \$/kg iken yeni perlit için 0.100 \$/kg olarak hesaplanmıştır. Performans parametresi eksergoekonomik faktör Eşitlik [2.134] ile belirlenmektedir. Eski perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 45 iken, yeni perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır.

3.5. Döner Fırının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulgular

Döner fırın sisteminin şimdiki değeri, 5,279,569.45 \$ olarak hesaplanmıştır. Hurda değeri ise sistemin çalışma ömrünü tamamladığı taktirdeki değerinin 531,000 \$ olduğunu göstermektedir.

Döner fırın sisteminin şimdiki değer faktörü ise 0.057308 olarak hesaplanmıştır. Eksergoekonomik analizdeki iskonto oranı % 10, yıllık sermaye maliyeti 560,051.447 \$ ve sermaye geri dönüş faktörü 0.106079 olarak hesaplanmıştır. Tesisin saatlik olarak seviyelendirilmiş sermaye yatırım maliyeti 77.786 \$/h olarak hesaplanmıştır. Bunu etkileyen parametreler, alçı taşı ve alçı taşının nakliye maliyetleri, onarım ve bakım maliyetleri, tüketilen elektriğin ve çalışanların maliyetleri oluşturmakta olup, bu parametrelerin seviyelendirilmiş maliyetlerinin toplamı, 363.352 \$/h olarak hesaplanmıştır. İşletme ve bakım maliyeti, 363.352 \$/h olarak değerlendirilmiştir. Sermaye maliyet akımı ise 441.138 \$/h'dir. Saatlik olarak seviyelendirme metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar, Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Maliyetlerin saatlik olarak seviyelendirme metodundan elde edilen sonuçlar

$\$D$	5,279,569.45 (\$)
Hu	531,000 (\$)
$\$DF$	0.057308
i_{ef}	% 10
YYM	560,051.447 (\$)
YGF	0.106079
$\dot{Z}^{YM}$	77.786 (\$/h)
$\dot{Z}^{B-IM}$	363.352 (\$/h)
$\dot{Z}$	441.138 (\$/h)

Döner fırında yakıt olarak kullanılan doğal gazın birim ekserji maliyeti, Eşitlik [2.125] kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik [2.125]'deki $Y\dot{S}M$ değeri 217.968 \$/h, YBKE değeri 49,011.74 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Doğal gazın birim ekserji maliyeti 13.7606 \$/GJ iken, ekserji maliyeti 218.1457 \$/h olarak hesaplanmıştır. Çevre şartlarında döner fırına giren yakma havasının birim ekserji maliyeti sıfırdır. Ekserji kaybının maliyeti ise Eşitlik [2.122] kullanılarak hesaplanmış olup, değeri 37.4185 \$/h'dir. Döner fırının baca gazlarının ekserji maliyeti ve baca gazı geri dönüşüm hattındaki baca gazlarının ekserji maliyetleri, sırası ile 30.164 \$/h ve 1.9443 \$/h olarak hesaplanmıştır. Sistem tarafından üretilen alçı tozunun ekserji maliyeti 593.636 \$/h iken, alçı tozunun birim ekserji maliyeti 1502.498 \$/GJ olarak belirlenmiştir. En önemli parametrelerden biri olan ekserji yıkımının maliyet oranı, Eşitlik [2.133] kullanılarak, 147.1145 \$/h olarak hesaplanmıştır. Döner fırının eksergoekonomik analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.7'de sunulmuştur.

Tablo 3.7. Döner fırının eksergoekonomik analizinden elde edilen sonuçlar

Parametreler	Ekserji Maliyeti	Birim Ekserji Maliyeti
Doğal Gaz	$\dot{C}_{DG} = 218.1457 \text{ \$/h}$	$c_{DG} = 13.7606 \text{ \$/GJ}$
Yanma Havası	$\dot{C}_{yh} = 0 \text{ \$/h}$	$c_{yh} = 0 \text{ \$/GJ}$
Alçı Taşı	$\dot{C}_{A.taşı} = 0 \text{ \$/h}$	$c_{A.taşı} = 0 \text{ US\$/GJ}$
Baca gazı Geri Dönüşümü	$\dot{C}_{bgg} = 1.9443 \text{ \$/h}$	$c_{bgg} = 13.7606 \text{ \$/GJ}$
Baca Gazları	$\dot{C}_{bg} = 30.164 \text{ \$/h}$	$c_{bg} = 13.7606 \text{ \$/GJ}$
Alçı Tozu	$\dot{C}_{A.tozu} = 593.636 \text{ \$/h}$	$c_{A.tozu} = 1502.498 \text{ \$/GJ}$
Ekserji Kayıpları	$\dot{C}_k = 37.4185 \text{ \$/h}$	$c_k = 13.7606 \text{ \$/GJ}$
Ekserji Yıkımı	$\dot{C}_{yıkım} = 147.1145 \text{ \$/h}$	$c_{DG} = 13.7606 \text{ \$/GJ}$

Perlit fırınında olduğu gibi döner fırının eksergoekonomik açıdan performansının belirlenmesi gerekmektedir. Döner fırın için bu performans parametresi, eksergoekonomik faktör olarak belirtilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi döner fırınlar bir ısı değiştirgeci olarak göz önüne alınabilir. Eksergoekonomik faktör parametresi, sistem tipine göre değerlendirilmektedir. Eksergoekonomik faktör ısı değiştirgeçleri için % 55 den daha küçük bir değere sahip olması beklenmektedir [98]. Eşitlik [1.134] kullanılarak, döner fırının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Alçı tozunun üretim maliyeti Eşitlik [2.137] kullanılarak hesaplanmıştır. Alçı tozunun üretim maliyeti, 0.03097 \\$/kg olarak belirlenmiştir.

3.6. Döner Fırının Sayısal Modellenmesinden Elde Edilen Bulgular

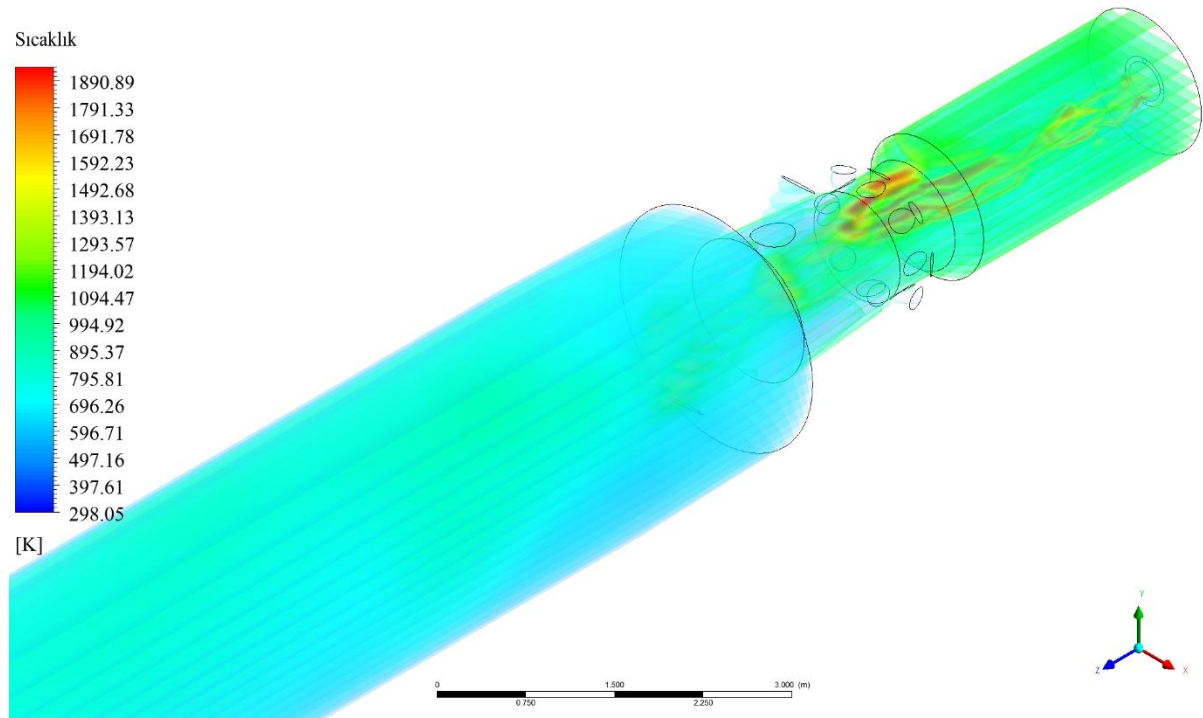
Tez kapsamında yapılan döner fırının sayısal modellenmesinin temel amacı; baca gazı geri dönüşümünün fırın içerisindeki etkilerinin tartışılması, alçı taşı girişinin akış ve sıcaklık üzerindeki etkisi, yanma odasının tasarımının uygunluğu ve bu parametrelere bağlı olarak elde edilen bulguların değerlendirilmesidir. Ekserji analizinden elde edilen bulgular ve analizler için yapılan alt yapı çalışmalarına göre, baca gazlarının yoğun miktarda su buharı ihtiva etmesinden dolayı, fırın sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Döner fırının ekserji analizlerindeki kütle dengesinden elde edilen bulgular göstermiştir ki, doğal gazın yanması için gerekenden daha fazla miktarda yanma havası fırına gönderilmiştir. Bunun nedeninin alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi için yanma havasının bir momentum kaynağı olarak kullanılmasıdır.

Döner fırının sayısal analizinde iki durum göz önüne alınmıştır. Bu durumlar; döner fırının mevcut çalışma durumu ile baca gazı girişinin kesildiği ve alçı taşının fırına giriş yaptığı bölümün kaldırılması durumudur.

Baca gazı girişinin kesildiği ve alçı taşının fırına giriş yaptığı bölümün kaldırılması durumu, fırının sayısal analizinde ikinci durum olarak adlandırılmıştır. Her iki model için Reynolds sayısı $Re=2.02 \times 10^5$ olarak elde edilmiştir.

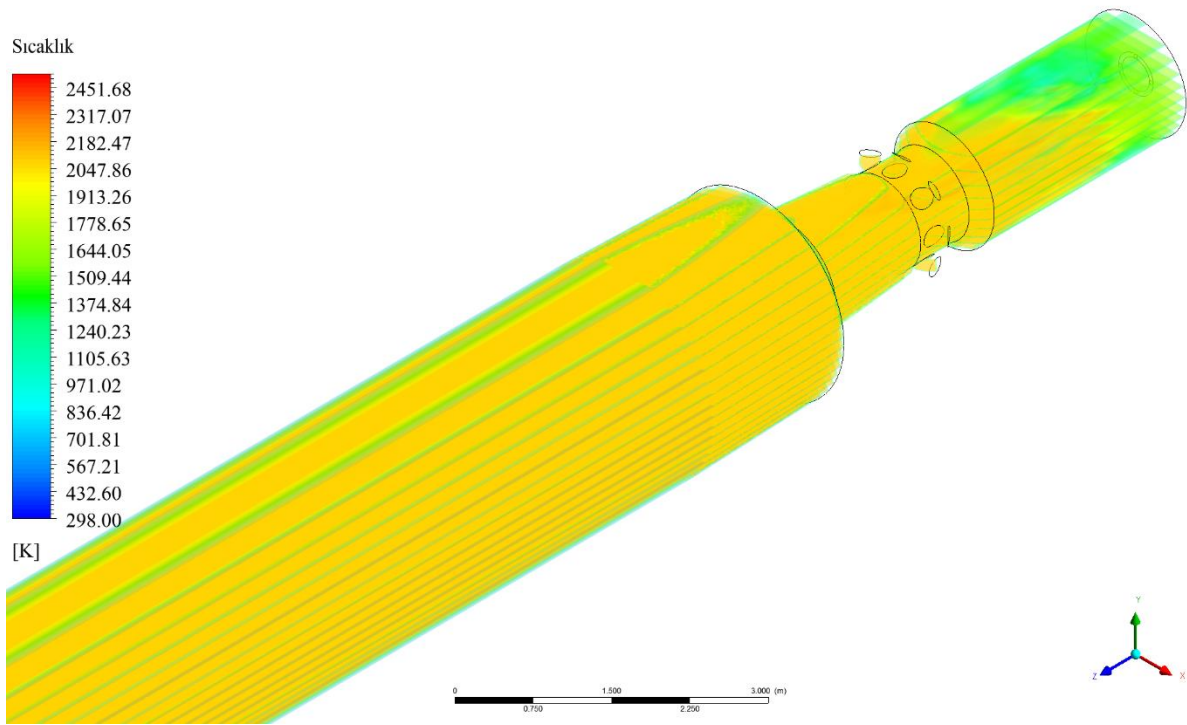
Döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı, literatürdeki döner fırın analizlerinde en fazla tartışılan parametrelerden biridir [54 – 56]. Döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı, işlenmek istenen maddenin fırın içerisindeki dağılımı ile paralel hareket etmesi arzu edilmektedir. Böylece, işlenmek istenen maddenin daha az enerji ile ürün kalite ve kapasitesinden ödün vermeden gerçekleştirme olanağı sağlanmaktadır. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı, aynı zamanda fırın içerisindeki ısı enerjisinin dağılımını da göstermektedir. Şekil 3.11’de döner fırının güncel çalışma şartlarında meydana gelen üç boyutlu sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

Şekil 3.11’de, Z-X eksenı boyunca döner fırın içerisinde oluşturulan şeffaf ve yatay levhalar üzerindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Mevcut çalışma koşullarının analizden elde edilen bulgular göstermiştir ki, döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 1868.64 K değerindedir.



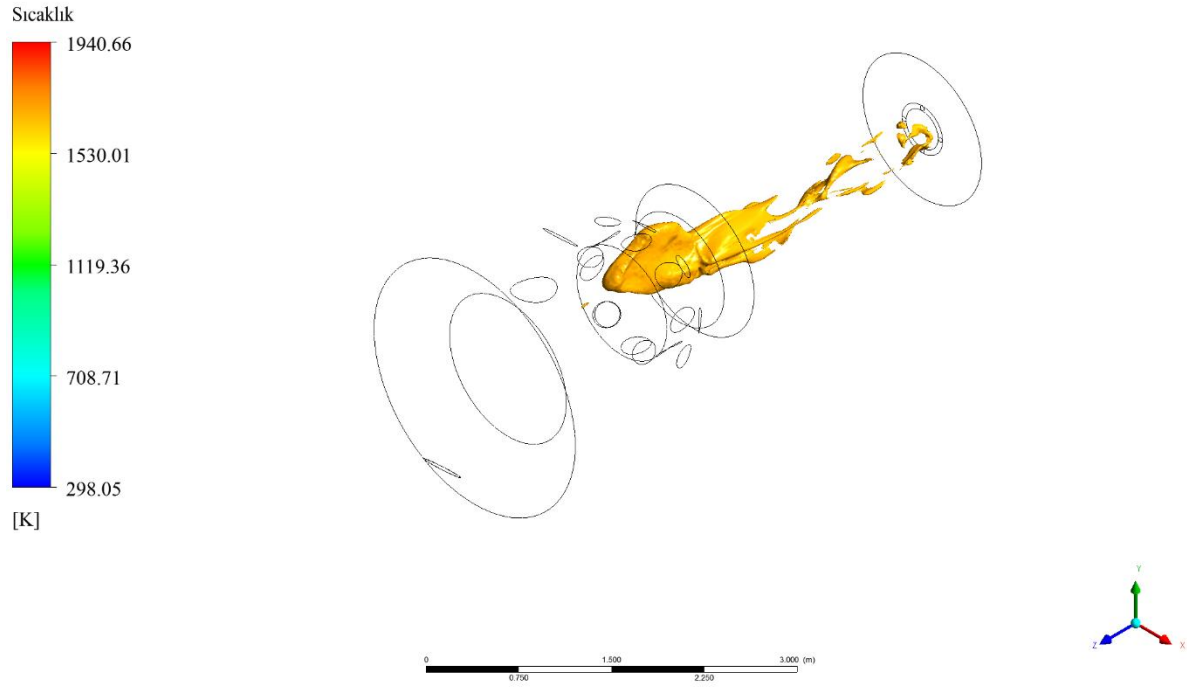
Şekil 3.11. Mevcut çalışma koşullarındaki döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı

Döner fırının güncel çalışma durumu ile baca gazı geri dönüşümünün durdurulduğu ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durum olmak üzere iki farklı durum söz konusudur. İkinci durum olan baca gazı girişinin durdurulduğu ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durumda elde edilen bulgular aşağıda tartışılmıştır. Şekil 3.12’de, fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı üç boyutlu olarak sunulmuştur. Z-X eksenı boyunca döner fırın içerisinde oluşturulan şeffaf ve yatay levhalar üzerindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. İkinci analizden elde edilen analizler göstermiştir ki, döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 2437.77 K değerine ulaşmıştır.



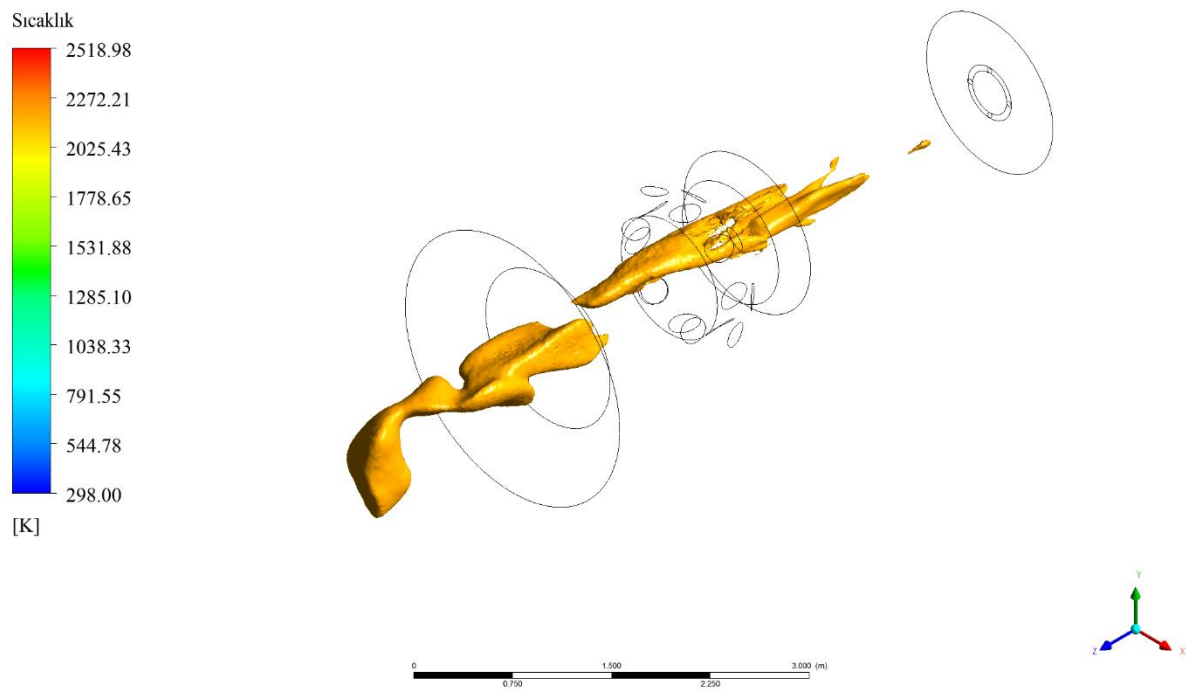
Şekil 3.12. İkinci durum için elde edilen, döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.13’de ise döner fırının ikinci durum için elde edilen 1700 K değerindeki sabit yüzey sıcaklık değeri gösterilmektedir. Baca gazlarının fırına girişi engellendiği takdirde, fırın sıcaklığının arttığı görülmektedir. Baca gazlarının fırın sıcaklığını düşürdüğü ve soğutucu bir etkisinin olduğu ve bir kontrol parametresi olduğu görülmektedir. fırını çalışma sıcaklığında sabit tutmak için gerekenden daha fazla miktarda yakıtın yakılması gerektiği görülmektedir.



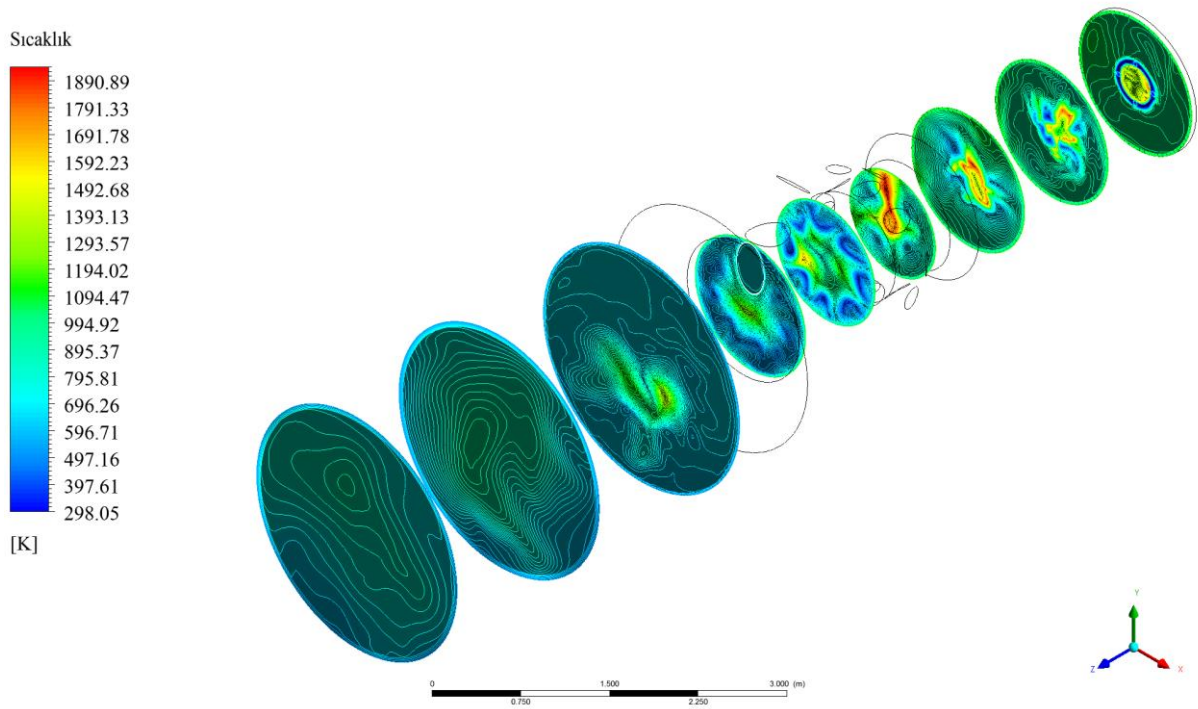
Şekil 3.13 Mevcut çalışma durumu için elde edilen 1700 K değerindeki sabit sıcaklık yüzeyi

Şekil 3.14’de ise döner fırının ikinci durum için elde edilen 2200 K değerindeki sabit yüzey sıcaklık değeri gösterilmektedir.

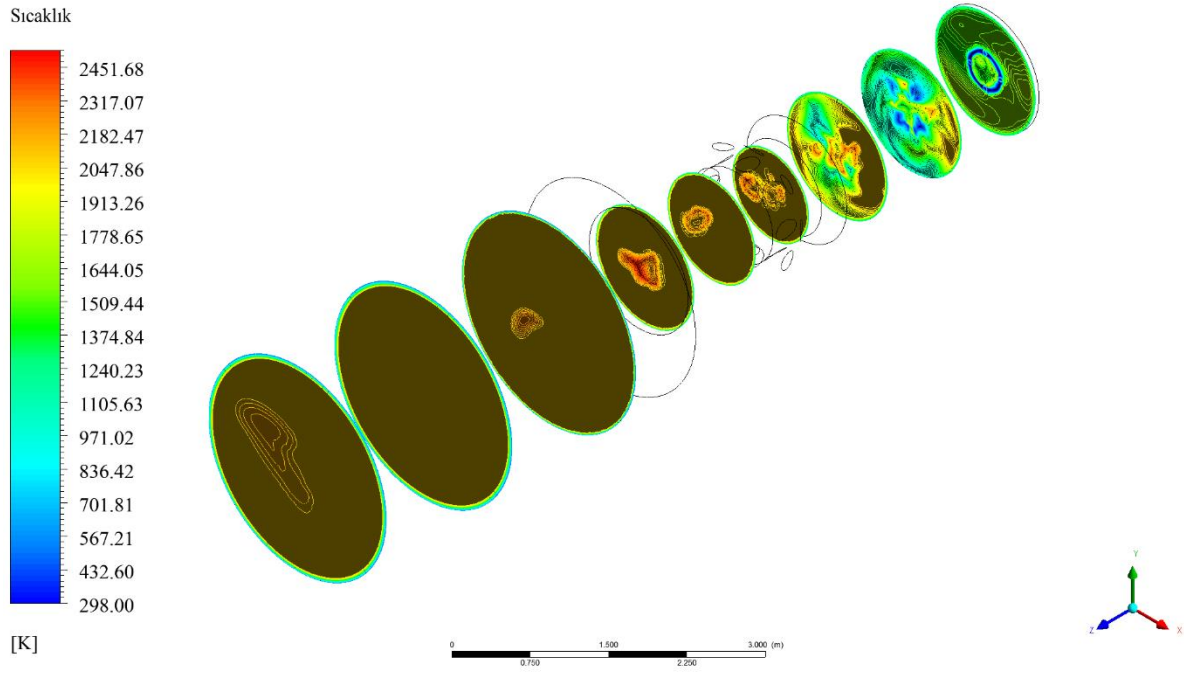


Şekil 3.14. İkinci durum için elde edilen 2200 K değerindeki sabit sıcaklık yüzeyi

Her iki durum için sabit yüzey sıcaklıkları, fırın içerisindeki yüksek sıcaklıkların fırın içerisindeki dağılımı görülmektedir. Söz konusu bu sıcaklıkların fırın cidarlarından uzak, fırın ekseninde ilerlemesi arzu edilmektedir. Böylece fırının çalışma ömrünü ve ısı kayıplarının artması engellenmektedir. Baca gazının kesilmesi ve alçı taşının fırına beslendiği bölümün kaldırılması durumunda, yüksek sıcaklıklardaki gazların fırın ekseninde hareket ettiği görülmektedir. Şekil 3.15’de, döner fırının mevcut çalışma durumu için elde edilen, Y-X eksenini kesen levhalardaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

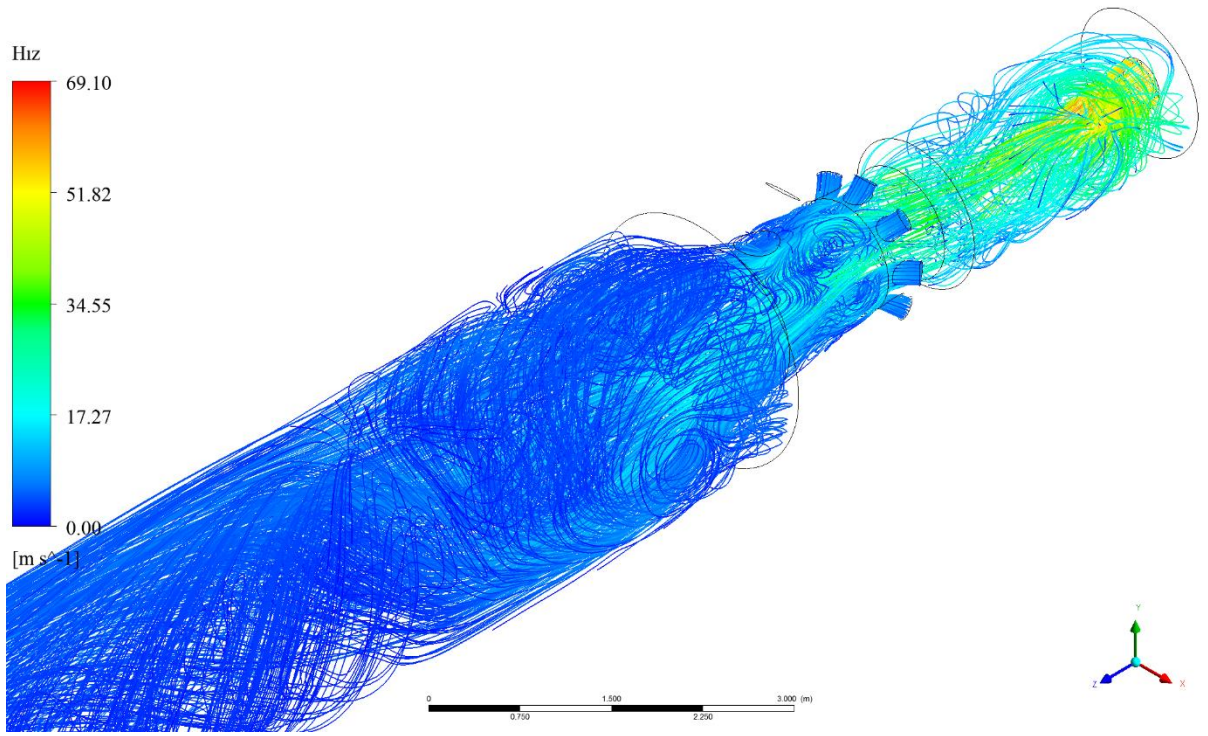


Şekil 3.15. Mevcut çalışma durumu için fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı



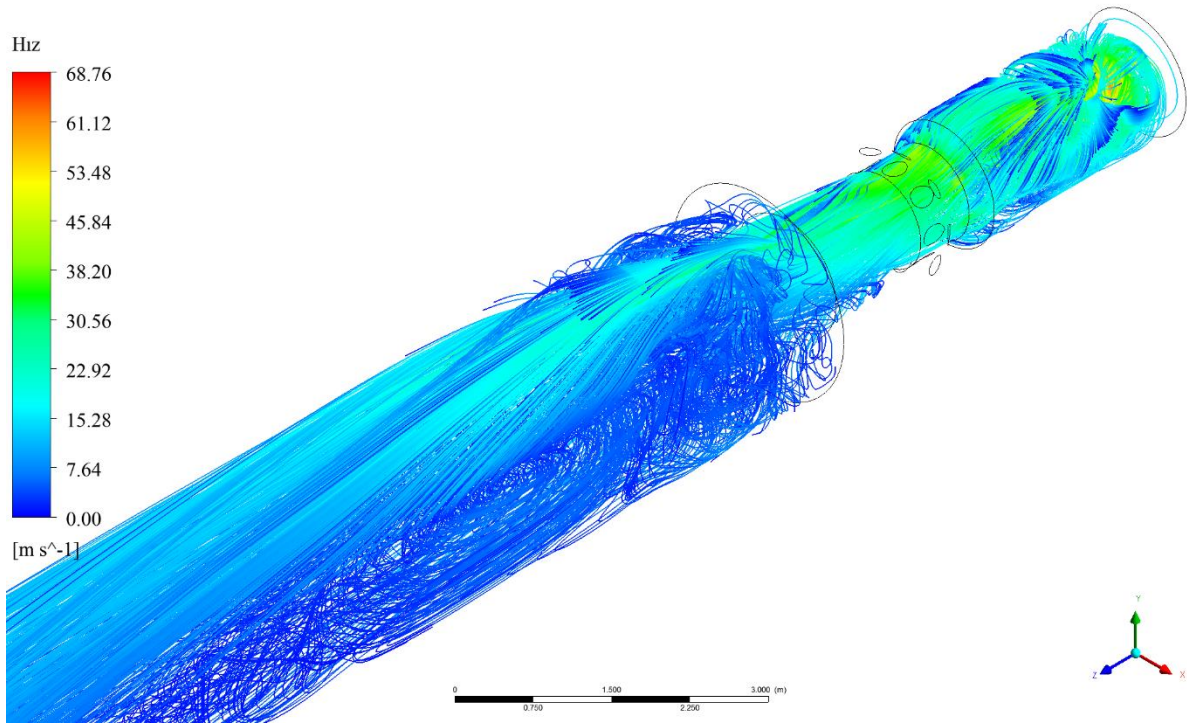
Şekil 3.16. İkinci durum için fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.16’da, Y-X eksenini kesen levhalardaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3.17’de, döner fırının mevcut çalışma durumu için modellenmesinden elde edilen yörünge çizgileri görülmektedir. Söz konusu şekil bir akışkan parçacığının fırın içerisinde izlediği yolu göstermektedir. Fırın içerisindeki en yüksek hız değeri, 69.1 m/s değerine ulaştığı görülmektedir.



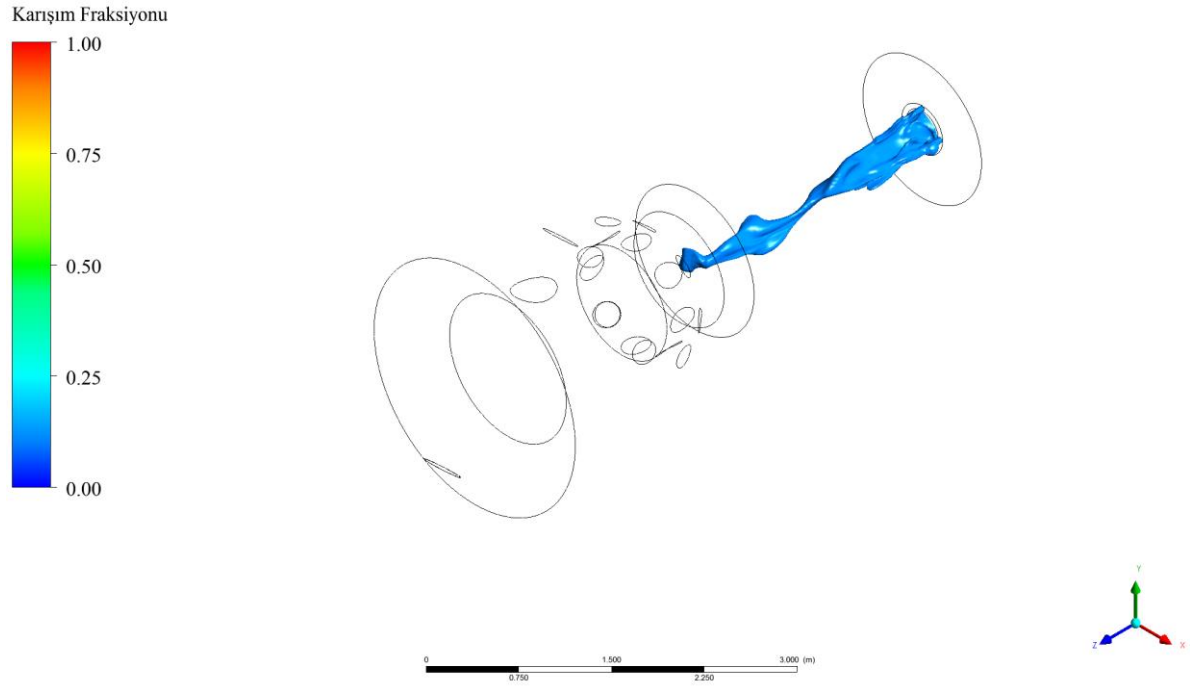
Şekil 3.17. Mevcut çalışma durumu için döner fırın içerisindeki yörünge çizgilerinin gösterilişi

Döner fırının sayısal modellenmesinde göz önüne alınan çalışma durumu, hem baca gazlarının fırına girişinin durdurulması hem de alçı taşının fırına giriş yaptığı hattın fırın içerisine uzanan bölümünün kaldırılması durumudur. Söz konusu bu durum ve senaryo için döner fırın içerisinde elde edilen hız dağılımı Şekil 3.18’de, gösterilmiştir. Fırın içerisindeki en yüksek hız değeri, 68.76 m/s değerine ulaştığı görülmektedir.



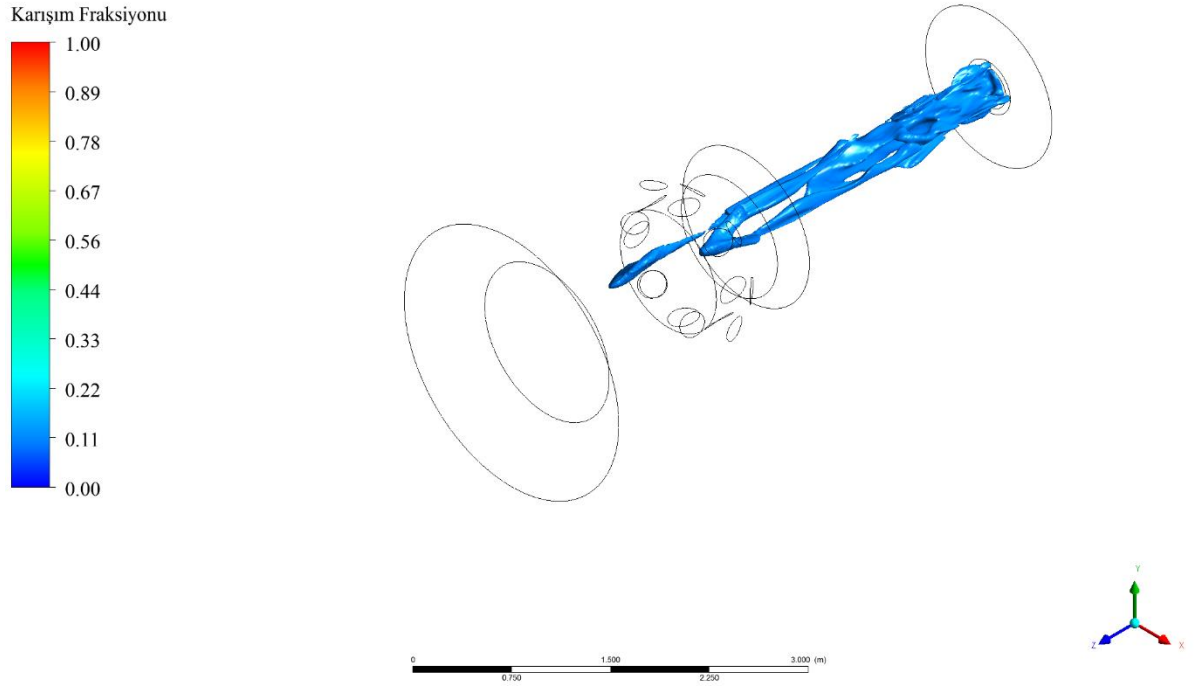
Şekil 3.18. İkinci durum için döner fırın içerisindeki yörünge çizgilerinin gösterilişi

Şekil 3.19’da ise, ANSYS Fluent’ in yanmanın modellenmesinde kullandığı karışım fraksiyonu yöntemine göre, yakıtın fırın içerisindeki dağılımı görülebilmektedir. Yakıtın karışım fraksiyonu 0.1 değerindedir. Bu değer, yakıtın fırın içerisinde nasıl bir dağılım göstermekte olduğunu belirtmektedir.



Şekil 3.19. Mevcut çalışma durumu için yakıtın 0.1 değerindeki karışım fraksiyonu

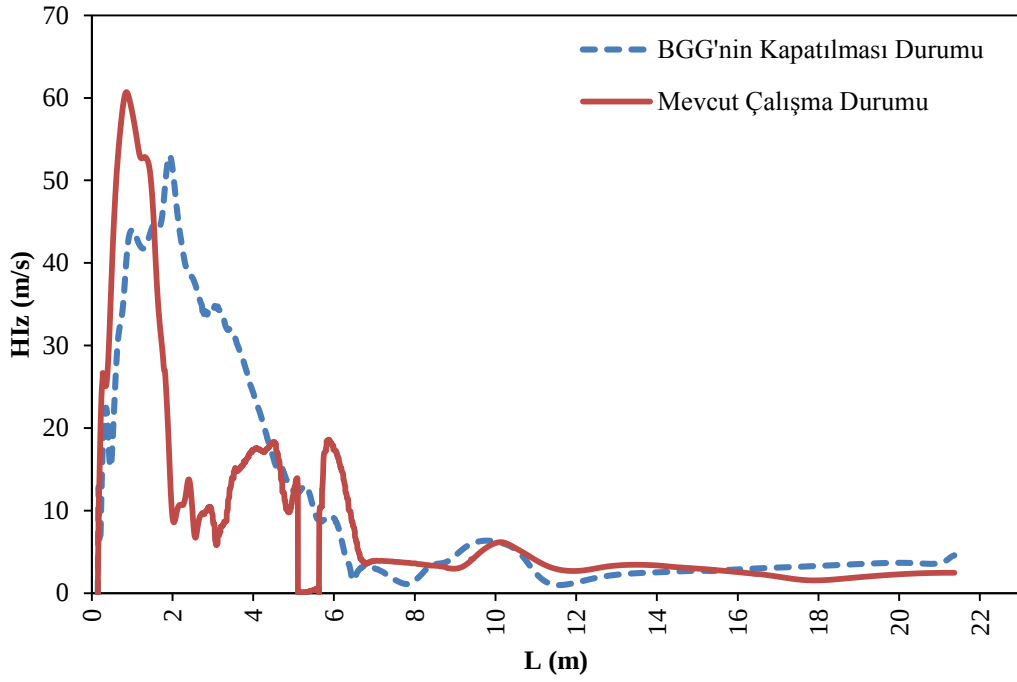
Şekil 3.20’de ise, yakıtın fırın içerisindeki dağılımı görülebilmektedir.



Şekil 3.20. İkinci durum için yakıtın 0.1 değerindeki karışım fraksiyonu

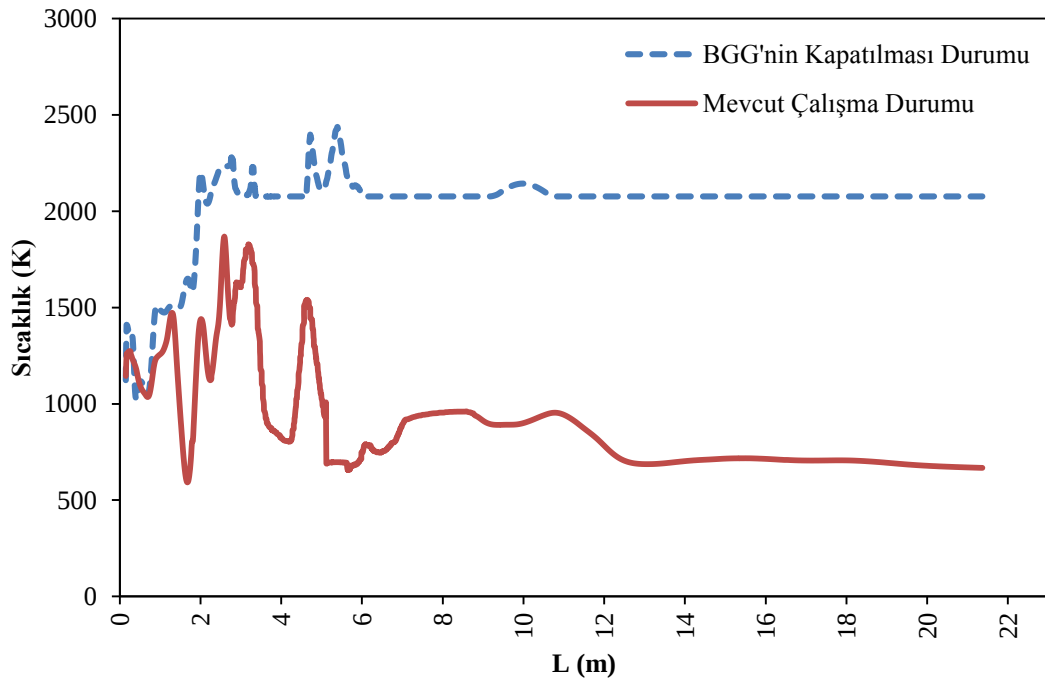
Döner fırının mevcut çalışma şartları ile baca gazı geri dönüşümünün kapatıldığı ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durumlar için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonu durumu 0.75, 0.50 ve 0.25 için elde edilen durumlar, Ek Şekil 1.1, 1.2, 1.3 ve 1.4, 1.5, 1.6'da paylaşılmıştır.

Farklı amaçlar için kullanılan döner fırınların HAD modellenmesinde fırın eksenı boyunca oluşan farklı parametrelerin incelendiğı görölmektedir [112,113,114]. Tez kapsamında oluşturulan döner fırının HAD analizlerinden elde edilen veriler, aynı perspektifte incelenmiştir. Döner fırının mevcut çalışma durumu ve ikinci durum olan baca gazı geri dönüşümünün kesilmesi ve de alçı taşının giriş yaptığı bölümün kaldırılması durumlarında, döner fırın eksenı boyunca değışkenlik gösteren parametrelerin grafikleri elde edilmiştir. Şekil 3.21'de, fırın eksenı boyunca, fırın içerisindeki gazların hız dağılımları gösterilmiştir. Grafiklerde Baca Gazı Geri Dönüşümü (BGG) olarak kısaltılmıştır.



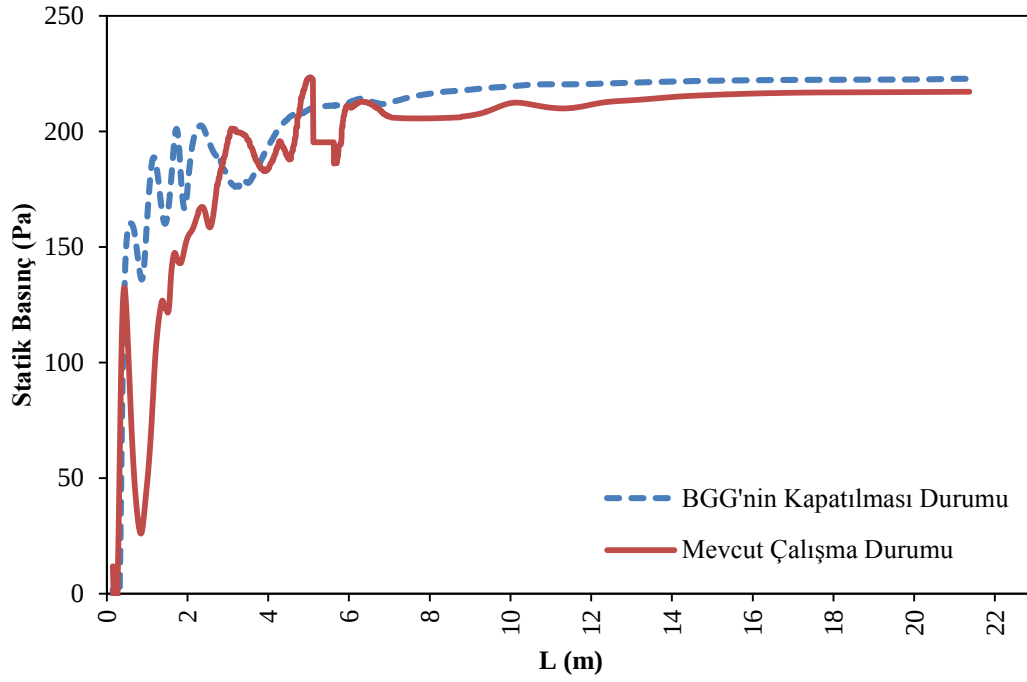
Şekil 3.21. Döner fırın eksenı boyunca gazların hız değışimi

Döner fırının HAD modellemesindeki en önemli parametrelerden biri de sıcaklık değışimidir. Şekil 3.22’de mevcut ve ikinci durumun HAD modellemesinden elde edilen sıcaklık değışimi gösterilmiştir.



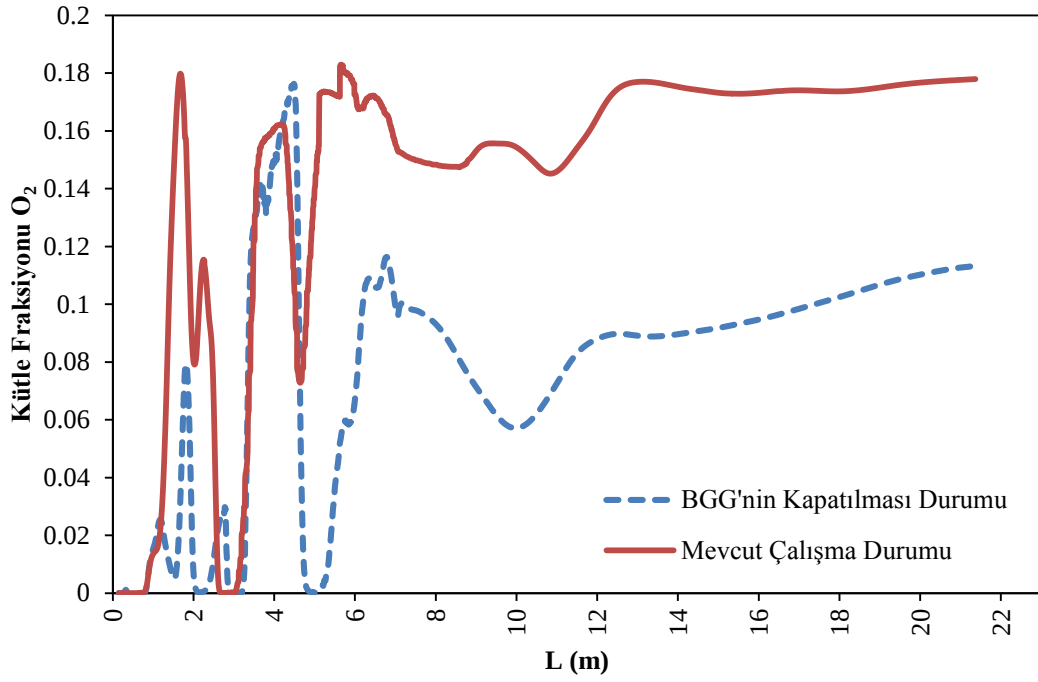
Şekil 3.22. Döner fırın eksenı boyunca gazların sıcaklık değışimi

Şekil 3.23’de, fırın eksenı boyunca değışkenlık gösteren statik basınç parametresinin değışimi gösterilmiştir.



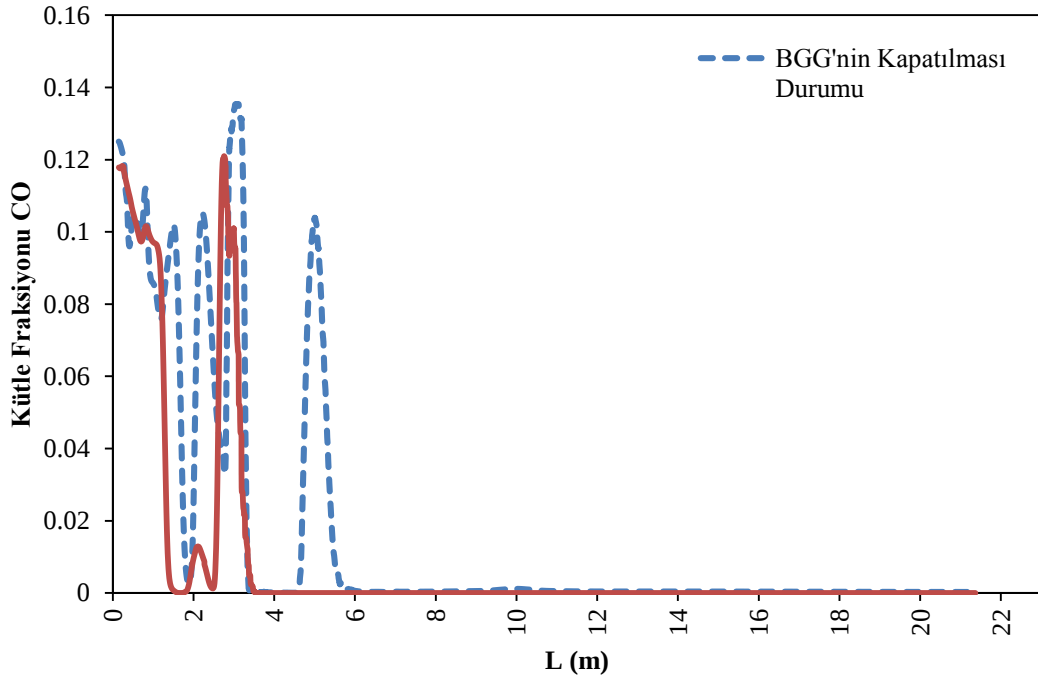
Şekil 3.23. Döner fırın eksenı boyunca gazların statik basınç değışimi

Daha önce de belirtildiği gibi yakma havasının fırına gerekenden fazla miktarlarda gönderildiği görölmektedir. Söz konusu bu durum, döner fırının her iki çalışma durumu için elde edilen grafik ile gösterilmiştir. Şekil 2.24’de fırın eksenı boyunca, oksijenin kütle fraksiyonunun değışimi gösterilmiştir.



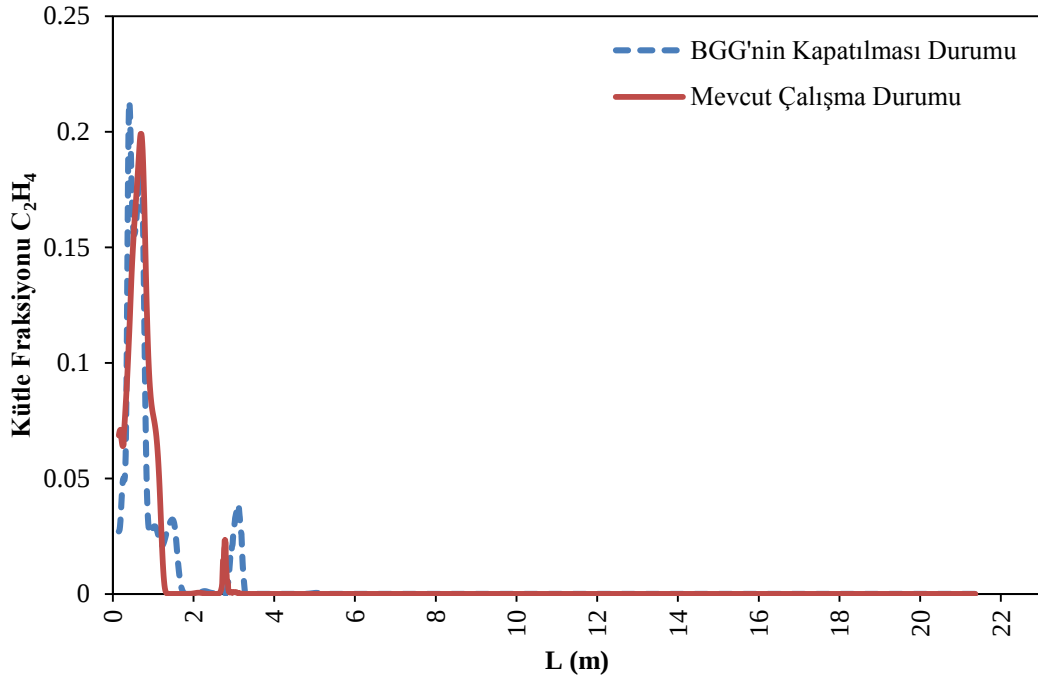
Şekil 3.24. Fırın eksenı boyunca oksijenin kütle fraksiyonu dağılımı

Şekil 3.25’de, karbon monoksit kütle fraksiyonunun döner fırın eksenı boyunca göstermiş olduğu değışim gösterilmiştir.



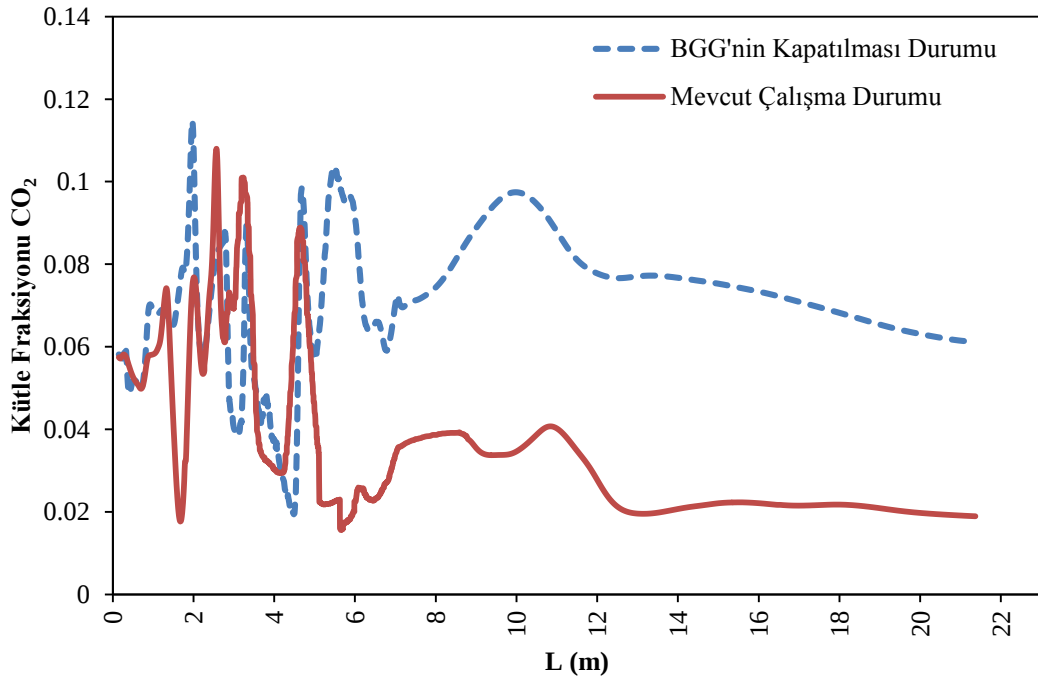
Şekil 3.25. Fırın eksenı boyunca karbon monoksit kütle fraksiyonu dağılımı

Şekil 3.26’da, döner fırının mevcut ve ikinci durumu için elde edilen ve fırın eksenı boyunca meydana gelen metan dağılımı karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.26. Fırın eksenı boyunca metan kütle fraksiyonu dağılımı

Şekil 3.27’de, döner fırın içerisindeki karbon dioksitin kütle fraksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Fırın eksenı boyunca karbon dioksit kütle fraksiyonu dağılımı

Tez kapsamında göz önüne alınan perlit patlatma ve döner fırın proseslerinin enerji, ekserji ve eksergoekonomi analizleri ve de döner fırın prosesinin HAD modellemesinden elde edilen bulgular tartışılmıştır. Bulguların değerlendirilmesi, yorumlanması ve tartışılması, tezin dördüncü bölümünde verilmiştir.

4. TARTIŞMA

Tez kapsamında incelenen perlit fırınları ve döner fırının enerji, ekserji, eksergoekonomi ve de döner fırının HAD modellemesinden elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde bu bölümde sunulmuştur. Yapılan literatür ve altyapı çalışmaları ile elde edilen bulguların tartışılması bu bölümde gerçekleştirilecektir. Enerji ve ekserji analizlerinden elde edilen bulgular; çevresel sorumluluklar, ekonomik, enerji yönetimi ve ekserji bakımından ele alınacaktır. Daha sonrasında ise göz önüne alınan fırınların eksergoekonomik analizlerinden elde edilen bulgular tartışılacaktır. Son olarak döner fırının sayısal analizinden elde edilen bulgular ele alınacaktır.

4.1. Eski Perlit Fırınının Ekserji Analizlerinden Elde Edilen Sonuçların Çevresel Sorumluluklar Açısından İrdelenmesi

Doğal gazın yakılmasıyla elde edinmek istenen 1.055×10^5 kJ enerji değer için 6.4 kg karbon dioksit CO₂ (iklim değişikliğine neden olmaktadır), 4.7 kg azot oksit NO₂, 0.54 gr hidrokarbon (hava kirliliğine neden olmaktadır), 2 g karbon monoksit CO (toksin madde) açığa çıkmaktadır [90]. Verimsiz enerji tüketimi çevreye ve insan sağlığını etkilemektedir. Enerji tüketicilerinin temiz, sağlıklı ve daha iyi bir gelecek için sorumluluklarını yerine getirmeleri gerekmektedir. Bu bakış açısı ile çevresel sorumluluklar için uygun bir enerji yönetimini benimsemeleri gerekmektedir. Genleşmiş perlit üretiminde, gerekli olan enerjiden daha fazla miktarda enerji tüketilmektedir. Eski perlit fırınının, teknolojik gelişimlerden yoksun ve kötü tasarımı neticesinde enerji tüketimi yüksektir. Benzer fırınları kullanan perlit üreticilerinin, analizlerden elde edilen verileri göz önüne almaları gerekmektedir. Eski perlit fırınının analizlerinden elde edilen sonuçlar, çevresel sorumluluklar çerçevesinde değerlendirildiği zaman, sistemin çevre dostu bir süreç gerçekleştirmesi için verimsiz çalışma koşullarının iyileştirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

4.2. Eski Perlit Fırının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Birçok ülke, enerji kaynakları bakımından zengin olan ülkelere enerji ithal etmektedir. İthal edilen enerjinin verimli bir şekilde değerlendirilmesi, enerji kaynakları bakımından yetersiz olan ülkelerin gelişimine ve refah seviyesine katkıda bulunacaktır.

Eski perlit fırınının enerji kaybının % 85'inin engellenmesi durumunda 400 kW değerindeki enerji kayıplarının önüne geçilebilecektir. Eşitlik [2.37]'deki $\dot{m}_{k,DG}$ değeri, 400 kW enerjiyi verimliliğine denk gelen doğal gazın kütsel debisini ifade etmektedir. $\dot{m}_{k,DG}$ değeri, 8.88×10^{-3} kg/s olarak hesaplanmıştır. Doğal gaz m^3 cinsinden faturalandırılmaktadır. Hesaplamalar için doğal gazın yoğunluğu $0.717 m^3/kg$ olarak belirlenmiştir. Enerji verimliliğine denk geldiği doğal gaz miktarının hacimsel debi karşılığı $6.37 \times 10^{-3} m^3/s$ olarak hesaplanmıştır. Fırın günde 16 saat çalıştığına göre, günlük elde edilecek yakıt verimliliği $367.10 m^3$ iken, aylık olarak bu değer $11013.12 m^3$ 'dür. Ön görülen bu enerji ve yakıt verimliliğın parasal karşılığı ise günlük 363.20 \$ iken aylık 10,896.37 \$'dır. Eski perlit fırınına alternatif olarak düşünölecek olan fırının maliyeti 120,000.00 \$'dır. Şirket yönetiminin, eski perlit fırınına, alternatif olarak belirlenecek ve mevcut fırının enerji kayıplarını % 85 oranında engelleyecek bir perlit fırını, 11 aylık kısa bir süre içerisinde, maliyetini karşılamaktadır. Fırınının yeni ve uygun tasarım parametrelerine sahip bir fırın ile değıştirilmesi durumunda dahi, söz konusu yatırımı 11 aydan daha kısa bir süre içerisinde geri ödeyeceğı ön görölmüştür. Analizleri gerçekleştirilen işletmenin sürdürülebilir bir üretim gerçekleştirmesi için daha verimli bir enerji tüketim politikası benimsemelidir. Diğer perlit üreten firmalar ile rekabet edebilmesi açısından da önemlidir. Her ne kadar çok özel bir endüstriyel alan göz önüne alınmış olsa da, bölgesel ve küresel ekonomi için de enerji tüketiminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Uygun tasarım ve modern metotların benimsenerek elde edilecek bir perlit fırını, üretim maliyetlerini azaltacaktır.

4.3. Yeni Perlit Fırınının Analizlerinden Elde Edilen Sonuçların Çevresel Sorumluluklar Açısından İrdelenmesi

Verimsiz ve gereksiz enerji tüketimi, çevre şartlarını kötü bir şekilde etkilemesinden dolayı, doğrudan yaşamı tehdit etmektedir. Bu durumu engellemeye yönelik olarak, birçok önlem ve girişimler mevcuttur. Yoğun enerji tüketen sektörler, çevresel sorumluluklar için enerji yönetimi kavramını göz önüne almalıdırlar. Perlit üreticileri, genişmiş perlitin elde edilmesinde gereksiz bir enerji tüketimi gerçekleştirmektedirler. Bunun nedeni, kötü ve verimsiz tasarım parametrelerine sahip fırınların, hali hazırda kullanılmasından dolayıdır [101]. Yeni perlit fırını, çevresel sorumluluklar açısından değeriendirildiğı zaman, sistemin yenilenmesi veya geliştirilmesi ile daha çevreci bir sürecin elde edilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, verimsiz çalışma şartları, yanmamış hidrokarbon ve karbondioksit salınımına neden olmaktadır. Havayı kirleten parametreler, gaz ve katı parçacıklar halinde olmaktadır. Genellikle gaz fazındaki havayı kirleten maddeler, karbon monoksit, sülfür dioksit, nitrojen oksit ve ozondur. Organik bileşikler, metaller, aerosoller, mineral içeren ve birçok çeşide sahip olan bileşikler, havayı kirleten parçacık fazındaki maddelere örnek olarak gösterilebilir [101]. Analizlerden elde edilen sonuçlardan biri de, baca gazlarında yanmamış hidrokarbonların olmasıdır. Hidrokarbonların temel karakteristikleri, fotokimyasal duman oluşturan bileşenler (metan, etilen, asetilen gibi), parçacık ya da gaz fazındaki organik bileşenlerdir. Atmosferi kirleten hidrokarbonların temel kaynağı, karbon içeren maddeler ve yakıtların tamamlanamayan yanmasından dolayıdır. Hidrokarbonların sağlığa olan etkileri, akut maruz kalma durumunda göz, burun ve boğaz tahrişine, kronik olarak maruz kalma durumunda ise kansere neden olmaktadır [118].

Yeni perlit fırınına hava fazlalık katsayısı ayarlandığı zaman, aylık atık metan miktarı olan 3456 kg, çevreye atılması engellenebilir. Ayrıca, yanmanın kötü olmasından dolayı da, oluşan karbon dioksit miktarı da azaltılabilir. Böylece, çevre dostu bir perlit üretiminin gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

4.4. Yeni Perlit Fırının Ekonomik Açidan Değerlendirilmesi

Verimsiz çalışan sistemler, gelişmekte olan ülkelerin önündeki en büyük engellerden biridir. Diğer ülkelerden enerji ithal eden ve gelişmekte olan ülkeler, yasal düzenlemeler ile verimsiz çalışma şartlarına sahip olan sistemlerin geliştirilmesine yönelik teşviklerin ve düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Enerji bakımından yetersiz kaynaklara sahip olan ülkeler, enerji ihtiyaçlarını diğer ülkelerden sağlamaktadırlar. Enerjinin verimli kullanımı, enerji ithal eden ülkelerin refah düzeyinin artmasına katkıda bulunacaktır. Yeni perlit fırınının analizlerinden elde edilen sonuçlar, verimsiz çalışma koşullarına sahip endüstriyel fırınlar için ekonomik açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir. Analizlerde, kontrol hacim olarak seçilen yeni perlit fırınının dış yüzeyinden meydana gelen toplam enerji kaybı, 416.999 kW olarak hesaplanmıştır. Bu enerji kaybına denk gelen doğal gaz miktarı, Eşitlik [2.53] ile hesaplanmıştır. Toplam enerji kaybı değerini elde etmek için harcanması gereken doğal gazın hacimsel debisi $0.0116 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Hacimsel debinin göz önüne alınmasının nedeni ise doğal gaz tüketiminin hacimsel debi üzerinden değerlendirilmesidir.

Yeni perlit fırını günde sekiz saat çalıştırılmakta ve 1 m³ doğal gazın fiyatı 0.396 \$'dır. Doğal gazın birim fiyatı, 2013 için göz önüne alınmıştır. Fırınlara eksergoekonomi analizlerinde, daha detaylı bir ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Tablo 4.1'de yanmayan hidrokarbonların ve enerji kaybına denk gelen doğal gaz miktarının, kütleli, hacimsel debisi ve bu değerlerin parasal karşılıkları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Yanmamış hidrokarbonların ve kayıp enerjiye denk gelen doğal gaz miktarının hacimsel, kütleli ve parasal değerleri

Tanım	Miktar
Kayıp doğal gazın kütleli debisi	7,663.68 kg/ay
Kayıp doğal gazın hacimsel ve parasal değeri	10,022.4 m ³ /ay 3,968.87 \$/ay
Yanmayan hidrokarbonların kütleli debisi	3,456 kg/ay
Yanmayan hidrokarbonların parasal ve hacimsel değeri	5,308.75 m ³ /ay 2,102.26 \$/ay
Toplam	11,119.68 kg/ay 15,331.15 m ³ /ay 6,071.13 \$/ay

Söz konusu tesiste bulunan perlit genişletme sisteminin, sürdürülebilir bir üretim gerçekleştirmesi için daha verimli bir şekilde çalıştırılması gerekmektedir. Genleşmiş perlit üretimi gerçekleştiren firmaların rekabet edebilmesi için enerji maliyetlerini azaltması gerekmektedir.

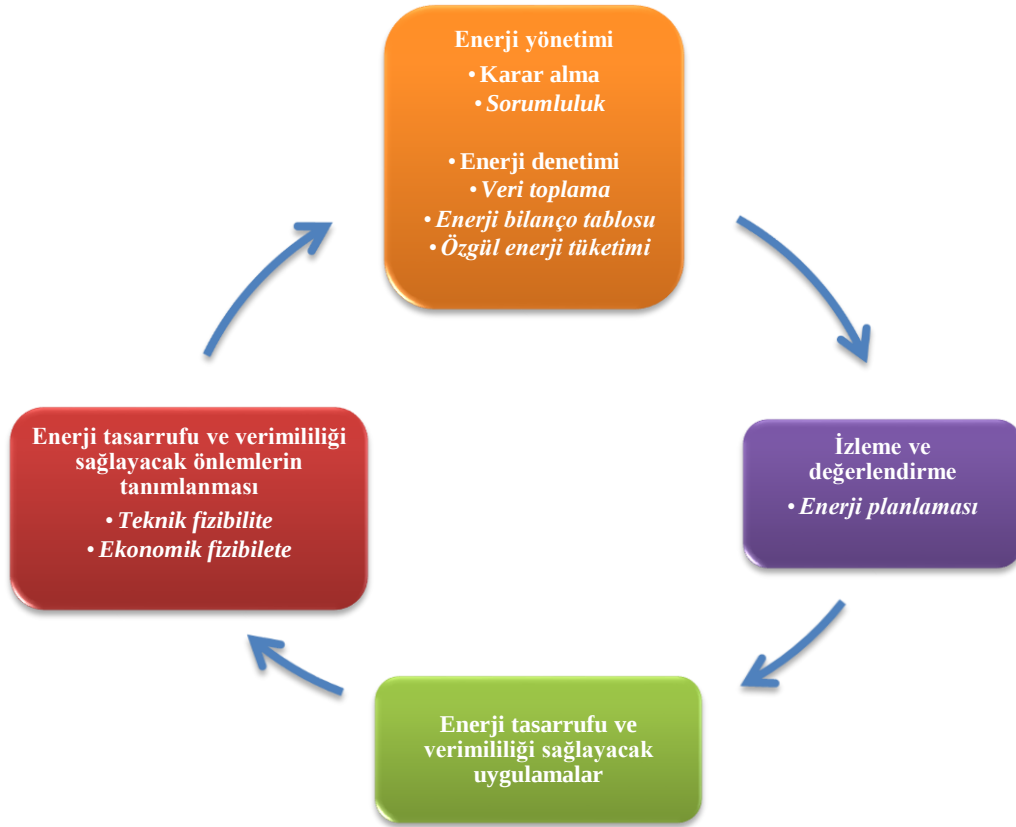
Modern metotlar, yeni teknolojiler ve daha iyi tasarıma sahip fırınlar, birim üretim maliyetini azaltmak için kullanılmalıdır. Daha öncede belirtildiği gibi yeni perlit fırınından meydana gelen enerji kayıplarının yüksek olduğu vurgulanmıştı. Yeni perlit fırınına daha iyi bir yalıtım yapıldığı takdirde, perlit üreticisi firmanın daha fazla ürünü üretmek ya da kayıp enerji miktarını azaltabilecektir. Yeni perlit fırınından meydana gelen enerji kayıplarının % 85'i önlenildiği takdirde, 354.44 kW değerindeki enerji kaybı engellenebilir. Bu varsayım, tam yanma varsayımı ile yapılmaktadır. Kayıp enerjinin % 85'i, engellendiği takdirde, doğal gaz miktarı açısından 354.44 kW'ın denk geldiği değer, 8519.04 m³/Ay'dır. Yakıt hava oranının iyileştirilmesi halinde ise 5308.75 m³/Ay değerinde bir yakıt verimliliği sağlanabilecektir. Bu varsayımların ve öngörülerin aylık olarak göz önüne alındığı vurgulanmalıdır. Perlit üretimi arz talep çerçevesinde değişkenlik gösterebilmektedir.

4.5. Perlit Üretiminin Enerji Yönetimi Açısından Değerlendirilmesi

Yeni perlit fırınının ekserji ve enerji verimi, mevcut fırına kojenerasyon sistemlerine benzer uygulamaların değerlendirilmesi ile de arttırılabilir. Yeni perlit fırını ve benzer sistemlerin verimsiz çalışma koşulları altında çalışması, daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu durum, elde edilen sonuçların, enerji yönetimi, ekonomik ve çevresel faktörler açısından değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Eski perlit fırınının enerji ve ekserji verimi ve de elde edilen diğer analiz sonuçları farklı açılardan değerlendirilmiştir. Perlit üreticileri perlit genişletme fırınının tasarımında rol oynamamaktadır. Fakat perlit sisteminin çevresel sorumlulukların bilincinde, ekonomik ve sürdürülebilir bir üretimin gerçekleştirilmesinde ve enerjiyi verimli bir şekilde tüketmek konularından sorumludur. Eski perlit fırınının analizlerinden elde edilen sonuçlar, söz konusu tesisin enerji yönetimi açısından yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Aynı bakış açısı ile perlit fırını üreticisi değerlendirildiği zaman, teknik açıdan yetersiz kaldığı görülmektedir. Her iki sektörün teknik kapasitesi yüksek çalışanların istihdamı konusunda, üzerlerine düşen sorumlulukları yerine getirmelidirler. Enerji yönetiminde önemli rolleri olacak bu çalışanların şirket yönetim yapısındaki konumları ve işbirliği ile birlikte, gelişen teknoloji ve modern metotları öğrenerek, söz konusu sistemlerin enerjiyi daha verimli bir şekilde tüketmesine olanak sağlayacaktır.

Perlit üreticileri, perlit genişletme fırınlarını üretmemektedir. Fakat perlit fırınının çalıştırılması ve işletilmesi sorumluluğu kendilerine aittir. Elde edilen sonuçlar, perlit üreticisi firmanın enerji yönetimi açısından yetersiz olduğunu göstermektedir. Perlit üreticisi olan firmanın, elde edilen sonuçlar açısından değerlendirildiği zaman, teknik açıdan yetersiz olduğu söylenebilir [102]. Küçük işletmeler benzer problemlere sahiptir. Bu problemler, finansal problemler, tecrübe eksikliği ve enerji yönetim kavramı içerisinde yer alan temel prensiplerin eksikliği olarak sıralanabilir. Literatürde, farklı endüstriyel alanlar için farklı enerji yönetim programları hakkında çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar, uygun enerji yönetimi programının uygulanması açısından çok önemlidir. Orta ölçekli işletmeler için ön görülen enerji yönetim programı, Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Enerji yönetimi programının yapısı [119]

Şekil 4.1’de gösterilen enerji yönetim yapısı, perlit ve alçı üreticileri için uygun olan enerji yönetim şemalarından biridir. Elde edilen sonuçlar, yeni perlit fırının teknik ve ekonomik fizibilite çalışmalarının yetersiz olduğunu göstermektedir.

İşletmelerin benzer durumlar ile karşılaşması ve teknik açıdan yetersiz kalmaları durumunda, farklı mühendislik firmalarından ve akademik danışmanlık alma tercihlerinin olduğunun, farkındalığında olmalıdır.

4.6. Döner Fırının Ekserji Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

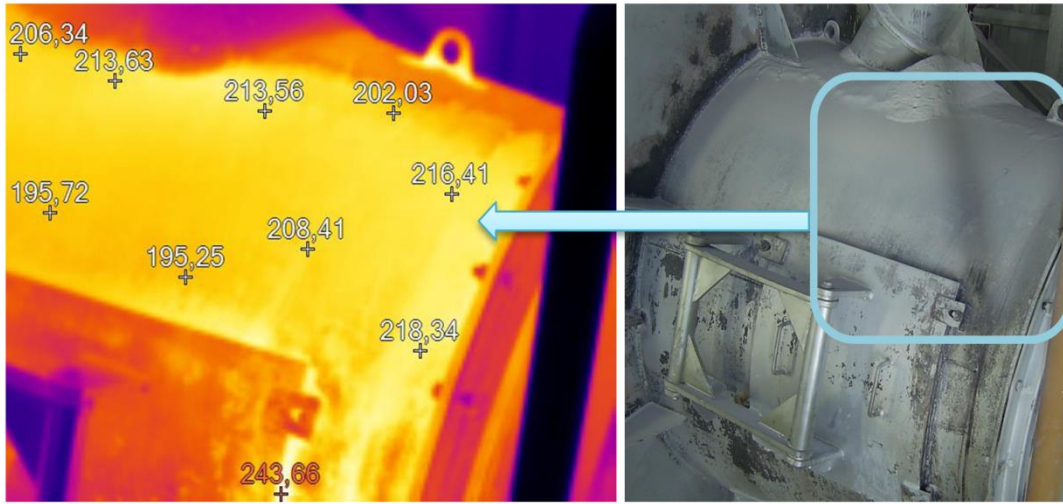
Alçı üretimi için kullanılan döner fırınların enerji ve ekserji analizlerine, ayrıntılı olarak yapılan literatür araştırmasında rastlanmamıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçların, alçı üretiminde kullanılan diğer bir döner fırından elde edilen sonuçlar ile birebir karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Döner fırınının enerji ve ekserji analizinden elde edilen sonuçlar, farklı amaçlar için kullanılan diğer döner fırınlar ile karşılaştırılabilir. Döner fırınlar, zararlı maddelerin yok edilmesinde, atıkların geri dönüşümünde, farklı soğutma uygulamalarında, eritme, kurutma ve pişirme gibi birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Farklı endüstriyel alanlarda kullanılan ve alçı üretiminde kullanılan döner fırının enerji ve ekserji analizlerinin karşılaştırılması, Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı amaçlar için kullanılan döner fırınların enerji ve ekserji verimleri [128]

Yazarlar	Fırını kullanan endüstri ve kullanım amacı	Enerji verimi (%)	Ekserji verimi (%)
Farag [26]	Çimento sektörü, klinker üretimi	40	25.7
Yılmazoglu et al. [8]	Kurutma uygulaması, kömürün kurutulması	-	17
Çamdali et al. [10]	Çimento sektörü, klinker üretimi	97	64.4
Utlı et al. [5]	Çimento sektörü, farin üretimi	84.3	25.2
Engin et al. [27]	Çimento sektörü, klinker üretimi	48.7	-
Peinado et al. [4]	Asfalt sektörü, sıcak asfalt üretimi	89	18
Kandilci et al. [28]	Çimento sektörü, farin üretimi	69	11
Mevcut çalışma	Alçı sektörü, alçı üretimi	69	16

Alçı sektöründe kullanılan döner fırınlarda yakıt olarak doğal gaz kullanılmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi alçının renk kalitesinden dolayı, yakıt olarak doğal gaz tercih edilmektedir. Yanma verimi yüksek olan yakıtların kullanılması, enerji yönetimi açısından yüksek sorumluluklar gerektirmektedir. Alçı üretimi için kullanılan döner fırının diğer fırınlar ile karşılaştırıldığı zaman, farklı amaçlar için kullanılan diğer fırınların enerji ve ekserji verimlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji ve ekserji kayıplarının değerlendirilmesi, enerji ve ekserji veriminin neden diğer fırınlara nazaran düşük olduğunu açıklayabilir. Döner fırında meydana gelen enerji kayıpları, fırına giren toplam enerjinin % 30’nu oluşturmaktadır. Döner fırının bazı bileşenlerinin yalıtım açısından yetersiz olduğu görülmektedir. Örneğin, döner fırının yanma odasının son bölümü olan ve fırın bakım kapağının da bulunduğu bölümün termal kamera ile elde edilmiş fotoğrafı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Yanma odasının son kısmında yer alan bakım kapağı bölümünün yüzey sıcaklık dağılımı [128]

Kontrol hacim olarak seçilen döner fırının yüzeyinden gerçekleşen ekserji kayıpları ise fırına giren toplam ekserjinin % 16'sını oluşturmaktadır. Döner fırını bir bütün olarak ele aldığımız zaman, fırının dış yüzeyinin sıcaklık dağılımı 50 ile 260 °C arasında değiştiği görülmektedir. Yalıtım açısından yetersiz olan bu bölümlerin yalıtımı yapıldığı takdirde, enerji ve ekserji verimi arttırılabilir ve enerji verimliliği sağlanabilir.

Fırının kütle dengesinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiği zaman, baca gazlarının % 28.78'ni su buharının oluşturduğunu göstermektedir. Filtre bölümünden geçmemiş baca gazlarının içerisinde alçı parçacıkları bulunmaktadır. Filtre döner fırın ve bacadan oluşan alçı üretim ünitesini bir bütün olarak göz önüne aldığımız zaman, ön ısıtma uygulaması için kullanılacak ısı değiştirgecinin en uygun yeri, enerji ve ekserji analizleri ile belirlenebilir. Döner fırına giren parametreler olan alçı taşı, yanma havası ve doğal gaza ön ısıtma uygulaması yapılmamaktadır. Söz konusu bu parametreler referans çevre şartlarında fırına girmektedir. Isı geri dönüşümü birçok mühendislik uygulamasında ön ısıtma ile gerçekleştirilmektedir. Sistemde baca gazları, bir ısı değiştirgeci vasıtasıyla, ön ısıtma uygulaması için kullanılabilir.

Fırından çıkan baca gazlarının enerjisi, fırına giren toplam enerjinin % 46'sını oluşturmaktadır. Baca gazlarının bünyesinde bulundurduğu enerji miktarı 5947.15 kW'dır. Söz konusu bu enerji ile fırına giren parametrelere ön ısıtma uygulanabilir. Ön ısıtma uygulamasının yatırım maliyeti yüksek olabilir. Ön ısıtma uygulamasında kullanılması düşünülen ısı değiştirgecinin malzemesi, baca gazlarının % 28.78'i su buharı olması nedeni ile paslanmaz olması gerekmektedir. Ayrıca, alçı taşının ön ısıtmasında, doğrudan baca gazları kullanılamaz.

Baca gazlarındaki su buharının alçı taşı üzerinde yoğunlaşması sonucunda, alçı taşı üzerindeki nem miktarını arttıracaktır. Yakma havasına ön ısıtma uygulandığı takdirde, yakma havasının sıcaklığı 60 °C'den fazla olmamalıdır. Yakma havası, doğal gazın içerisindeki hidrokarbonların oksidasyonu için kullanılmasının yanı sıra, fırın otomasyonu ve kontrolü için kullanılan sensör ve brülörün soğutulması amacı için de kullanılmaktadır. Yakma havasının sıcaklığı 60 °C'den fazla olması durumunda söz konusu sensörler zarar görecektir. Bu sensörlerin en yüksek çalışma sıcaklığı 60 °C ile 70 °C arasındadır. Ön ısıtma uygulaması için karşılaşılan birçok soruna rağmen, bu uygulamanın sistemin verimini arttırarak, fırının enerjiyi daha verimli bir şekilde tüketmesine olanak sağlayacaktır. Çimento sektöründeki benzer ve farklı ön ısıtma uygulamaları ile 0.08-0.111 GJ/t enerji verimliliği sağlanmışken, 8.44-9.3 kg-CO₂/t civarında karbondioksit emisyonu azaltılmıştır [116].

Baca gazındaki oksijen oranı, % 10.76 iken, kütleli debisi ise 0.7416 kg/s olarak hesaplanmıştır. Reaksiyona giremeyen oksijen miktarı, fırına giren havanın gerektiğinden fazla olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ise fırına giren yakma havasının, döner fırın boyunca alçı taşının ilerlemesi için bir momentum kaynağı olarak kullanılmaktadır. Kontrol hacmine giren ve çıkan gereksiz maddeler, fırının enerji ve ekserji verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Fazla miktarda yakma havasının fırına gönderilmesindeki bir diğer neden ise fırının çalışma sıcaklığını kontrol etmeye yöneliktir. Gereksiz kütle girişinin fırından çıktığı zaman, referans çevre ortama yüksek miktarda enerji bırakmasına neden olacaktır.

Döner fırında, enerji dönüşümü, momentum transferi, alçı taşının kısmi dehidrasyonundan dolayı meydana gelen buharlaşma, yanma, kütle ve ısı transferi gibi birçok fiziksel ve kimyasal olaylar gerçekleşmektedir. Ekserji yıkımı, söz konusu bu olaylardan etkilenmektedir. Döner fırında meydana gelen ekserji yıkımı 2969.97 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı döner fırına giren ekserjinin % 66'sını oluşturmaktadır. Isı transferi, faz değişimi ve yanma döner fırın içerisinde yoğun olarak meydana gelmektedir. Ekserji yıkımı açısından alınabilecek en önemli önlem ise enerji ve ekserji kayıplarının azaltılmasıdır. Enerji ve ekserji kayıplarının azaltılması, ekserji yıkımını azaltacaktır.

Alçı taşının parçacık boyutu dehidrasyon işlemi için ön önemli parametrelerdendir. Döner fırının döndürülen bölümünde, üç ısı transfer mekanizması gerçekleşmektedir. Döner fırının duvarlarından iletim ile doğrudan ısı transferi, yanma sonu ürünlerinden döner fırın duvarlarına ısı transferi ve yanma sonu ürünlerinden katı fazdaki maddelere gerçekleşen, ışıınım, taşınım ve iletim ile ısı transferi gerçekleşmektedir.

Ayrıca, katı parçacıklar arasında da, iletim ile gerçekleşen bir ısı transferi söz konusudur [120]. Alçı taşı yatay kırıcıda, 10 mm ve daha küçük boyutlar da öğütülmektedir. Eğer alçı taşının parçacık boyutu daha da küçültülebilirse, buharlaştırma, ısı transferi ve kütle transferi geliştirilebilir. Sonuç olarak, enerji tüketimi, parçacık boyutu parametresi ile azaltılabilir.

Analizleri yapılan döner fırınının, çevresel hassasiyetler ve sorumluluklar açısından incelendiği zaman, çevre dostu bir işlemin gerçekleşmesi için verimsiz çalışma koşullarının giderilmesi ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Alçı sektörü, Ülkenin yapı sektörü ile paralel hareket etmesinden dolayı, yoğun bir üretim ve bununla birlikte yoğun bir enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Türkiye'deki alçı sektörü, 2013 de 3.5 milyon ton alçı üretimi için 40223.7 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) enerji tüketimi gerçekleştirmiştir [121]. Yapılan analizlerden anlaşılmaktadır ki, daha fazla alçı tozunun veya daha az enerji tüketimi gerçekleştirilerek aynı miktardaki alçı tozu üretmek mümkündür. Sürdürülebilir bir alçı üretiminin gerçekleşmesi için döner fırında daha verimli bir sürecin gerçekleştirilmesi şarttır. Bu durum, diğer alçı üreticileri ile rekabet edebilmesi açısından da önemlidir. Genel bir bakış açısından değerlendirildiğinde ise bölgesel ve uluslararası ekonomilerin de göz önüne alınması gerekmektedir. Söz konusu döner fırının, birim üretim maliyetini azaltmak için modern metotlar kullanılarak, daha iyi tasarım parametrelerine sahip olması gerekmektedir. İdealist ve teknik kapasitesi yüksek iş gücünün istihdamı ile birlikte, söz konusu hedefler gerçekleştirilebilir.

4.7. Eski ve Yeni Perlit Fırınlarının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması

Her iki fırının şimdiki yatırım maliyetleri karşılaştırıldığı zaman, yeni perlit fırınının yatırım maliyetinin, eski perlit fırınından daha fazla olduğu görülmektedir. Eski perlit fırınına her hangi bir yalıtım uygulaması yapılmadığından dolayı, yeni perlit fırınının yatırım maliyetinden daha düşük bir yatırım maliyetine sahiptir. Bu durum, eski perlit fırınının avantajı olarak değerlendirilmemesi gerekmektedir. Yalıtımın olmamasından dolayı, enerji kayıpları fazla olmakla birlikte, üretim maliyetini arttırmaktadır.

Yeni perlit fırınının kullanım ömrü 20 yıl iken, eski perlit fırınının kullanım ömrü 6.5 yıl olduğu, daha önceden belirtilmişti. Eski perlit fırınının yüksek maliyetlerde üretim gerçekleştirmesinden dolayı, yenisi ile değiştirilmiş ve kullanım ömrünü tamamlayamadan, hurdaya ayrılmıştır.

Bu durum, eski perlit fırınının şimdiki değer faktörünü doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı, eski perlit fırınının şimdiki değer faktörü, yeni perlit fırınının şimdiki değer faktöründen daha yüksektir. Yıllık yatırım maliyetinin hesaplanmasında, her iki fırının kurulum ve kullanım ömürleri, baskın parametrelerdir. Eski perlit fırınının kullanımında 6.5 yıl için 28,368.79 \$ ödenmiştir. Yeni perlit fırınının kullanım ömrü 20 yıl ve bu kullanım ömrü için ödenen maliyet 44,973.54 \$ olmaktadır. Tesisin elindeki imkânlar ile eski perlit fırını geliştirilebilir ve yeni bir perlit fırınına ihtiyaç kalmayabilirdi. Her iki fırının baca gazlarının ekserji maliyetleri göz önüne alındığı zaman, yeni perlit fırınının baca gazı ekserji maliyetinin, eski fırının baca gazlarının neden olduğu ekserji maliyetinden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, fırınların kütle dengesi, enerji ve ekserji hesaplamalarında da belirtildiği gibi yanmamış hidrokarbonlardır. Yeni perlit fırınının kurulumundan sonra, üretici firma tarafından yakıt hava oranı ayarlanmamış olduğu tespit edilmiştir. Yanmayan hidrokarbon, yeni perlit fırınının baca gazı ekserji maliyetini arttırmaktadır. Yakıt hava karışım oranı, yetkili kişi veya kişilerce ayarlanması gerekmektedir. Söz konusu parametre arzu edilen değere ayarlandığı zaman, genişlemiş perlit ve baca gazlarının ekserji maliyeti azaltılabilir. Ayrıca, hava-yakıt oranının iyileştirilmesi, gereksiz maliyetlerin önüne geçecektir. Daha önce de ifade edildiği gibi eski perlit fırını 410.4 kg/h genişlemiş perlit üretmek için 90 kg/h doğal gaz tüketmektedir. Yeni perlit fırını ise 1036.8 kg/h genişlemiş perlit üretmek için 86.4 kg/h doğal gaz tüketmektedir. Ayrıca, eksergoekonomik denge eşitliğindeki diğer parametrelerde, her iki fırın tarafından üretilen genişlemiş perlitin birim ekserji maliyetini ve ekserji maliyetini etkilemektedir. Bulgular bölümünde ifade edildiği gibi eski perlit fırınının eksergoekonomik faktör % 45 iken, yeni perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Eksergoekonomik faktörün yüksek olması durumu, söz konusu sistemin yatırım maliyetinin azaltılmasını önermektedir [98]. Daha önce de ifade edildiği gibi yeni perlit fırınının sermaye maliyeti akışı, eski perlit fırınının sermaye maliyet akışından daha fazladır. Bunun nedeni, yeni perlit fırınının saatlik olarak seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyetinin yüksek olmasıdır. Özellikle, yeni perlit fırınının hammadde maliyetinin, işletme maliyeti üzerindeki etkisi söz konusudur. Eski perlit fırının hammadde maliyeti 57,324.672 \$/yıl iken, yeni perlit fırınının hammadde maliyeti 63,358.848 \$/yıl'dır.

Daha iyi bir şekilde anlaşılması için bir saat içerisinde işlenen hammadde miktarlarının göz önüne alınması gerekmektedir. Eski perlit fırını bir saatte 410.4 kg/h genişlemiş perlit üretiyor iken, yeni perlit fırını 1036.8 kg/h genişlemiş perlit üretimi gerçekleştirmektedir.

Sonuç olarak, yeni perlit fırınının işletme maliyeti, eski fırınının işletme maliyetinden daha fazla olmaktadır. Aynı zamanda, yeni perlit fırını, günde 7 saat çalıştırılıyor iken, eski perlit fırını 16 saat çalıştırıldığı unutulmamalıdır. İki fırın arasındaki hammadde maliyeti, 6034.176 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, yeni perlit fırınının saatlik olarak seviyelendirilmiş sermaye yatırım maliyeti, her iki fırın arasındaki şimdiki değer parametresindeki farklılıktan dolayı, eski perlit fırınından daha yüksektir. Her iki fırının eksergoekonomik analizinde, baca gazları, ekserji kayıpları ve ekserji yıkımının maliyetleri göz önüne alınması gereken parametrelerdir. Bu parametreler, üretim maliyetini göstermektedir. Bu parametrelerin her biri değerlendirildiği zaman, sağlıklı bir durum değerlendirmesi yapılabilir. Yeni perlit fırını için enerji ve ekserji kayıplarının değerleri, baca bölümünde yalıtımın olmaması nedeni ile bir hayli yüksektir. Enerji ve ekserji analizinden elde edilen sonuçlar hatırlandığı zaman, enerji kaybının 416.999 kW iken, ekserji kaybının 281.041 kW'lık değerlerin yüksek miktarlarda enerji ve ekserjinin kayıp olduğu görülmektedir. Aynı durum eski perlit fırını için göz önüne alındığı zaman, kayıpların daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Enerji ve ekserji kayıplarının, yalıtım uygulamaları ile engellenmesi gerektiği, daha önce de vurgulanmıştır. Bu bölümde tekrardan ele alınmasının nedeni, eğer fırınların yalıtımı yapılırsa, önemli miktarlarda yakıt verimliliğinin sağlanacağıdır. Sonuç olarak üretim maliyetlerine olumlu yönde etkisi söz konusudur. Yalıtım seçeneği gibi çevre şartlarında sisteme giren parametrelerin ön ısıtma uygulaması ile fırınların enerji ve ekserji verimleri arttırılabilir. İlave olarak, iyi bir şekilde tasarlanmış bir kontrol stratejisi de fırınların enerji ve ekserji verimleri üzerine olumlu etkileri olacaktır. Yalıtım, iyi bir otomasyon sistemi, enerji yönetimi ve ön ısıtma gibi parametrelerin değerlendirilmesi, her iki fırın için genişmiş perlit, ekserji kayıpları ve ekserji yıkımının maliyet oranları üzerinde pozitif etkisi olacaktır. Gerçek bir yanma işleminde karışım, kimyasal reaksiyon, enerji dönüşümü ve ısı transferi gibi parametreler, gerçek bir yanma işleminde ekserji yıkımına neden olmaktadır [122]. Ekserji yıkımını etkileyen en önemli parametrelerden biri de faz değişimidir. Ekserji yıkımı, sürtünme, faz değişimi, kimyasal reaksiyon, ekserji kayıpları ve ısı transferi gibi fiziksel olaylarda, bir hayli yüksektir. Bu parametrelerin neden olduğu verimsizlikler, üretim maliyetini arttıracaktır [122]. Yanmanın meydana geldiği bir sistemdeki ekserji yıkımının büyük bir miktarı, teknik anlamda kaçınılmazdır.

Bir yanma sürecinin termodinamik performansını geliştirmek için göz önüne alınacak önlemler, önlenemez dış ekserji yıkımı ve önlenemez iç ekserji yıkımına katkı yapan parametrelerin göz önüne alınması gerekmektedir.

Benzer ve farklı endüstriyel fırınlar, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar çerçevesinde değerlendirilebilir. Eski perlit fırını teknik kapasitesi yetersizdir. Bunun nedenleri daha önce de ifade edildiği gibi yalıtım gibi çok önemli parametrelerin, eski perlit fırınında göz önüne alınmamasıdır. Ayrıca, tesisin satın alma bölümünün teknik açıdan yetersizliğini göstermektedir. Tesisin satın alma gibi önemli bölümlerinin, yeni perlit fırınının alımında, birçok değişken ve durumu göz önüne alması gerekmektedir. Teknik şartnamenin ileriye dönük ve elde edilen tecrübeler kapsamında, konusunda uzman veya teknik kapasitesi yüksek firma veya kişiler ile birlikte hazırlanması, ekonomik ve teknik fizibilite çalışmalarının yapılması, detaylı pazar araştırması ve şirketin teknik ve de yönetim bölümleri ile iyi bir iletişimin kurulması gibi durumların değerlendirilmesi gerekmektedir. Enerji ve ekserji analizlerinden elde edilen sonuçlar kapsamında değinilen enerji yönetimi, eksergoekonomik analiz kapsamında da değerlendirilmesi gerekmektedir. İyi bir enerji yönetim stratejisi, verimsiz yatırım ve gereksiz maliyetlerden kaçınılmasına yardımcı olacaktır. Analizden elde edilen bulgular ve tartışmalar, benzer ve farklı endüstriyel fırınlar için de göz önüne alınabilir. Ekserji maliyetleri, birim ekserji maliyetleri gibi parametreler değerlendirildiği zaman, her iki fırın için verimsiz bir yatırımın yapıldığı söylenebilir. Buna örnek olarak, eski fırının kullanım ömrünü tamamlamadan, yeni bir fırınla değiştirilmesi gösterilebilir. Daha önce de değinilen bu parametreler, yakıt maliyetini ve genişmiş perlit maliyetini arttırmaktadır. Baca gazlarının enerji ve ekserjisi doğal gazın, yanma havasının ve ham perlitin ön ısıtmasında, verimi bir şekilde kullanılabilir. Aynı miktarda ürünü daha az maliyet ile üretilebileceği gibi aynı miktarda maliyet ile daha fazla miktarda ürün elde edilebilir. Üstelik ürün kapasitesi ve kalitesinden taviz vermeden söz konusu işlem gerçekleştirilebilir. Perlit geliştirme fırınının üretici firması da elde edilen sonuçlar çerçevesinde değerlendirilebilir. Benzer endüstriyel fırın üreticilerinin, hedef müşteri guruplarının daha az maliyet ile üretim gerçekleştirmesi için ürettikleri fırınların tasarım parametrelerini tekrardan gözden geçirmesi gerekmektedir. İhale usulüne dayanan satın alma işleminin olumsuz yanlarından biri de, en ucuza fiyat veren şirketin değerlendirilmeye alınmasıdır. Bu durum, her iki sektör açısından olumsuzluklar getirmekle beraber, her iki sektörün sorumlulukları çerçevesinde gerçekleşmektedir.

4.8. Döner Fırının Eksergoekonomik Analizinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması

Perlit fırınlarının eksergoekonomik analizinden elde edilen sonuçlar, dikkatli bir şekilde incelendiği takdirde, enerji ve ekserji verimini geliştirecek tüm parametreler, eksergoekonomik analizden elde edilecek maliyet verimliliğine yansımaya olacaktır. Benzer durum, döner fırın için de geçerlidir. Buna ilave olarak, yatırım ve benzer parametrelerin tartışılması daha yararlı olacaktır. Buna örnek olarak, döner fırında kullanılan brülörün hem gaz hem de sıvı yakıtları yakabilen 7.8 MW gücünde bir brülörün tercih edilmesi ele alınabilir. Tesisin kuruluş tarihi olan 2006'dan beri, söz konusu brülörde sıvı her hangi bir yakıt yakılmamıştır. Bu durum sermaye akış maliyetini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Benzer alçı üretim tesisleri incelendiği zaman, daha az maliyeti ve daha basit brülörlerin tercih edildiği görülmektedir. Perlit patlatma fırınında olduğu gibi ekonomik ve teknik fizibilite çalışmalarının yetersizliği göze çarpmaktadır. Sermaye yatırım akışının yüksek olmasını etkileyen en önemli parametrelerden biri de saatlik olarak seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyetlerinin etkisidir. İşletme bakım maliyetlerini etkileyen en önemli parametrenin, tesisin alçı taşının çıkarıldığı yerlerden uzak olmasıdır. Bu durum nakliye masraflarını ciddi bir şekilde artırmaktadır. Yine benzer tesisler göz önüne alındığı takdirde, alçı üretim tesisinin alçı taşının çıkarıldığı ocaklara çok yakın olarak inşa edilmesi söz konusudur. Alçı taşının nakliye masrafları, 265.392 \$/h olarak hesaplanmıştır. Analizleri yapılan tesisin organize bir sanayi bölgesinde kurulmasının avantajları olacaktır. Doğal gaz hattının söz konusu bölgede kullanılabilir olması, bu avantajlardan biri olarak değerlendirilebilir. Alçı taşının çıkarıldığı ocağa yakın inşa edilen tesislerde ise LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) kullanılmaktadır. Alçı taşının nakliyesinden ise LNG'nin nakliyesinin maliyeti daha ucuz olacaktır.

Bulgularda da belirtilen eksergoekonomik faktörün % 55'den daha düşük bir değere sahip olması beklenmektedir. Fakat döner fırının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Eksergoekonomik faktör, arzu edilen değerden çok daha yüksek bir değerdedir. Yanlış yatırım yöntemleri ve tercihler, tesisin kullanım ömrü boyunca üretim maliyetlerini etkileyecektir. Bu durum, ekonomik fizibilite ve eksergoekonomik çalışmalarının çok önemli ve güçlü araçlar olduğunu göstermektedir. Döner fırının eksergoekonomik analizinde, ekserji yıkımının, ekserji kayıplarının, baca gazlarının ve baca gazlarının geri dönüşümünün ekserji maliyetlerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu parametreler, üretim maliyetini doğrudan etkilemektedir. Baca gazlarının tekrardan döner fırına gönderilmesinin amacı, yanmamış hidrokarbonların yakılmasını sağlamaktır.

Alçı üretiminin bir dehidrasyon işlemi olduğu hatırlandığı takdirde, baca gazlarında ciddi miktarlarda su buharının olması söz konusudur. Bu durum enerji ve ekserji analizindeki kütle dengesinde de belirgin bir şekilde görülmektedir. Baca gazlarının geri dönüşümü durdurulduğu takdirde, ekserji maliyetlerini olumlu bir şekilde etkileyecektir. Baca gazlarının geri dönüşümünü sağlayan sistemin durdurulması, geri dönüşüm sisteminde kullanılan ekipmanların elektrik tüketimi değerlendirildiği zaman, sermaye yatırım akışı çerçevesinde de olumlu yönde değişimler olacaktır. Yatırım çerçevesinde değerlendirilen baca gazlarının geri dönüşümünün, gereksiz bir yatırım bileşeni olduğu görülmektedir. Döner fırının döndürülen bölümündeki yalıtımının iyi bir şekilde yapıldığı söylenebilir. Fakat yanma odası bölümündeki yalıtımın yetersiz bir performans sergilemesi, üretim maliyetini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Analizlerdeki ekserji kayıplarının maliyeti 37.4185 \$/h olarak hesaplanmıştır. Perlit fırınlarında olduğu gibi, döner fırına, çevre şartlarında giren parametrelerin ön ısıtma uygulanabilir. Isı geri kazanımında, ön ısıtma uygulamalarının aktif bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Alçı tozu ve baca gazları, ön ısıtma uygulamaları için enerji kaynağı olma potansiyeline sahiptir. Fakat baca gazlarının içerdiği yüksek miktardaki su buharı, önemli problemler yaratmaktadır. Baca gazlarının, ön ısıtma uygulamasında enerji kaynağı olarak değerlendirildiği zaman, temassız bir uygulamanın tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Aynı zamanda, kullanılacak malzemenin paslanmaz olmalıdır. Söz konusu bu durumlar, ön ısıtma uygulamasının yatırım maliyetini yükseltmektedir.

Ön ısıtma ile üretim maliyetini düşürmeye yönelik olarak, alçı tozu ile birlikte fırından çıkan enerji ve ekserjinin yakma havasının ve yakıtın ön ısıtmasında kullanılarak, işletme ve bakım maliyetleri azaltılabilir. Fakat tesis yönetiminin ekonomik ve teknik fizibilite çalışmaları ile planlı bir şekilde ön ısıtma uygulamasını hayata geçirmesi gerektiği de vurgulanmalıdır. Parçacık boyutunun etkileri, ekserji analizinde atıf yapılan parametrelerden bir idi. Literatürde sıklıkla tartışılan parçacık boyutunun etkileri, önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha küçük boyutlardaki parçacıkların, nispeten büyük olanlara kıyasla, ısı transferi, kütle transferi ve momentum açısından birçok avantaja sahip olduğu görülmektedir [123]. Döner fırına beslenen alçı taşının parçacık boyutu, mümkün olduğu sürece küçültülmesi gerekmektedir. İşletme ve bakım maliyetleri, parçacık boyutunun küçültülmesi ile birlikte azalma gösterecektir. Fakat parçacık boyutunun küçültülmesinin temel etkisi, yanma sonucunda oluşan yanma ürünleri ile alçı taşının parçacıkları arasındaki kütle ve ısı transferi üzerinde olacaktır.

Daha az miktarda yakıt veya aynı miktarda yakıt ile daha fazla miktarda alçı tozu üretimi gerçekleştirilebilecektir. Sonuç olarak, parçacık boyutunun yakıt maliyetlerine olan etkisinin olumlu yönde olacağı görülmektedir. Perlit fırınının eksergoekonomik analizlerinin de tartışılan ekserji yıkımı, döner fırın içinde geçerli parametrelerdendir. Perlit fırınlarının otomasyonunda olduğu gibi döner fırının otomasyon sistemi, yeterli bir kontrol ve izleme sağlamaktadır. İleri otomasyon ünitelerinin kullanımı, gereksiz maliyetlerin önüne geçecektir. Kullanılan otomasyon, sadece dört noktadan sıcaklık ölçümü almaktadır. Doğal gaz, baca gazı geri dönüşümü ve yanma havasının debisi, boyutsuz ve de anlaşılması zor değerler ile kontrol edilmektedir. Bu parametrelere ilişkin kütleli veya hacimsel debiler, otomasyon tarafından ölçülememektedir. Klapa sistemi ile kontrol edilen debiler, fırınının işletme ve bakım maliyetlerini arttırmaktadır. Örneğin, yanma havasını döner fırına beslenmesinde kullanılan fanın tam yükte çalışması gösterilebilir. Yanma havasının debisinin azaltılması durumunda, fırının girişinde bulunan bir klappenin pozisyonu ayarlanarak yapılmaktadır. Bunun yerine, fanın tam yükte çalıştırılmasından ziyade, fanın tükettiği enerji miktarı azaltılarak, yanma havasının debisi ayarlanabilir. Bu durum, baca gazı geri dönüşümü için de göz önüne alınarak, işletme ve bakım maliyetleri azaltılabilir. Literatürdeki ileri otomasyon üniteleri ve uygulamaları ile söz konusu sistemin çalışma verimi geliştirilmiştir [124].

Fazla miktarda havanın fırına beslenmesi, yalıtım, baca gazı geri dönüşümü ve enerji ekserji analizinde de değerlendirilen parametrelerin göz önüne alınarak benimsenecek bir enerji yönetim sistemi ile birlikte, güncel üretim maliyetleri azaltılabilecektir. Söz konusu potansiyelin benzer ve farklı endüstriyel alanlar için de genellemesi yapılabilir.

4.9. Döner Fırının Modellenmesinden Elde Edilen Bulguların Tartışılması

Elde edilen bulgular, döner fırının ekserji analizinde önerilen bazı yöntemleri destekler niteliktedir. Bu önerileri tekrardan hatırlayacak olursak, döner fırının baca gazı geri dönüşümünün kapatıldığı taktirde enerji verimliliği sağlanacağı öne sürülmüştü. Fakat sayısal analizden elde edilecek sonuçların bu öneriyi desteklemesi gerekmektedir.

Öncelikle döner fırının yanma odasının tasarımı, elde edilen bulgulardan anlaşılacağı gibi tartışmaya açık ve literatürdeki araştırmalarda hedeflenen amaçlara hizmet etmemektedir. Şekil 3.17 ve 3.21’de gösterilen fırın içerisindeki hız dağılımı, fırının yanma odasında akışın geri döndüğü ve yanma odasının iç yapısından kaynaklanan türbülans etkilerinden dolayı, yanma odasındaki akışın istenmeyen şekilde dönmesine neden olduğu görülmektedir.

Akışın yanma odası içerisindeki hız dağılımı, döner fırının yanma odasının tasarımı, baca gazlarının geri dönüşümü ve alçı taşının fırına giriş yaptığı bölümün, akışa olumsuz etkilerinin olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, oluşan hızın en fazla 69.1 m/s değerinde ve fırının yanma odasında meydana geldiği görülmektedir. Yanma ve fan etkisi ile oluşan hız gradyeninin fırın içerisinde z düzlemi yönünde ve oluşan en yüksek hız profilinin yanma odasından daha ileride olması istenmektedir. Bu durum, fırının ileriki bölümlerine, yanma sonucu oluşan sıcak gazların taşıdığı enerjinin taşınmasında etkin olan momentumun etkinliğini arttıracaktır. Baca gazlarının geri dönüşümünün kapatıldığı ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durumda, hız dağılımının iyileştiği görülmektedir. Şekil 3.18’de gösterildiği gibi fırının yanma odasında meydana gelen en yüksek hız dağılımı, Şekil 3.17’de gösterilen hız dağılımına nazaran daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Baca gazlarının kapatıldığı ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı döner fırının HAD modelinde, mevcut çalışma şartlarına nazaran daha iyi ve arzu edilen bir hız dağılımının elde edildiği görülmektedir.

Akışın yanma odasındaki hareketinden dolayı, yanma sonucunda oluşan enerjinin fırının iç kısımlarına doğru ilerleyemediği ve yanma odasında yüksek sıcaklıklara erişildiği görülmektedir. Oluşan yanmanın veya alev yapısının, brülörden uzak ve fırının daha ileri bölümlerine doğru oluşması istenmektedir.

Oluşan alev yapısının, fırın cidarlarından uzak olması, arzu edilen bir diğer parametredir. Yapılan literatür araştırmalarında, yanmanın gerçekleştiği döner fırının yanma odasında, akışın ileriye doğru hareket etmesi için fırının iç hacminde bir daralma, ikincil yanma havası veya benzer bir madde girişinin, oluşan alev yapısını etkilemesinden veya akışın yanma odasında geri dönmesi ile oluşacak aksi yönde bir direncin oluşmasının önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Bunun nedeni, akışın yanma odasında sıkışmadan ilerlemesi, yanmanın fırının ilerleyen bölümlerinde devam etmesi ve açığa çıkan enerjinin, fırın içerisinde işlenen maddenin ani bir şekilde ısıtılmasının engellenmesidir.

Buna ilave olarak, yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin fırına ve fırın ekipmanlarına zarar vermesini engellemek, tek bir hacimde açığa çıkan yoğun enerjinin o hacimdeki ısı kayıplarını arttırması, kontrolsüz bir yanmanın meydana gelmesi, oluşan enerjinin sağlıklı bir şekilde yönlendirilememesi ve yüksek sıcaklıklara ulaşılması durumunda NO_x oluşumlarının meydana gelmesi gibi birçok etken göz önüne alınmaktadır. Şekil 3.13’de gösterilen döner fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı, yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin yanma odası sıcaklığını yükselttiğini göstermektedir.

Bu bölümdeki ısı kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Baca gazlarının geri dönüşümü ile yanma odasından gelen yüksek sıcaklıktaki gazların soğuduğu görülmektedir. Ekserji analizinde bahsi geçen ve baca gazlarının kapatılması yönünde olan öneri, döner fırının modellenmesinden elde edilen bulgular ile desteklenmiştir. Şekil 3.14’de, baca gazlarının fırına girişi durdurulduğu taktirde, fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı, yanma odasından sonraki bölümlere doğru uzanmaktadır. Yanma odasının çalışma sıcaklığı ise güncel çalışma şartları ile kıyaslandığı zaman, nispeten düştüğü görülmektedir. Alçı taşının giriş yaptığı hattın ve baca gazlarının fırına giriş yaptığı bölümdeki hacim daralması, akışın ilerlemesine engel olmaktadır. Yanmanın sağlıklı bir şekilde meydana gelebilmesi için türbülanslı akış arzu edilen bir oluşumdur. Fakat bu fiziksel oluşum, enerjinin belirli bir yerde tıkanmasına neden olmamalıdır. Şekil 3.12’de hem baca gazlarının fırına girişinin durdurulduğu, hem de alçı taşının fırına girişteki uzantısının kaldırılması durumu için elde edilen sıcaklık dağılımı görülmektedir. Elde edilen bulgular, sıcaklık dağılımının yanma odasında düştüğünü ve enerjinin fırının ilerleyen bölümlerine doğru hareket ettiğini göstermektedir.

Söz konusu durum, enerji verimliliği bakımından incelendiği zaman, fırın içerisindeki sıcaklık dağılımının, alçı taşının fırına girdiği bölümlerde çok yüksek olması istenmemektedir. Yanma sonucunda oluşan enerjinin fırın içerisinde hareket etmesi ısı kayıplarını düşürecektir. Böylece, daha az miktarda doğal gaz tüketimi gerçekleştirilerek, ürün kalite ve kapasitesinden ödün vermeden alçı tozu üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Baca gazlarının fırına beslenmesindeki amaç, yanmamış gazların yakılmasını sağlamak, NO_x oluşumlarını engellemek ve yanma verimini arttırmaktır. Baca gazlarının geri dönüşümünün sağlanması işlemi, düşük oksijenin seyreltilmesi şeklinde yorumlanmaktadır. Bununla ilgili literatürde yapılan HAD analizlerine rastlamak mümkündür [125]. NO_x (NO_x , NO ve NO_2 ’yi ifade etmektedir) oluşumu, fosil yakıtların yanması sonucunda meydana gelen ürünlerden biridir. Azotun oksijen ile reaksiyona girmesi için karışım sıcaklığının belirli bir sıcaklığa ulaşması gerekmektedir. NO_x oluşumunun hızlı bir şekilde arttığı yanma sıcaklığı 1573 K ile 1810 K arasında değişmektedir [125].

Bu durum göz önüne alınarak, döner fırının HAD analizinden elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları, NO_x oluşumuna ilişkin önemli veriler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 3.13, 3.14 ve 3.22 göz önüne alındığı zaman, yanma odasında 1573 K ve üzerinde olan sıcaklık bölgelerinin NO_x oluşumlarına öncülük ettiği görülmektedir. İkinci çalışma durumu için elde edilen veriler, fırının iç sıcaklığının çok yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir.

Mevcut çalışma koşulları ile kıyaslandığı takdirde, NO_x oluşumlarının çok yüksek değerlere ulaşacağı anlaşılmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi ikinci durum çalışma şartlarının iyileştirilmesi gerekmektedir. Fazla miktarlarda hava ve yakıtın fırına beslenmesinden dolayı bu durum oluşmaktadır.

Ekserji analizlerindeki kütle dengesinden elde edilen veriler, fazla miktarda yanma havasının fırına beslendiğini göstermektedir. Yanmamış hidrokarbonların belirlenmesi için baca gazlarının analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu ölçümün yapılamamasından dolayı, yanmamış hidrokarbonlar belirlenememiş ve yanmanın tam yanma kabulü yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Fazla miktarda havanın fırına beslenmesi ile birlikte, doğal gaz gibi gaz yakıtların yanma veriminin yüksek olması durumları, baca gazlarında yanmamış hidrokarbonların bulunma olasılığı nispeten düşürmektedir. Bu durumlar, enerji verimliliği açısından değerlendirildiği zaman, daha az miktarda doğal gaz tüketimi ile aynı miktarda ürün elde edilebilir. Fakat söz konusu bu durumların gerçekleştirilmesi için iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Elde edilen ürünün, tesisin laboratuvarlarında kontrol edilerek, fırının çalışma sınırları gözetilerek ve alçı taşı debisine göre iyileştirilecek olan döner fırından enerji verimliliği sağlanabilecektir.

Boussinesq yoğunluk farkından dolayı meydana gelen kuvvetler, yerçekiminin ihmal edilmediği problemlerde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Yüksek sıcaklıklardaki gazların yoğunluk farkından dolayı, fırın içerisinde yukarıya doğru hareket ettiği görülmektedir.

Sabit yüzey sıcaklıkları ile ilgili elde edilen bulgular, boussinesq kuvvetinin fırın içerisindeki sıcak gazların yerçekimi yönünün tersi yönde (y düzlemi) etki ettiği görülmektedir. Yanma odasının içyapısı ve yoğunluk farkından dolayı meydana gelen boussinesq kuvvetinin etkileri, yanma sonunda oluşan gazların yanma odasında sıkışmasına neden olan parametrelerden biridir. Daha önce baca gazlarının fırına girmesi ve alçı taşı giriş bölümünün fırın içerisine uzanan parçası, yanma sonrasında oluşan gazların ilerleyişini engellediği görülmektedir. Yoğunluk farkından dolayı meydana gelen akış hareketi, baca gazı geri dönüşümünün ve alçı taşı girişinin fırın içerisine uzanan bölümünün oluşturduğu karşı dirençler ile birlikte, yanma odasının yapısından dolayı, yanma odasının sıcaklığı artmaktadır.

Şekil 3.22’de görülen, döner fırının güncel çalışma şartlarının modellenmesinden elde edilen sıcaklık dağılımı ile karşılaştırıldığı zaman, baca gazlarının fırına geri beslenmesi durumundaki fark açık bir şekilde görülebilmektedir. Fırın içerisindeki sıcaklığın artması, baca gazlarının soğutucu etkisinin görülmemesinden dolayı meydana gelmektedir.

Hem baca gazlarının geri beslenmesi hem de alçı taşı girişi yanma sonucunda oluşan gazların ve oluşan alev yapısının ilerlemesini engellemektedir. Bu durum, yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin yanma odasında sıkışmasına neden olmakta iken, ikinci durumda elde edilen bulgular, oluşan alevin fırın içerisinde ileriye doğru hareket ettiğini göstermektedir. Fırının en soğuk bölümlerinin brülöre yakın olması arzu edilen bir durumdur. Brülör ömrünün uzamasına ve bakım masraflarının azalmasına neden olacaktır. Aynı zamanda, yanma odasının aşırı ısınması ve ısı kayıplarının artması durumu da engellenecektir. Fırının çalışma sıcaklığının çok üstüne çıkan sıcaklık değerleri, fazla ve gereksiz bir yakıt sarfiyatının gerçekleştirildiğini göstermektedir. İkinci durum için elde edilen veriler, ekserji analizinde ön görülen durumu kanıtlamaktadır. Baca gazının fırına beslenmesi durdurulduğu takdirde, yakıt hava oranının iyileştirilmesi ile birlikte, yüksek miktarlarda enerji verimliliği sağlanabileceği görülmektedir. Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi oluşan alev yapısı karşı bir direnç ile karşılaşmamasından dolayı, kimyasal reaksiyon sonucunda oluşan sıcak gazların fırın içerisinde daha rahat ilerlemesine ve gaz hızının artmasına neden olmuştur. Yanma sonucunda ortaya çıkan enerjinin fırın içerisinde ilerlemesi durumu, fırının döner bölümünde işlenen malzemenin dehidrasyon işlemini hızlandırarak, açığa çıkan enerjinin istenmeyen bölgelerde sıkışarak enerji kayıplarını arttırmasını engelleyecektir.

Daha önce de bahsedildiği gibi fazla miktarda yanma havasının fırına beslenmesi durumu, alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi için bir momentum kaynağı olarak kullanılmalıdır. İkinci analizden elde edilen veriler göstermektedir ki, yüksek miktarlarda yanma havasının fırına gönderilmesine gerek kalmadan, işlenmesi planlanan alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi sağlanabilir. Fırın üreticisi açısından da önemli verilerin elde edildiği analizi farklı bir bakış açısından da değerlendirilmesi mümkündür. Döner fırının açısız değeri arttırılmak sureti ile yerçekimi etkilerinden yararlanarak, alçı taşının fırın içerisinde ilerlemesi sağlanabilir. Şekil 3.13 ve 3.15’de döner fırının mevcut çalışma durumu, oluşan yüksek sıcaklıkların fırın cidarları ile teması durumu söz konusu olmaktadır. Şekil 3.14’de ise ikinci durum senaryosu için elde edilen sabit yüzey sıcaklıkları, oluşan yüksek sıcaklıkların fırın cidarlarından uzakta olduğu görülmektedir. Özellikle Şekil 3.13 ve 3.14’de gösterilen sıcaklık dağılımları, yanma sonucunda oluşan ısıya fırın cidarlarına olan uzaklığı daha net bir şekilde görülmektedir.

Döner fırın çalışması için ön görülen ikinci durum analizi, fırının çalışma ömrünün arttırılabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, yanma odasında meydana gelen ısı kayıplarının azalmasına da olanak sağlayacaktır.

Yakıtı oluşturan bileşenlerden biri olan metanın, fırın ekseni boyunca kütle fraksiyonu dağılımı Şekil 3.26’da gösterilmiştir. Fırının giriş bölümünde bulunan brülörden fırına beslenen yakıt ile metanın kütle fraksiyonunun en fazla olarak görüldüğü bölüm olmaktadır. Yanmanın tam gerçekleşmesinden dolayı, fırının ilerleyen bölümlerinde, söz konusu hidrokarbonun oksijen ile yanma reaksiyonuna girerek tükendiği görülmektedir. Özellikle baca gazlarının giriş yaptığı bölümden önce metanın yanma işlemine girmiş olması, baca gazı geri dönüşümünün, yanma üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Şekil 3.25’de karbon monoksitin fırın ekseni boyunca kütle fraksiyonu görülmektedir. Karbon monoksit eksik yanma O_2 ’nin eksik olması durumunda gözlenen bir bileşendir. Yanma bölgesinde yüksek miktarlarda görülmesi beklenen bir oluşumdur. Fakat fazla miktarda O_2 olmasından dolayı, yakıttaki tüm karbonların oksijen ile birleşerek karbon dioksit oluşturduğu görülmektedir. Fırının geri kalanında eksik bir yanma ürünü olan karbon monoksit görülmemektedir. Döner fırının ekserji analizlerinden elde edilen bulgular göstermektedir ki fırın içerisinde meydana gelen yanmanın tam olarak meydana geldiği görülmüştür.

Kütle dengesinin belirlenmesi için yapılan teorik yanma analizinden, yakma havasının gereğinden fazla bir şekilde fırına gönderilmesi üzerinde durulmuştur. Şekil 3.24’daki sayısal analiz sonucunda elde edilen grafikte teorik yanma analizini desteklemektedir. O_2 ’nin gereğinden fazla fırına beslenmesi durumu açık bir şekilde görülmektedir.

Yanma reaksiyonuna girmeyen O_2 miktarının bir hayli fazla olduğu ve fırındaki toplam kütlenin % 17’sinden fazlasını oluşturduğu görülmektedir. Aynı zamanda, fırının baca gazı geri dönüşümünün etkileri de açık bir şekilde görülmektedir. Baca gazları içerisinde bulunan ve yanma reaksiyonuna girmeyen O_2 , fırının 3.42 m’deki giriş bölümünden fırına giriş yaptığı görülmektedir. Hali hazırda fazla olan O_2 miktarı, şekilde de görüldüğü gibi O_2 kütle fraksiyonunu arttırmaktadır. Fazla yanma havasının fırına girmesi durumu fırının çalışma sıcaklığını düşürmektedir. Söz konusu grafikten yanma havasını oluşturan diğer bileşenleri de göz önüne aldığımız taktirde, gereksiz bir kütle girişi olması söz konusudur. Gereksiz bir şekilde fırına beslenen yanma havası miktarı, fırın dışına çıktığında ciddi miktarda enerjiyi de beraberinde götürecektir. Fırının istenilen sıcaklık değerlerine ulaştırılması için daha fazla yakıtın tüketilmesi gerekmektedir.

Şekil 3.27’de gösterilen karbon dioksit fırın içerisindeki kütle fraksiyon dağılımı, akışın yanma odasında oluşturduğu sirkülasyon nedeni ile beklenenin üzerinde bir değerde olduğu görülmektedir.

Baca gazlarının geri dönüşümü esnasında ve alçı taşı girişinin konumu neticesinde, yanmış ve yanmakta olan gazların tekrardan yanma odasına dönmesinden dolayı, yanma odasındaki karbon dioksit miktarının fazla olduğu görülmektedir. Bu durum fırının tasarım parametreleri ile ilgili bir durumdan kaynaklandığı görülmektedir. Baca gazı geri dönüşümünün fırına giriş yaptığı bölümündeki hacimsel daralmada, akışın geri dönerek yanmış gazların yanma odasından çıkmasını zorlayan bir etkidir. Baca gazlarının fırına giriş yaptığı bölümde, karbon dioksitin kütle fraksiyonundaki artışın nedeni ise baca gazlarındaki karbon dioksitin tekrardan fırına giriş yapmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Fırının ilerleyen bölümlerinde, karbon dioksit dağılımında stabil bir durum gözlemlenmektedir. Kimyasal reaksiyonların son bulmasından dolayı fırının ilerleyen bölümlerindeki karbon dioksitin kütle fraksiyonundaki hızlı değişimi durdurmaktadır. Yanma odası içerisinde meydana gelen yanmış gazların içerde sirkülasyon yapması, brülör ve ekipmanlarının sıcaklığını arttırmaktadır. Bu durum brülör ömrünü ve bileşenlerinin çalışma ömrünü olumsuz etkilemektedir. Alev yapısına olan etkisi ise bir başka istenmeyen parametreyi göstermektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi literatürdeki döner fırın araştırmaları ve tasarımlarında, yanmanın meydana geldiği fırın bölümlerinde hacimsel bir değişim söz konusu değildir. Alçı üretimi için kullanılan ve tez kapsamında incelenen döner fırının yanma odasındaki hacimsel değişim, akış, ısı transferi, türbülans ve yanma gibi birçok parametreyi etkilediği görülmektedir.

Şekil 3.21 – 27 incelendiği zaman, sistemin sabit çalışma şartlarına gelmesindeki zorluklar açık bir şekilde görülmektedir. Döner fırın üreticilerinin bu durumu göz önüne alarak tasarımlarını iyileştirmeleri gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında alçı üretimi gerçekleştirilen bir fabrikanın termodinamik, akış ve yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yöntem ve analizler, söz konusu işletmede bulunan perlit genişletme ve döner fırın proseslerine uygulanmıştır. Proseslere uygulanan enerji, ekserji, eksergoekonomi analizleri ve döner fırının sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

İşletmede bulunan eski perlit fırınında meydana gelen enerji ve ekserji kayıpları, toplam giren enerjinin % 33.87 sini, toplam giren ekserjinin ise % 27.11'ni oluşturmaktadır. Baca gazları, fırına giren toplam enerjinin % 60.20'sini oluşturmaktadır. Eski perlit genişletme fırınının enerji verimi % 66 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak farklı endüstriyel fırınların ekserji verimi ise % 40 ila % 50 arasında değiştiği görülmektedir [101,25, 26]. Eski perlit fırınının ekserji verimi ise % 26 olarak hesaplanmıştır. Kontrol hacmine giren toplam ekserjinin % 46.22 si, fırında meydana gelen ekserji yıkımına eşittir.

Yeni perlit fırınından referans çevreye olan ekserji kaybı 281.041 kW olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırının da meydana gelen ekserji yıkımı, 471.09 kW olarak hesaplanmıştır. Kontrol hacminden baca gazları ile birlikte çıkan enerji miktarı, giren enerji miktarının % 51.84'nü oluşturmaktadır. Bununla birlikte, baca gazları ile birlikte, kontrol hacmi olan yeni perlit fırınından çıkan ekserji miktarı, fırına giren toplam ekserjinin % 32.81'ni oluşturmaktadır. Yetersiz yakma havasının fırına beslenememesinden dolayı, meydana gelen yanmamış hidrokarbon (Metan) miktarı, 24192 kg/Ay olarak hesaplanmıştır. Kontrol hacim olarak seçilen yeni perlit fırının yüzeylerinden meydana gelen, enerji ve ekserji kayıpları, fırına giren toplam enerji ve ekserji değerlerinin, % 30.9 ve % 23.27 si olduğu hesaplanmıştır. Yeni perlit fırının dış yüzeyinden, ısınım ile meydana gelen enerji kaybı, 340.52 kW olarak hesaplanmıştır. Toplam enerji kaybı (416.999 kW) göz önüne alındığı zaman, ısınım ile enerji kaybı toplam enerji kaybının % 81.65'ni oluşturmaktadır. Toplam giren enerjinin % 69.11 i, baca gazlarından çevreye atılmaktadır. Yeni perlit fırının enerji verimi % 69, ekserji verimi ise % 37 olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırınının ekserji kaybı, 281.041 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı ise 471.09 kW olarak belirlenmiştir. Ekserji yıkımı, toplam giren enerjinin % 39'nu oluşturmaktadır.

Döner fırından meydana gelen ekserji kayıpları, 755.347 kW olarak hesaplanmıştır. Döner fırında meydana gelen enerji kayıpları, fırına giren toplam enerjinin % 30'nu oluşturmaktadır.

Kontrol hacim olarak seçilen döner fırınının yüzeyinden gerçekleşen ekserji kayıpları ise fırına giren toplam ekserjinin % 16'sını oluşturmaktadır. Fırının kütle dengesinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiği zaman, baca gazlarının % 28.78'ni su buharı oluşturmaktadır. Fırından çıkan baca gazlarının enerjisi, fırına giren toplam enerjinin %46'sını oluşturmaktadır. Baca gazlarının bünyesinde bulundurduğu enerji miktarı 5947.15 kW'dır. Baca gazındaki oksijen oranı, % 10.76 iken, kütleli debisi ise 0.7416 kg/s olarak hesaplanmıştır. Reaksiyona giremeyen oksijen miktarı, fırına giren havanın gerektiğinden fazla olduğunu göstermektedir. Döner fırında meydana gelen ekserji yıkımı 2969.97 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı döner fırına giren ekserjinin % 66'sını oluşturmaktadır. Kayıp ısı miktarı, 2597.65 kW olarak hesaplanmıştır. Döner fırının enerji verimi % 69 olarak belirlenmiştir. Döner fırının ekserji verimi, % 16 olarak hesaplanmıştır.

Eski perlit fırınının şimdiki yatırım bedeli 26,883.82 \$ iken, yeni fırının yatırım bedeli 44,359.82 \$'dır. Hurda değeri, ömrünü tamamlamış sistemlerin maliyetini ifade etmektedir. Eski perlit fırınının hurda değeri, 2,836.879 \$ olarak belirlenmiştir. Yeni perlit fırınının hurda değeri ise Eşitlik [2.99] kullanılarak, 4,497.354 \$ olduğu hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının şimdiki değer faktörleri, 0.5234 ve 0.1364 olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının yıllık yatırım maliyeti, 5,907.269 \$ iken, yeni perlit fırınının yıllık yatırım maliyeti, 5,379.092 \$ olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının yatırım geri dönüş faktörü 0.2197 iken, yeni perlit fırınının yatırım geri dönüş faktörü, 0.1212 olarak hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının, saatlik olarak seviyelendirilmiş yatırım maliyeti, 2.461 \$/h ve 5.122 \$/h olarak hesaplanmıştır. Bu parametrelerin toplam, saatlik olarak seviyelendirildiğinde, eski perlit fırınının işletme ve bakım maliyeti 32.611 \$/h iken, yeni perlit fırınının işletme ve bakım maliyeti 75.654 \$/h olarak hesaplanmıştır. Eski ve yeni perlit fırınlarının sermaye maliyet akımları, sırası ile 35.072 \$/h ve 80.777 \$/h olarak hesaplanmıştır. Doğal gazın birim ekserji maliyeti, eski perlit fırını için 13.601 \$/GJ, yeni perlit fırını için 12.345 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Her iki fırına giren yakıt ekserji maliyetleri, sırası ile 57.287 \$/h ve 53.651 \$/h olarak hesaplanmıştır. Eski perlit fırınının neden olduğu kayıp ekserji maliyeti 15.749 \$/h iken, yeni perlit fırını için 12.480 \$/h olarak hesaplanmıştır. Baca gazlarının ekserji maliyetleri, eski perlit fırını için 13.723 \$/h, yeni perlit fırını için 20.119 \$/h olarak hesaplanmıştır.

Eski perlit fırınının ürettiği genleşmiş perlitin birim ekserji ve ekserji maliyeti, sırası ile 648.309 \$/GJ ve 62.886 \$/h olarak hesaplanmıştır. Yeni perlit fırını ile üretilen genleşmiş perlitin birim ekserji maliyeti ve ekserji maliyeti, 492.186 \$/GJ ve 104.343 \$/h olarak hesaplanmıştır.

Ekserji yıkımı maliyeti ise eski fırın için 26.467 \$/h iken, yeni fırın için bu değer 20.924 \$/h olarak hesaplanmıştır. Ekserji kavramı temelinde üretim maliyeti, eski perlit fırını için 0.153 \$/kg iken yeni perlit için 0.100 \$/kg olarak hesaplanmıştır. Her iki perlit fırınının eksergoekonomik analiz bakımından performansı değerlendirilmelidir. Performans parametresi eksergoekonomik faktör ile belirlenmektedir. Eski perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 45 iken, yeni perlit fırınının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır.

Döner fırın sisteminin şimdiki değeri, 5,279,569.45 \$ olarak hesaplanmıştır. Hurda değeri ise sistemin çalışma ömrünü tamamladığı taktirdeki değerinin 531,000 \$ olduğunu göstermektedir. Döner fırın sisteminin şimdiki değer faktörü ise 0.057308 olarak hesaplanmıştır. Eksergoekonomik analizdeki iskonto oranı % 10, yıllık sermaye maliyeti 560,051.447 \$ ve sermaye geri dönüş faktörü 0.106079 olarak hesaplanmıştır. Tesisin saatlik olarak seviyelendirilmiş sermaye yatırım maliyeti 77.786 \$/h olarak hesaplanmıştır. Saatlik olarak seviyelendirilmiş olan işletme ve bakım maliyetini birçok parametre etkilemektedir. Bu parametreler, alçı taşı ve alçı taşının nakliye maliyetleri, onarım ve bakım maliyetleri, tüketilen elektriğin ve çalışanların maliyetleri oluşturmaktadır. Söz konusu bu parametrelerin seviyelendirilmiş maliyetlerinin toplamı, 363.352 \$/h olarak hesaplanmıştır. İşletme ve bakım maliyeti, 363.352 \$/h olarak değerlendirilmiştir. Sermaye maliyet akımı 441.138 \$/h olarak hesaplanmıştır. Doğal gazın birim ekserji maliyeti 13.7606 \$/GJ iken, ekserji maliyeti 218.1457 \$/h olarak hesaplanmıştır. Ekserji kaybının maliyeti 37.4185 \$/h'dir. Döner fırının baca gazlarının ekserji maliyeti ve baca gazı geri dönüşüm hattındaki baca gazlarının ekserji maliyetleri, sırası ile 30.164 \$/h ve 1.9443 \$/h olarak hesaplanmıştır. Sistem tarafından üretilen alçı tozunun ekserji maliyeti 593.636 \$/h iken, alçı tozunun birim ekserji maliyeti 1502.498 \$/GJ olarak belirlenmiştir. En önemli parametrelerden biri olan ekserji yıkımının maliyet oranı, 14.1147 \$/h olarak hesaplanmıştır. Döner fırının eksergoekonomik faktörü % 70 olarak hesaplanmıştır. Alçı tozunun üretim maliyeti, 0.03097 \$/kg olarak belirlenmiştir.

Döner fırının sayısal analizlerinden elde edilen sonuçlar gösteriştir ki, mevcut çalışma koşullarının analizde, döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 1868.64 K değerine ulaşmıştır. İkinci analizden elde edilen analizler göstermiştir ki, döner fırın içerisindeki en yüksek sıcaklık 2437.77 K değerine ulaşmıştır. Döner fırının mevcut çalışma durumunda, fırın içerisindeki en yüksek hız değeri, 69.1 m/s değerine ulaştığı görülmektedir.

İkinci durum için yapılan analizlerde ise fırın içerisindeki en yüksek hız değeri, 68.76 m/s değerine ulaştığı görülmektedir. Baca gazlarının geri dönüşümünün kapatıldığı ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı durumda, hız dağılımının iyileştiği görülmektedir.

Baca gazlarının kapatıldığı ve alçı taşı girişinin kaldırıldığı döner fırının HAD modelinde, mevcut çalışma şartlarına nazaran daha iyi ve arzu edilen bir hız dağılımının elde edildiği görülmektedir. Akışın yanma odasındaki hareketinden dolayı, yanma sonucunda oluşan enerjinin fırının iç kısımlarına doğru ilerleyemediği ve yanma odasında yüksek sıcaklıklara erişildiği görülmektedir. Yanma sonucunda oluşan enerjinin fırın içerisinde hareket etmesi ısı kayıplarını düşürecektir. Böylece, daha az miktarda doğal gaz tüketimi gerçekleştirilerek, ürün kalite ve kapasitesinden ödün vermeden alçı tozu üretimi gerçekleştirilebilecektir. Sabit yüzey sıcaklıkları ile ilgili elde edilen bulgular, boussinesq kuvvetinin fırın içerisindeki sıcak gazların yerçekimi yönünün tersi yönde (y düzlemi) etki ettiği görülmektedir. Daha önce baca gazlarının fırına girmesi ve alçı taşı giriş bölümünün fırın içerisine uzanan parçası, yanma sonrasında oluşan gazların ilerleyişini engellediği görülmektedir. Yoğunluk farkından dolayı meydana gelen akış hareketi, baca gazı geri dönüşümünün ve alçı taşı girişinin fırın içerisine uzanan bölümünün oluşturduğu karşı dirençler ile birlikte, yanma odasının yapısından dolayı, yanma odasının sıcaklığı artmaktadır. Hem baca gazlarının geri beslenmesi hem de alçı taşı girişi yanma sonucunda oluşan gazların ve oluşan alev yapısının ilerlemesini engellemektedir. Bu durum, yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin yanma odasında sıkışmasına neden olmakta iken, ikinci durumda elde edilen bulgular, oluşan alevin fırın içerisinde ileriye doğru hareket ettiğini göstermektedir. Fırının giriş bölümünde bulunan brülörden fırına beslenen yakıt ile metanın kütle fraksiyonunun en fazla olarak görüldüğü bölüm olmaktadır. Yanmanın tam gerçekleşmesinden dolayı, fırının ilerleyen bölümlerinde, söz konusu hidrokarbonun oksijen ile yanma reaksiyonuna girerek tükendiği görülmektedir. Özellikle baca gazlarının giriş yaptığı bölümden önce metanın yanma işlemine girmiş olması, baca gazı geri dönüşümünün, yanma üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Yanma bölgesinde yüksek miktarlarda görülmesi beklenen bir oluşumdur. Fakat fazla miktarda O_2 olmasından dolayı, yakıttaki tüm karbonların oksijen ile birleşerek karbon dioksit oluşturduğu görülmektedir. Fırının geri kalanında eksik bir yanma ürünü olan karbon monoksit görülmemektedir. Döner fırının ekserji analizlerinden elde edilen bulgular göstermektedir ki fırın içerisinde meydana gelen yanmanın tam olarak meydana geldiği görülmüştür. Yanma reaksiyonuna girmeyen O_2 miktarının bir hayli fazla olduğu ve fırındaki toplam kütleinin % 17'sinden fazlasını oluşturduğu görülmektedir.

Aynı zamanda, fırının baca gazı geri dönüşümünün etkileri de açık bir şekilde görülmektedir. Baca gazları içerisinde bulunan ve yanma reaksiyonuna girmeyen O₂, fırının 3.42 m deki giriş bölümünden fırına giriş yaptığı görülmektedir.

6. ÖNERİLER

Yapılan çalışma neticesinde, alçı üretimi gerçekleştiren fabrikanın enerji verimliliğini arttırmaya yönelik olarak büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Üretimin kapasitesi ve kalitesinden taviz vermeden daha az enerji ile üretilebilecek yöntemler tez kapsamında sunulmuştur.

Elde edilen bulgular sadece alçı üreticilerine hitap etmemektedir. Döner fırın üreticileri, perlit genleştirme fırını üreticileri ve brülör üreticileri için önemli bulgular elde edilmiştir. Alçı üretimi gerçekleştiren firmaların kullandığı fırınların iyileştirme çalışmaları kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Firma imkânları doğrultusunda bu çalışmalar gerçekleştirilebilir. Döner fırın üreticilerinin tasarım parametrelerini gözden geçirmeleri gerektiği açık bir şekilde görülmektedir. Döner fırın üreticilerinin müşterisi olan alçı sektörüne daha iyi bir hizmet ve ürün sunmaları için tez kapsamında elde edilen bulguların detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Yalıtım, hava-yakıt oranı, otomasyon sistemi ve fırın tasarımı gibi parametreler göz önüne alınmalıdır. Alçı üretimi gerçekleştiren firmaların ise mevcut proseslerin değerlendirilmesi, incelenmesi ve yeni yatırımlar öncesinde teknik fizibilite çalışmaları yapmalıdırlar. Özellikle enerji yönetimi açısından güçlü bir hiyerarşi ve kurumsal bir yönetim şeklinin benimsenmesi gerekmektedir. Brülör firmalarının hizmet verdiği sektörlerdeki işlemin iyi bir şekilde anlaşılacak, gerekli tasarımların yapılması önerilmektedir. Tez kapsamında elde edilen bulgular dikkatli bir şekilde değerlendirildiği takdirde, daha iyi bir döner fırın ve perlit genleştirme fırını tasarımına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu durum, her iki sistemin otomasyon üniteleri için de geçerlidir. Alçı üretimi gerçekleştiren firmaların ise uzman şirket, şahıs veya akademik personellerden, sistemleri hakkında bağımsız görüşler elde edebilirler. Yatırım öncesi ve sonrasında göz önüne alınacak uygun bir enerji yönetim yapısı ile daha iyi bir yatırım ve verimli bir işlem gerçekleştiren bir süreç elde edilebilir.

Mevcut teknolojik gelişmelerden ve ürünlerden yararlanılarak geliştirilecek olan perlit fırını, döner fırın, otomasyon sistemi ve enerji yönetimi ile enerji verimliliği sağlanabilir. Tez kapsamında elde edilen bulguların, söz konusu sektörlerin Ar-Ge birimlerinin çalışmalarına katkı sunması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gürtürk, M., Oztop, H.F.**, 2012. Türkiye’de Yüksek Enerji Tüketen Sektörlerin Enerji ve Ekserji Analizleri Üzerine Bir Araştırma, *Termodinamik Dergisi*, Eylül, 241.
- [2] **Boroumand, G., Rismanchi B., Saidur R.**, 2013. A review on exergy analysis of industrial sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**, 198–203.
- [3] **Madloul, N.A, Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim N.A.**, 2011. A critical review on energy use and savings in the cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 2042–2060.
- [4] **Madloul, N.A, Saidur, R., Rahim, N.A., Islama, M.R., Hossain, M.S.**, 2012. An exergy analysis for cement industries: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 921– 932.
- [5] **Kol, S., and Chaub,e A.**, 2013. Exergy Analysis of Cement Plant: A Review, *VSRD International Journal of Mechanical, Civil, Automobile and Production Engineering*, **3**, No. 7 July.
- [6] **Peinado, D., Vega, M., García-Hernando, N., Marugán-Cruz C.**, 2011. Energy and exergy analysis in an asphalt plant’s rotary dryer, *Applied Thermal Engineering*, **31**, 1039–1049.
- [7] **Utlü, Z., Sogut, Z., Hepbasli, A., Oktay, Z.**, 2006. Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, *Applied Thermal Engineering*, **26**, 2479–2489.
- [8] **Gutiérrez, A.S., Martínez, J.B.C., Vandecasteele, C.**, 2013. Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln, *Applied Thermal Engineering*, **51**, 273–280.
- [9] **Söğüt, Z., Oktay, Z., Karakoc, H.**, 2010. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln, *Applied Thermal Engineering*, **30**, 817–825.
- [10] **Yilmazoglu, M.Z., Amirabedin, E.**, 2012. 3E Analysis of a Solar Assisted Rotary Type Coal Dryer, *International Journal of Renewable Energy Research*, **2**, 1.
- [11] **Karamarkovic, V., Marasevic, M., Karamarkovic, R., Karamarkovic, M.**, 2013. Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns, *Applied Thermal Engineering*, **54**, 470–480.
- [12] **Çamdali, Ü., Erişen, A., Çelen, F.**, 2004. Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production, *Energy Conversion and Management*, **45**, 3017–3031.

- [13] **Atmaca A., Yumrutaş, R.,** 2013. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part I – Methodology, *Energy Conversion and Management*, **79**, 790–798.
- [14] **Atmaca, A., Yumrutaş, R.,** 2014. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part II – Application, *Energy Conversion and Management*, **79**, 799–808.
- [15] **Renó M.G.L., Torres, R.M., Silva, R.J., Santos, J.J.C.S., Melo, M.L.N.M.,** 2013. Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer, *Energy Conversion and Management*, **75**, 98–104.
- [16] **Ashrafizadeh S.A., Amidpour, M., Allahverdi A.,** 2012. Exergetic and environmental performance improvement in cement production process by driving force distribution, *Korean Journal Chemical Engineering*, **29**, 606–613.
- [17] **Engin, T., Ari, V.,** 2005. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems-A case study, *Energy Conversion and Management*, **46**, 551–562.
- [18] **Sardeshpande, V., Gaitonde, U.N., Banerjee, R.,** 2007. Model based energy benchmarking for glass furnace. *Energy Conversion and Management*, **48**, 2718–2738.
- [19] **Chirattananon, S., Gao Z.,** 1996. A model for the performance evaluation of the operation of electric arc furnace, *Energy Conversion and Management*, **37**, 161–166.
- [20] **Sakamotoa, Y., Tonookab, Y., Yanagisawa, Y.,** 1999. Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry: a process analysis, *Energy Conversion and Management*, **40**, 1129–1140.
- [21] **Lee, C.L., Jou C.J.G.,** 2013. Improving furnace energy efficiency through adjustment of damper angle, *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 2504–2509.
- [22] **Chen, W.H., Chung, Y.C., Liu J.L.,** 2005. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill, *Int. Commun in Heat and Mass Transfer*, **32**, 695–706.
- [23] **Jegla, Z., Stehlik, P., Kohoutek, J.,** 2000. Plant energy saving through efficient retrofit of furnaces, *Applied Thermal Engineering*, **20**, 1545–1560.
- [24] **Camdali, U., Tunc, M., Dikec, F.,** 2001. A thermodynamic analysis of a steel production step carried out in the ladle furnace, *Applied Thermal Engineering*, **21**, 643–655.

- [25] **Rasul, M.G., Tanty, B.S., Mohanty, B.,** 2007. Modelling and analysis of blast furnace performance for efficient utilization of energy, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 78–88.
- [26] **Bisio, G., Rubatto, G.,** 2002. Process improvements in iron and steel industry by analysis of heat and mass transfer, *Energy Conversion and Management*, **43**, 205–220.
- [27] **Hepbasli, A., Ozalp, N.,** 2003. Development of energy efficiency and management implementation in the Turkish industrial sector, *Energy Conversion and Management*, **44**, 231–249.
- [28] **Kannan, R., Boie, W.,** 2003. Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany, *Energy Conversion and Management*, **44**, 945–959.
- [29] **Mert, M.S., Dilmaç, Ö.F., Özkan, S., Karaca, F., Bolat, E.,** 2012. Exergoeconomic analysis of a cogeneration plant in an iron and steel factory, *Energy*, **46**, 78–84.
- [30] **Ozdemir, K., Hepbasli, A., Eskin, N.,** 2010. Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant, *Applied Thermal Engineering*, **30**, 1621–1631.
- [31] **Yao, H., Sheng, D., Chen, J., Li, W., Wan, A., Chen, H.,** 2013. Exergoeconomic analysis of a combined cycle system utilizing associated gases from steel production process based on structural theory of Thermoeconomics. *Applied Thermal Engineering*, **51**, 476–489.
- [32] **Balli, O., Aras, H., Hepbasli, A.,** 2008. Exergoeconomic analysis of a combined heat and power (CHP) system. *Int J Energy Res*, **32**, 273–289.
- [33] **Colpan, C.O., Yeşin, T.,** 2006. Energetic, exergetic and thermoeconomic analysis of Bilkent combined cycle cogeneration plant. *Int J Energy Res*, **30**, 875–894.
- [34] **Sayyaadi, H., Saffari, A.,** 2010. Thermoeconomic optimization of multi effect distillation desalination systems. *Applied Energy*, **87**, 1122–1133.
- [35] **Farshi, L.G., Mahmoudi, S.M.S., Rosen, M.A.,** 2013. Exergoeconomic comparsion of double effect and combined ejector-double effect absorption refrigeration systems. *Applied Energy*, **103**, 700–711.
- [36] **Kim, S.M., Oh, S.D., Kwon, Y.H., Kwak, H.Y.,** 1998. Exergoeconomic Analysis of Thermal Systems. *Energy*, **23**, 393–406.
- [37] **Kwon, Y.H., Kwak, H.Y., Oh, S.D.,** 2001. Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration Systems. *Exergy Int J*, **1**, 31–40.

- [38] **Kalinci, Y., Hepbasli, A., Dincer, I.,** 2012. Exergoeconomic analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int J Hydrogen Energy*, **37**, 16402–16411.
- [39] **Söğüt, M.Z., Oktay, Z., Karakoç, H. ve Yörü, Y.,** 2010. Kuru tip çimento üretiminde farin değirmeninin termoeconomik analizi, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, **30**, 59-72.
- [40] **Zare, V., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M.,** 2013. An exergoeconomic investigation of waste heat recovery from the Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) employing an ammoniaewater power/cooling cycle. *Energy*, **61**, 397–409.
- [41] **Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A.,** 2011. Exergoeconomic analysis of a gas engine driven heat pump drier and food drying process. *Applied Energy*, **88**, 2677–2684.
- [42] **Cortes, E., Rivera, W.,** 2010. Exergetic and exergoeconomic optimization of a cogeneration pulp and paper mill plant including the use of a heat transformer. *Energy*, **35**, 1289–1299.
- [43] **Zhang, G., Hua, B., Chen, Q.,** 2000. Exergoeconomic methodology for analysis and optimization of process systems. *Comp Chem Eng*, **24**, 613-618.
- [44] **Modesto, M., Nebra, S.A.,** 2009. Exergoeconomic analysis of the power generation system usingblast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill. *Applied Thermal Engineering*, **29**, 2127–2136.
- [45] **Ozgener, L., Ozgener, O.,** 2009. Monitoring of energy exergy efficiencies and exergoeconomic parameters of geothermal district heating systems (GDHSs), *Applied Energy*, **86**, 1704–1711.
- [46] **Abusoglu, A., Kanoglu, M.,** 2009. Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, **13**, 2295–2308.
- [47] **Souza, S.A., Lamas, W.Q.,** 2014. Thermoeconomic and ecological analysis applied to heating industrial process in chemical reactors. *Renew Sustain Energy Rev*, **29**, 96–107.
- [48] **Utlü, Z., Hepbasli, A.,** 2009. Exergoeconomic aspects of sectoral energy utilization for Turkish industrial sector and their impact on energy policies. *Energy Policy*, **37**, 577–587.
- [49] **Lian, Z.T., Chua, K.J., Chou, S.K.,** 2010. A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration. *Applied Energy*, **87**, 84–95.

- [50] **Modesto, M., Nebra, S.A.**, 2006. Analysis of a repowering proposal to the power generation system of a steel mill plant through the exergetic cost method. *Energy*, **31**, 3261–3277.
- [51] **Lamas, W.Q., Silveira, J.L., Giacaglia, G.E.O., Reis, L.O.M.**, 2010. Thermoeconomic analysis applied to an alternative wastewater treatment, *Renewable Energy*, **35**, 2288–2296.
- [52] **Valero, A., Usón, S., Torres, C., Valero, A., Agudelo, A., Costa, J.**, 2013. Thermoeconomic tools for the analysis of eco-industrial parks. *Energy*, **62**, 62–72.
- [53] **Mujumdar, S.K., Ranade, V.V.**, 2008. CFD modeling of rotary cement kilns, *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, **3**, 106–118.
- [54] **Marias, F., Roustan, H., Pichat, A.**, 2005. Modelling of a rotary kiln for the pyrolysis of aluminium waste, *Chemical Engineering Science*, **60**, 4609–4622.
- [55] **Marias, F.**, 2003. A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases, *Computers & Chemical Engineering*, **27**, 813–825.
- [56] **Manju, M.S., Savithri, S.**, 2012. Three dimensional CFD simulation of pneumatic coal injection in a direct reduction rotary kiln, *Fuel*, **102**, 54–64.
- [57] **Boateng, A.A.**, 2008. Rotary Kilns transport phenomena and transport processes, Burlington, US, Elsevier.
- [58] **Sunkara, K.R., Herz, F., Specht, E., Mellmann J., Erpelding, R.**, 2013. Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum, *Powder Technology*, **234**, 107–116.
- [59] **Demagh, Y., Moussa, H.B., Lachi, M., Noui, S., Bordja, L.**, 2012. Surface particle motions in rotating cylinders: Validation and similarity for an industrial scale kiln, *Powder Technology*, **224**, 260–272.
- [60] **Deliang, S.D., Watson, L., Vargas W.L., J.J. McCarthy, J.J.**, 2008. Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases, *Chemical Engineering Science*, **63**, 4506 – 4516.
- [61] **Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou, C.D., Goussis, D.A., Burganos V.N., Payatakes A.C.**, 1999. CFD predictions for cement kilns including frame modelling, heat transfer and clinker chemistry, *Applied Mathematical Modelling*, **23**, 55–76.

- [62] <http://www.alcider.org.tr>, 22 Temmuz 2014.
- [63] http://www.alcider.org.tr/alci_tasarrufudur.php Alçının Yararları. 03 Ocak 2012.
- [64] <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=dogalgaz&bn=221&hn=&nm=384&id=40694> Doğalgaz. 11 Mayıs 2012.
- [65] http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_TPAO_2012.pdf. 22 Temmuz 2014.
- [66] http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_TPAO_2012.pdf 22 Temmuz 2014.
- [67] <http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/perlite/mcs-2013-perli.pdf> 22 Temmuz 2014.
- [68] Dokuzuncu kalkınma planı 2007-2013, 2008. Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler, Ankara.
- [69] Alçıdergi, Sayı:1, Ocak 2009.
- [70] **Dweck, J., Lasota, E.I.P.**, 1998. Quality control of commercial plasters by thermogravimetry, *Thermochimica acta*, **318**, 137-142.
- [71] **Gürtürk, M., Öztop, H.F., Hepbaşlı, A.**, 2014. Endüstride Enerji/Ekserji Verimliliği ve Yönetiminin Önemi (1. Bölüm), *Tesisat Dergisi*, **219**, 54-62.
- [72] <http://www.aralci.com/perlit.html>, 22 Aralık 2012.
- [73] **Doğan, M., Alkan, M., Çakır, Ü.**, 1997. Electrokinetic Properties of Perlite, *Journal of Colloid and Interface Science*, **192**, 114–118.
- [74] **Topçu, I.B., Işıkdag, B.**, 2007. Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite, *Building and Environment*, **42**, 3540–3546.
- [75] **Gürtürk, M., Oztop, H.F.**, 2013. Alçı üretim prosesi ve enerji, *Termodinamik Dergisi*, **246**.
- [76] **Gürtürk, M., Oztop, H.F.**, 2013. Alçı Üretimi Yapan Bir Tesisin Enerji Verimliliği Açısından Ön Değerlendirme Çalışmasının Yapılması, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, 2. *Anadolu Enerji Sempozyumu*, s. 171-182.
- [77] **Gürtürk, M., Öztop, H.F., Hepbaşlı, A.**, 2014. Endüstride Enerji/Ekserji Verimliliği ve Yönetiminin Önemi (2. Bölüm), *Tesisat Dergisi*, **220**, 82-90.
- [78] **Hepbaşlı, A.**, 2012. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 73–104.
- [79] **Rant, Z.**, 1964. Exergy and anergy. *Wiss Z Tech Univ Dresden*, **13**, 1145–9.
- [80] **Szargut, J.**, 1980. International progress in second law analysis. *Energy*, **5**, 709–18.

- [81] **Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R.,** 1988. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publishing, New York.
- [82] **Kotas, T.J.,** 1985. The exergy method of thermal plant analysis. London: Butterworth Heinemann Ltd. London.
- [83] **Shukuya, M.,** 1994. Energy, entropy, exergy and space heating systems. In: Proc. 3rd int. conf. healthy buildings. p. 369–74.
- [84] **Sakulpipatsin, P.,** 2008. Exergy efficient building design. *PhD Thesis* Technical University of Delft.
- [85] **Bejan, A.,** 1997. Advanced engineering thermodynamics. John Wiley and Sons, New York.
- [86] **Sakulpipatsin, P.,** 2008. Exergy efficient building design. *PhD Thesis* Technical University of Delft.
- [87] www.clickstormgroup.us.splinder.com/post/843218/glossary-of-fuel-cell-terms, Clickstormgroup. Glossary of fuel cell terms, 5 Nisan 2011.
- [88] **Honerkamp, J.,** 2002. Statistical physics. Springer, p. 298.
- [89] **Tsatsaronis, G.,** 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32, 249–53.
- [90] **Cengel, Y.A., Boles, M.A.,** 2010. Thermodynamics: an engineering approach. 7st ed. McGraw-Hill.
- [91] <http://www.geoseries.com/glossary.html> Geoseries Glossary. Exergy 05. Nisan 2011.
- [92] **Hepbaşlı, A.,** 2011. Enerji verimliliği ve yönetim sistemi: yaklaşımlar ve uygulamalar, Schneider Electric.
- [93] **Öztürk, H.H.,** 2008. Isı depolama tekniği, Teknik Yayın evi, Ankara.
- [94] **Dincer, İ.,** 2002. The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy*, **30**, 137–149.
- [95] **Hepbaşlı, A.,** 2012. Enerji yönetimi mi, yoksa ekserji yönetimi mi?, ekserji ve uygulamaları yaz kursu, kurs notları, Osmaniye, 02-04 Temmuz 2012.
- [96] **Moran, M.J., Shapiro, H.N.,** 2006. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [97] **Ahmadi, P., Dincer, I., Rosen, M.A.,** 2011. Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algothm based multi-objective optimization of combined cycle power plants. *Energy*, **36**, 5886–5898.
- [98] **Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M.,** 1996. Thermal Design and Optimization. John Wiley & Sons, Inc, New York.

- [99] **Cengel, Y.A.**, 2003. Heat Transfer—A practical approach. 2nd ed., NY: McGraw-Hill, New York.
- [100] **Kuo, K.K.**, 2005. Principles of combustion, 2th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [101] **Gürtürk, M., Oztop, H. F., Hepbaşlı, A.**, 2013. Energy and exergy assessments of a perlite expansion furnace in a plaster plant. *Energy Conversion and Management*, **75**, 488-497.
- [102] **Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G.**, 2006. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, **31**, 1257–1289.
- [103] **Tsatsaronis, G.**, 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, **32**, 249–253.
- [104] **Ozdemir, K., Hepbaşlı, A., Eskin, N.**, 2010. Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant. *Applied Thermal Engineering*, **30**, 1621–1631.
- [105] <http://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kur2006.html> 30 Eylül 2013.
- [106] http://www.tcmb.gov.tr/yeni/kurlar/kurlar_tr.php 30 Eylül 2013.
- [107] <http://www.csgeb.gov.tr/csgebPortal/cgm.portal?page=asgari> 30 Eylül 2013.
- [108] **Ballı, Ö.**, 2008. Performance assessments of cogeneration systems using the energy, availability (exergy) and exergoeconomic analysis methods. *PhD Thesis*, Eskişehir Osmangazi Univ. Institute of science, department of mechanical engineering, Eskişehir.
- [109] **Çolpan, C.O.**, 2005. Exergy analysis of combined cycle cogeneration systems. *Master Thesis*, Middle East Technical Univ. Institute of science, department of mechanical engineering, Ankara.
- [110] **Turgut, E.T.**, 2007. Exergoeconomic analysis of aircraft gas turbine engines. *PhD Thesis*, Anadolu Univ. Institute of science, civil aviation program, Eskişehir.
- [111] Ansys Mesh User's Guide, 2013.
- [112] **Bhad, T.P., Sarkar, S., Kaushik, A., Herwadkar, S.V.**, 2009. CFD modeling of a cement kiln with multi channel burner for optimization of flame profile, Seventh International Conference on CFD in the Mineral and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 09-11 December.
- [113] ANSYS Theory Guide, 2013.
- [114] **Docquier, N., Candel, S.**, 2002. Combustion control and sensors: a review, *Progress in Energy and Combustion Science*, **28**, 107–150.

- [115] **Madloul, N.A., Saidur, R., Rahim N.A., Kamalisarvestani, M.,** 2013. An overview of energy saving measures for cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 18–29.
- [116] **Bejan, A.,** 1996. Entropy generation minimization: the new thermodynamics of finitesize devices and finitetime processes. *Journal of Applied Physics*, 79, 1191–1218.
- [117] **El-Mahallawy, F., El-Din Habik, S.,** 2002. Fundamentals and Technology of Combustion. Elsevier Ltd.
- [118] **Kannan, R., Boie, W.,** 2003. Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management*, 44, 945–959.
- [119] **Shi, D., Vargas W.L., McCarthy, J.J.,** 2008. Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases, *Chemical Engineering Science*, 63, 4506–4516.
- [120] www.alcider.org.tr/dunya/ Plaster production according to World, profile of the sector. 16 Şubat 2015.
- [121] **Tsatsaronis, G., Morosuk, T., Koch, D., Sorgenfrei, M.,** 2013. Understanding the thermodynamic, inefficiencies in combustion processes. *Energy*, 62, 3–11.
- [122] **Wiman, J., Almstedt, A.E.,** 1997. Hydrodynamics, erosion and heat transfer in a pressurized fluidized bed: influence of pressure, fluidization velocity, particle size and tube bank geometry. *Chem Eng Sci*, 52, 2677-2695.
- [123] **Yang, Y., Reuter M.A., Hartman, D.T.M.,** 2003. CFD Modeling for control of hazardous waste incinerator. *Cont Eng Pract*, 11, 93–101.
- [124] **Docquier, N., Candel, S.,** 2002. Combustion control and sensors: a review. *Progress Energy Combust Sci*, 28, 107–150.,
- [125] **Zhang, Z., Wang T.,** 2009. Simulation Of Combustion And Thermal-Flow Inside A Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln, Part 1: Process Review And Modeling, Proceedings of IMECE2009. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 13-19, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- [126] **Noor M.M., Wandel1 A.P., Yusaf T.F.,** 2012. A Preliminary Study Of Control Parameters For Open Furnace Mild Combustion Using CFD, 2ndmalaysian Postgraduate Conference, 7-9 July, Bond University, Gold Coast, Queensland, Malaysian.
- [127] **Gürtürk, M., Oztop, H. F., Hepbasli, A.,** 2014. Energy management and environmental aspects of a high capacity perlite furnace through exergetic analysis. *Energy Conversion and Management*, 82, 188-201.

- [128] **Gürtürk, M., Oztop, H.F.**, 2014. Energy and exergy analysis of a rotary kiln used for plaster production. *Applied Thermal Engineering*, 67(1), 554-565.
- [129] **Gürtürk, M., Oztop, H.F., Hepbasli, A.**, 2015. Comparison of exergoeconomic analysis of two different perlite expansion furnaces. *Energy*, **80**, 589-598.
- [130] **Bejan, A.**, 2004. Convection Heat Transfer, John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

EKLER

Ek Tablo 1.1. Kontrol hacmine giren parametrelerin enerji değerleri ve kullanılan eşitlikler

Tanım	Kullanılan Eşitlikler	Değerler	Sonuçlar (kW)
Perlit	$\dot{E} = \dot{m}_{per} h_{per} = \dot{m}_{per} C_{p,per} T_{per}$	$\dot{m}_{per} = 0.121 \text{ kg / s}, C_{p,per} = 0.831 \text{ kJ / kg} \cdot K, T_{per} = 273 K$	27.45
Yanma havası	$\dot{E} = \dot{m}_{yh} h_{yh} = \dot{m}_{yh} C_{p,yh} T_{yh}$	$\dot{m}_{yh} = 0.84 \text{ kg / s}, h_{yh} = 272.91 \text{ kJ/kg}$	230.46
Doğal gaz	$\dot{E} = \dot{m}_{DG} AID$	$\dot{m}_{DG} = 0.025 \text{ kg / s}, AID = 45000 \text{ kJ / kg}$	1125
Yakıtın duyulur ısısı	$\dot{E} = \dot{m}_{DG} h_{DG} = \dot{m}_{DG} C_{p,DG} T_{DG}$	$\dot{m}_{DG} = 0.025 \text{ kg / s}, C_{p,DG} = 2 \text{ kJ / kg} \cdot K, T_{DG} = 273 K$	13.65
Toplam enerji girişi			1396

Ek Tablo 1.2. Kontrol hacminden çıkan parametrelerin enerji değerleri ve kullanılan eşitlikler

Tanım	Kullanılan Eşitlikler	Değerler	Sonuçlar (kW)
Genleşmiş perlit	$\dot{E} = \dot{m}_{G,per} h_{G,per} = \dot{m}_{G,per} C_{p,G,per} T_{G,per}$	$\dot{m}_{G,per} = 0.114 \text{ kg / s}, C_{p,G,per} = 0.831 \text{ kJ / kg} \cdot K, T_{G,per} = 873 K$	82.70
Baca gazları	$\dot{E} = \dot{m}_{bg} h_{bg}$	$\dot{m}_{bg} = 0.872 \text{ kg / s}, h_{bg} = 963.81 \text{ kJ / kg}$	840.44
Işınım ve doğal taşınım sonucunda meydana gelen kayıp enerji	(Lütfen Ek Tablo 1.3'e bakın)		373.83
Hesaplanamayan kayıp enerji miktarı			99
Toplam enerji çıkışı			1396

Ek Tablo 1.3. Kontrol hacminin yüzeyinden meydana gelen ısı kayıpları

Tanım	Kullanılan Eşitlikler	Değerler	Sonuçlar
Fırın bacası (silindir) $D \leq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.38$	$Gr = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{\infty})L^3}{\nu^2}$ $Ra = GrPr$ $Nu = \frac{4}{3} \left[\frac{7RaPr}{5(20 + 21Pr)} \right]^{1/4} + \frac{4(272 + 315Pr)L}{35(64 + 63Pr)D}$ $H = \frac{kNu}{L}$ $\dot{E}_{k, taşınım} = HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = \alpha\sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$ (Kaynak. [99, 130])	$A = 6.9 m^2, T_{yüzey} = 823 K,$ $T_{\infty} = 273 K,$ $T_{film} = 548 K,$ $D = 0.11 m, L = 20 m$ $k = 0.0583 W / m \cdot K,$ $\nu = 8.66 \times 10^{-5} m^2 / s,$ $\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7011$ $\alpha = 0.78$ (paslı yüzey), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak. [99])	$Gr = 1.05 \times 10^{13}$ $Ra = 7.36 \times 10^{12}$ $Nu = 995.16$ $H = 2.62 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 9.96 kW$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = 138.3 kW$
Üst ve alt koniler (Üst ve alt koniler açılı duvar varsayımı yapılmıştır. Duvar açısı 30 derecedir.)	$Gr = \frac{g \cos \theta \beta (T_{yüzey} - T_{\infty}) L^3}{\nu^2}, Ra = GrPr$ $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$ $H = \frac{kNu}{L}$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 2HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = 2\alpha\sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$ (Kaynak. [99])	$A = 0.62 m^2, L = 0.4 m, \theta = 30^\circ$ $T_{yüzey} = 1073 K,$ $T_{\infty} = 273 K, T_{film} = 673 K,$ $k = 0.0644 W / m \cdot K,$ $\nu = 1.83 \times 10^{-4} m^2 / s,$ $\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7077$ $\alpha = 0.78$ (paslı yüzey), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak. [99])	$Gr = 1.9 \times 10^7$ $Ra = 1.3 \times 10^7$ $Nu = 13.64$ $H = 2.18 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 2.16 kW$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = 59.75 kW$

Silindirik Gövde

(Silindirik gövde, dikey pilaka olarak göz önüne alınmıştır. Bu varsayım, aşağıdaki eşitlik durumuna göre yapılmıştır.)

$$D \leq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.38$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{\infty})L^3}{\nu^2}, Ra = GrPr$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$H = \frac{kNu}{L}$$

$$\dot{E}_{k, taşınım} = HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$$

$$\dot{E}_{k, ışıınım} = \alpha\sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$$

(Kaynak [99])

$$Gr = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{\infty})L^3}{\nu^2}, Ra = GrPr$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$H = \frac{kNu}{L}$$

$$\dot{E}_{k, taşınım} = HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$$

$$\dot{E}_{k, ışıınım} = \alpha\sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$$

(Ref. [99])

$$A = 2.53m^2, T_{yüzey} = 1073K,$$

$$T_{\infty} = 273K, T_{film} = 673K,$$

$$D = 0.6m, L = 1.9m$$

$$k = 0.0644W / m \cdot K,$$

$$\nu = 1.83 \times 10^{-4} m^2 / s,$$

$$\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7077$$

$$\alpha = 0.78(\text{paslı yüzey}),$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$$

(Kaynak [99])

$$Gr = 2.3 \times 10^9$$

$$Ra = 1.6 \times 10^9$$

$$Nu = 56.37$$

$$H = 1.91W / m^2 \cdot K$$

$$\dot{E}_{k, taşınım} = 3.36kW$$

$$\dot{E}_{k, ışıınım} = 147.6kW$$

Brülör
(Silindirik)

(Silindirik gövde, dikey pilaka olarak göz önüne alınmıştır. Bu varsayım, aşağıdaki eşitlik durumuna göre yapılmıştır.)

$$D \leq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.04$$

$$A = 0.21m^2, T_s = 1073K,$$

$$T_{\infty} = 273K, T_{film} = 673K,$$

$$D = 0.4m, L = 0.17m$$

$$k = 0.0644W / m \cdot K,$$

$$\nu = 1.83 \times 10^{-4} m^2 / s,$$

$$\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7077$$

$$\alpha = 0.78(\text{paslı yüzey}),$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$$

(Ref. [99])

$$Gr = 1.7 \times 10^6$$

$$Ra = 1.2 \times 10^6$$

$$Nu = 7.12$$

$$H = 2.69W / m^2 \cdot K$$

$$\dot{E}_{k, taşınım} = 0.45kW$$

$$\dot{E}_{k, ışıınım} = 12.25kW$$

Toplam ısı kaybı

$$\dot{E}_k = 373.83kW$$

Ek Tablo 1.4. Yeni perlit fırınına giren parametrelerin enerji değerleri

Tanım	Kullanılan eşitlikler	Veriler	Sonular (kW)
Perlit	$\dot{E}_{per} = \dot{m}_{per} \cdot h_{per}$ $= \dot{m}_{per} \cdot C_{p,per} \cdot T_{per}$	$\dot{m}_{per} = 0.305 \text{ kg/s}$ $C_{p,per} = 0.831 \text{ kJ/kg} \cdot K$ $T_{per} = 300 \text{ K}$	76.036
Yanma havası	$\dot{E}_{yh} = \dot{m}_{yh,i} \cdot h_{yh,i}$ $= \sum \dot{m}_{yh,i} \cdot C_{p,yh,i} \cdot T_{yh,i}$	$\dot{m}_{N_2} = 0.248 \text{ kg/s}, C_{p,N_2} = 1.038 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{N_2} = 300 \text{ K}$ $\dot{m}_{O_2} = 0.075 \text{ kg/s}, C_{p,O_2} = 0.919 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{O_2} = 300 \text{ K}$ $\dot{m}_{CO_2} = 0.00015 \text{ kg/s}, C_{p,CO_2} = 0.846 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{CO_2} = 300 \text{ K}$ $\dot{m}_{H_2O} = 0.003 \text{ kg/s}, C_{p,H_2O} = 1.868 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{H_2O} = 300 \text{ K}$	100.468
Doğal gaz	$\dot{E}_{DG} = \dot{E}_{DG}^{kim} + \dot{E}_{DG}^{fiz}$ $\dot{E}_{DG}^{kim} = \sum \dot{m}_{DG,i} \cdot AID_i$ $\dot{E}_{DG}^{fiz} = \sum \dot{m}_{DG,i} \cdot h_{DG,i}$ $= \sum \dot{m}_{DG,i} \cdot C_{p,DG,i} \cdot T_{DG,i}$	$\dot{m}_{CH_4} = 0.02 \text{ kg/s}, AID_{CH_4} = 50,050 \text{ kJ/kg}$ $\dot{m}_{C_2H_6} = 0.0014 \text{ kg/s}, AID_{C_2H_6} = 47,520 \text{ kJ/kg}$ $\dot{m}_{C_3H_8} = 0.00055 \text{ kg/s}, AID_{C_3H_8} = 46,340 \text{ kJ/kg}$ $\dot{m}_{C_4H_{10}} = 0.00031 \text{ kg/s}, AID_{C_4H_{10}} = 45,370 \text{ kJ/kg}$ $\dot{m}_{C_5H_{12}} = 0.00011 \text{ kg/s}, AID_{C_5H_{12}} = 44,910 \text{ kJ/kg}$ $C_{p,CH_4} = 2.231 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{CH_4} = 300 \text{ K}$ $C_{p,C_2H_6} = 1.767 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{C_2H_6} = 300 \text{ K}$ $C_{p,C_3H_8} = 1.680 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{C_3H_8} = 300 \text{ K}$ $C_{p,C_4H_{10}} = 1.717 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{C_4H_{10}} = 300 \text{ K}$ $C_{p,C_5H_{12}} = 1.718 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{C_5H_{12}} = 300 \text{ K}$ $C_{p,N_2} = 1.038 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{N_2} = 300 \text{ K}$ $C_{p,CO_2} = 0.846 \text{ kJ/kg} \cdot K, T_{CO_2} = 300 \text{ K}$	1172.955
Toplam giren enerji			1349.46

Ek Tablo 1.5. Yeni perlit fırınından çıkan parametrelerin enerji değerleri

Tanım	Kullanılan eşitlikler	Veriler	Sonuçlar (kW)
Genleşmiş perlit	$\dot{E}_{G,per} = \dot{m}_{G,per} h_{G,per}$ $= \dot{m}_{G,per} C_{p,G,per} T_{G,per}$	$\dot{m}_{G,per} = 0.288 \text{ kg/s}$ $C_{p,G,per} = 0.831 \text{ kJ/kg} \cdot K$ $T_{G,per} = 973 \text{ K}$	232.866
Baca gazları	$\dot{E}_{bg} = \dot{E}_{bg}^{kim} + \dot{E}_{bg}^{fiz}$ $\dot{E}_{bg}^{fiz} = \sum \dot{m}_{bg,i} \cdot C_{p,bg,i} \cdot T_{bg,i}$ $\dot{E}_{bg}^{kim} = \dot{m}_{CH_4} \cdot AID_{CH_4}$	$\dot{m}_{N_2} = 0.249 \text{ kg/s}, C_{p,N_2} = \text{kJ/kg} \cdot K, T_{N_2} = 973 \text{ K}$ $\dot{m}_{CH_4} = 0.004 \text{ kg/s}, C_{p,CH_4} = \text{kJ/kg} \cdot K, T_{O_2} = 973 \text{ K}$ $\dot{m}_{CH_4} = 0.004 \text{ kg/s}, AID = 50,050 \text{ kJ/kg}$ $\dot{m}_{CO_2} = 0.051 \text{ kg/s}, C_{p,CO_2} = \text{kJ/kg} \cdot K, T_{CO_2} = 973 \text{ K}$ $\dot{m}_{H_2O} = 0.062 \text{ kg/s}, C_{p,H_2O} = \text{kJ/kg} \cdot K, T_{H_2O} = 973 \text{ K}$	699.595
Işınım ve doğal taşınım sonucunda meydana gelen enerji kayıpları		(Lütfen Ek Tablo 1.6'ya bakın)	365.459
Hesaplanamayan kayıplar			51.54
Toplam enerji çıkışı			1349.46

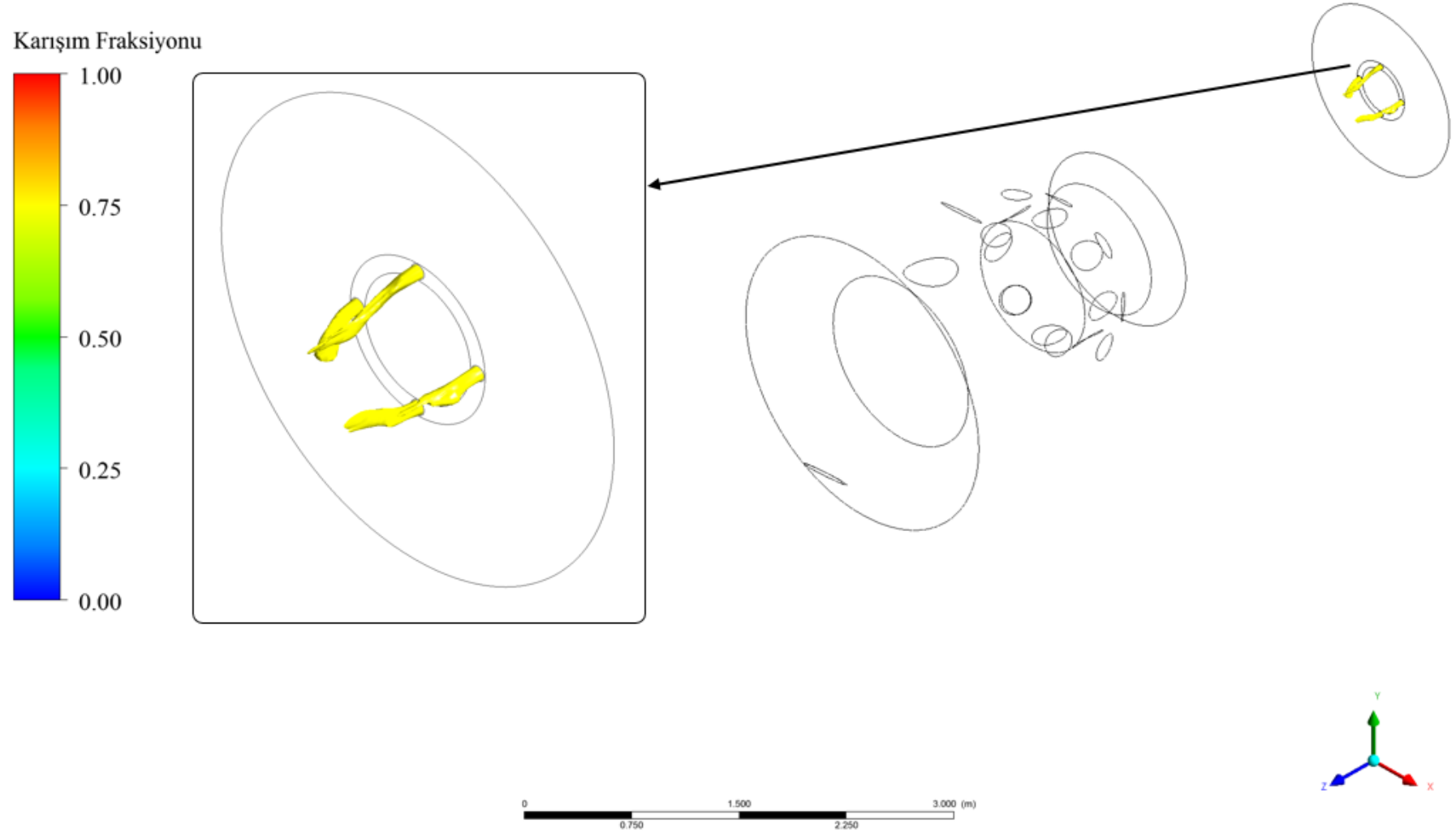
Ek Tablo 1.6. Kontrol hacminin yüzeyinden meydana gelen enerji kayıpları

Tanım	Kullanılan eşitlikler	Veriler	Sonuçlar
Fırın bacası (Silindirik) $D \leq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.27$	$Gr = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{\infty})L^3}{\nu^2}, Ra = GrPr$ $Nu = \frac{4}{3} \left[\frac{7RaPr}{5(20 + 21Pr)} \right]^{1/4} + \frac{4(272 + 315Pr)L}{35(64 + 63Pr)D}$ $H = \frac{kNu}{L}, \dot{E}_{k, taşınım} = HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = \alpha\sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$ (Kaynak [99,130])	$A = 6.9 m^2, T_{yüzey} = 1010 K,$ $T_{\infty} = 300 K, T_{film} = 655 K,$ $D = 0.11 m, L = 20 m$ $k = 0.06337 W / m \cdot K,$ $\nu = 1.04 \times 10^{-4} m^2 / s,$ $\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7064$ $\alpha = 0.78$ (paslı yüzey), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak [99])	$Gr = 7.865 \times 10^{12}$ $Ra = 5.556 \times 10^{12}$ $Nu = 934.978$ $H = 2.96 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 14.513 kW$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = 315.078 kW$
Isıtma hacmi (Silindirik gövde, dikey pilaka olarak göz önüne alınmıştır. Bu varsayım, aşağıdaki eşitlik durumuna göre yapılmıştır.) $D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.15$	$Gr = \frac{g\beta(T_{yüzey} - T_{\infty})L^3}{\nu^2}$ $Ra = GrPr$ $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$	$A = 10.113 m^2, T_{yüzey} = 473 K,$ $T_{\infty} = 300 K, T_{film} = 386.5 K,$ $D = 0.96 m, L = 3.12 m$ $k = 0.03189 W / m \cdot K,$ $\nu = 2.4518 \times 10^{-4} m^2 / s,$ $\beta = \frac{1}{T_{film}} 1 / K, Pr = 0.7085$ $\alpha = 0.78$ (paslı yüzey), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak [99])	$Gr = 2.22 \times 10^{11}$ $Ra = 1.574 \times 10^{11}$ $Nu = 608.107$ $H = 3.676 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 6.431 kW$ $\dot{E}_{k, ışıınım} = 18.764 kW$
(Silindirik gövde, dikey pilaka olarak göz önüne alınmıştır. Bu varsayım, aşağıdaki eşitlik durumuna göre yapılmıştır.) $D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.07$	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$	$A = 1.717 m^2, T_{yüzey} = 473 K,$ $T_{\infty} = 300 K, T_{film} = 386.5 K,$ $D = 1.2 m, L = 0.17 m$ $k = 0.03189 W / m \cdot K,$ $\nu = 2.4518 \times 10^{-4} m^2 / s,$	$Gr = 3.59 \times 10^7$ $Ra = 2.54 \times 10^7$ $Nu = 40.81$

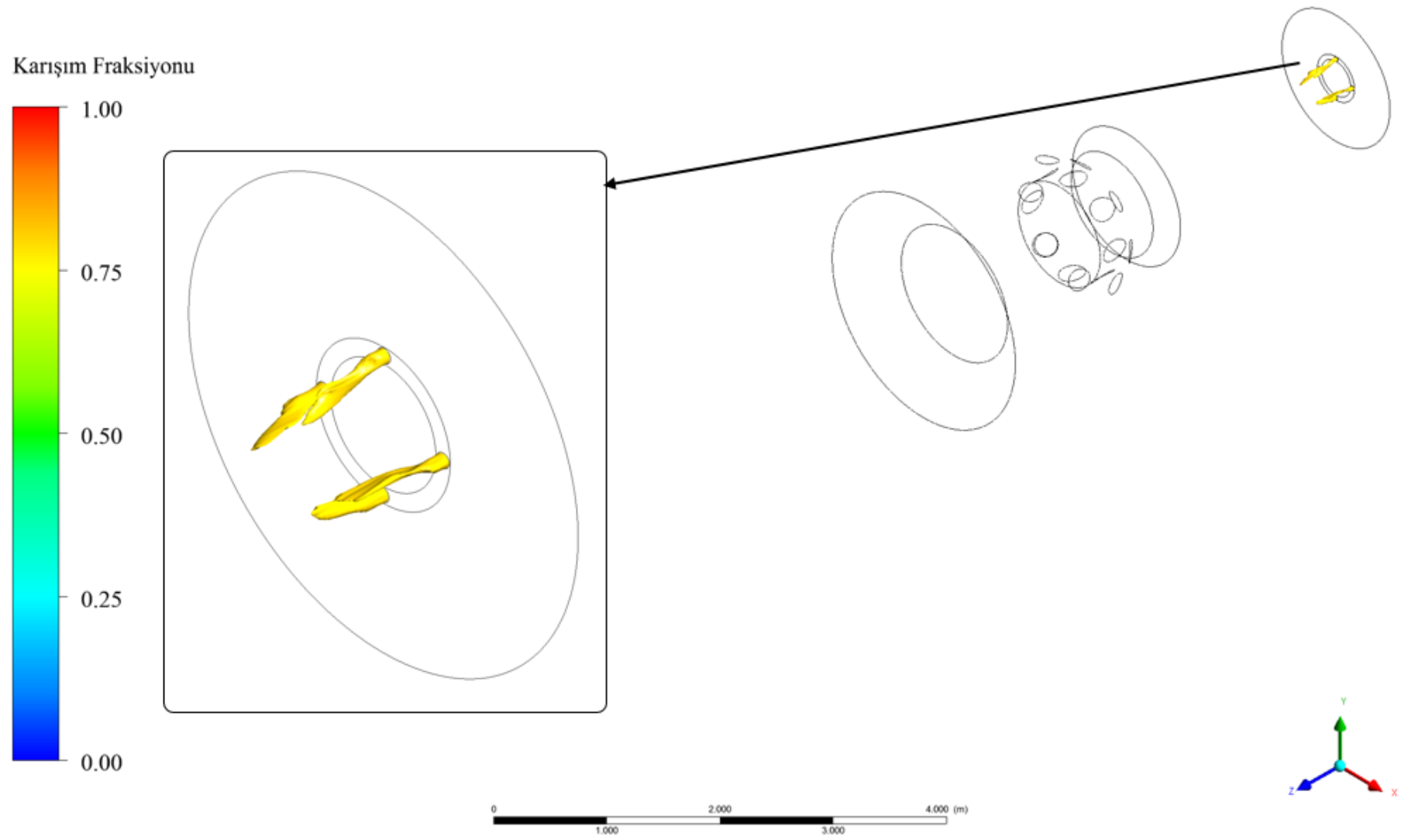
((Silindirik gövde, dikey pilaka olarak göz önüne alınmıştır. Bu varsayım, aşağıdaki eşitlik durumuna göre yapılmıştır.) $D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0.1)$	$H = \frac{kNu}{L}$ $\dot{E}_{k, taşınım} = HA(T_{yüzey} - T_{\infty})$ $\dot{E}_{k, ısıtım} = \alpha \sigma A(T_{yüzey}^4 - T_{\infty}^4)$ (Kaynak [99])	$\beta = \frac{1}{T_{film}} - 1/K, Pr = 0.7085$ $\alpha = 0.78(\text{paslı yüzey}),$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak [100]) $A = 1.883 m^2, T_{yüzey} = 473 K,$ $T_{\infty} = 300 K, T_{film} = 386.5 K,$ $D = 0.76 m, L = 0.6 m$ $k = 0.03189 W / m \cdot K,$ $\nu = 2.4518 \times 10^{-4} m^2 / s,$ $\beta = \frac{1}{T_{film}} - 1/K, Pr = 0.7085$ $\alpha = 0.78(\text{paslı yüzey}),$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$ (Kaynak [99])	$H = 7.44 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 2.212 kW$ $\dot{E}_{k, ısıtım} = 3.185 kW$ $Gr = 1.58 \times 10^9$ $Ra = 1.12 \times 10^9$ $Nu = 127.176$ $H = 5.474 W / m^2 \cdot K$ $\dot{E}_{k, taşınım} = 1.783 kW$ $\dot{E}_{k, ısıtım} = 3.493 kW$
	Toplam ısı kaybı		$\dot{E}_k = 365.459 kW$

Ek Tablo 1.7. Eşitlik (2.52)'de kullanılan parametreler [90]

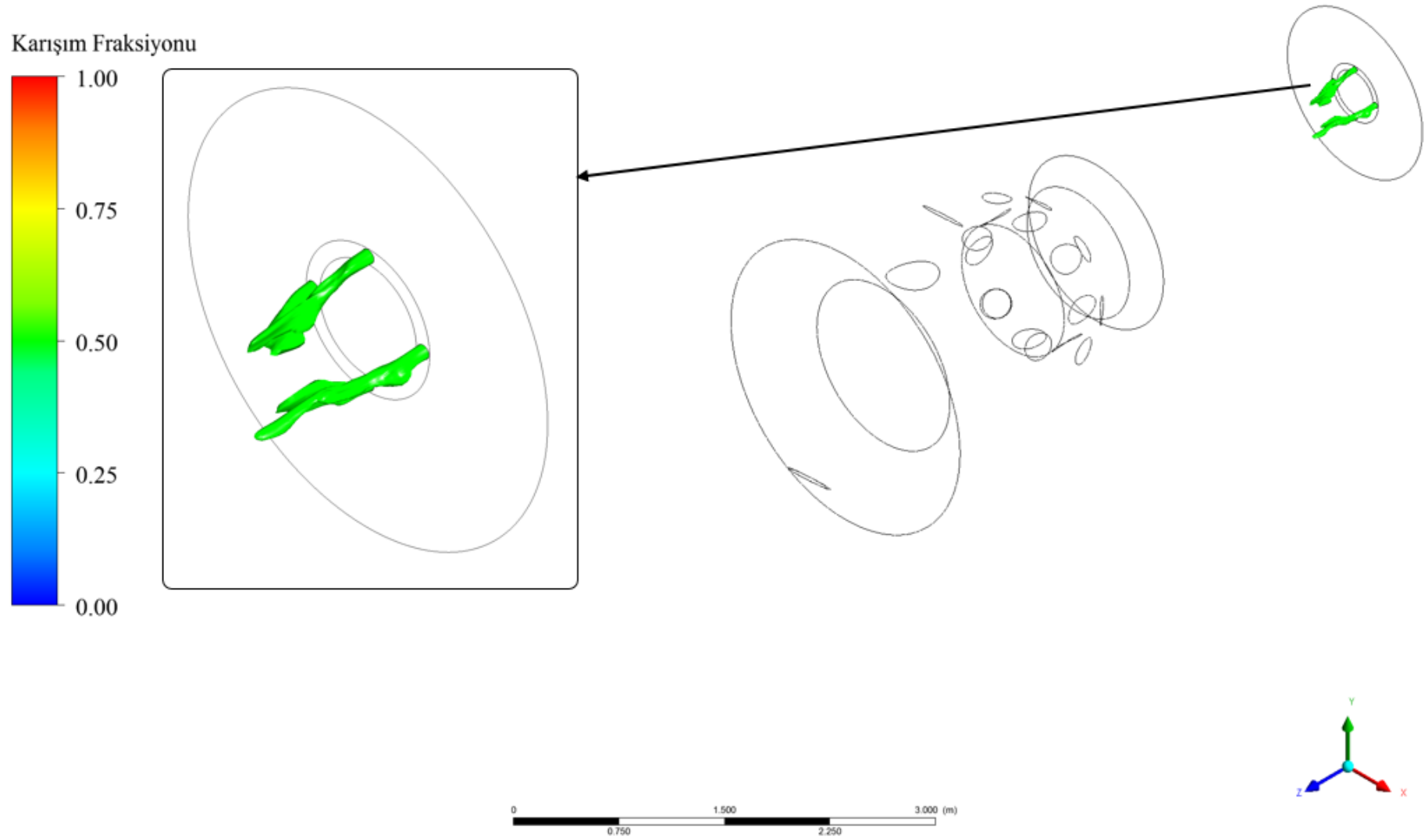
Bileşenler	a	b	c	d	Sıcaklık Aralığı (K)
CH ₄	19.89	5.024x10 ⁻²	1.269x10 ⁻⁵	-11.01x10 ⁻⁹	273-1500
C ₂ H ₆	6.9	17.27x10 ⁻²	-6.406x10 ⁻⁵	7.285x10 ⁻⁹	273-1500
C ₃ H ₈	-4.04	30.48x10 ⁻²	-15.72x10 ⁻⁵	31.74x10 ⁻⁹	273-1500
C ₄ H ₁₀	3.96	37.15x10 ⁻²	-18.34x10 ⁻⁵	35x10 ⁻⁹	273-1500
C ₅ H ₁₂	6.774	45.43x10 ⁻²	-22.46x10 ⁻⁵	42.29x10 ⁻⁹	273-1500
N ₂	28.9	-0.1571x10 ⁻²	0.8081x10 ⁻⁵	-2.873x10 ⁻⁹	273-1800
O ₂	25.48	1.520x10 ⁻²	-0.7155x10 ⁻⁵	1.312x10 ⁻⁹	273-1800
CO ₂	22.26	5.981x10 ⁻²	-3.501x10 ⁻⁵	7.469x10 ⁻⁹	273-1800
H ₂ O (g)	32.24	0.1923x10 ⁻²	1.055x10 ⁻⁵	-3.595x10 ⁻⁹	273-1800



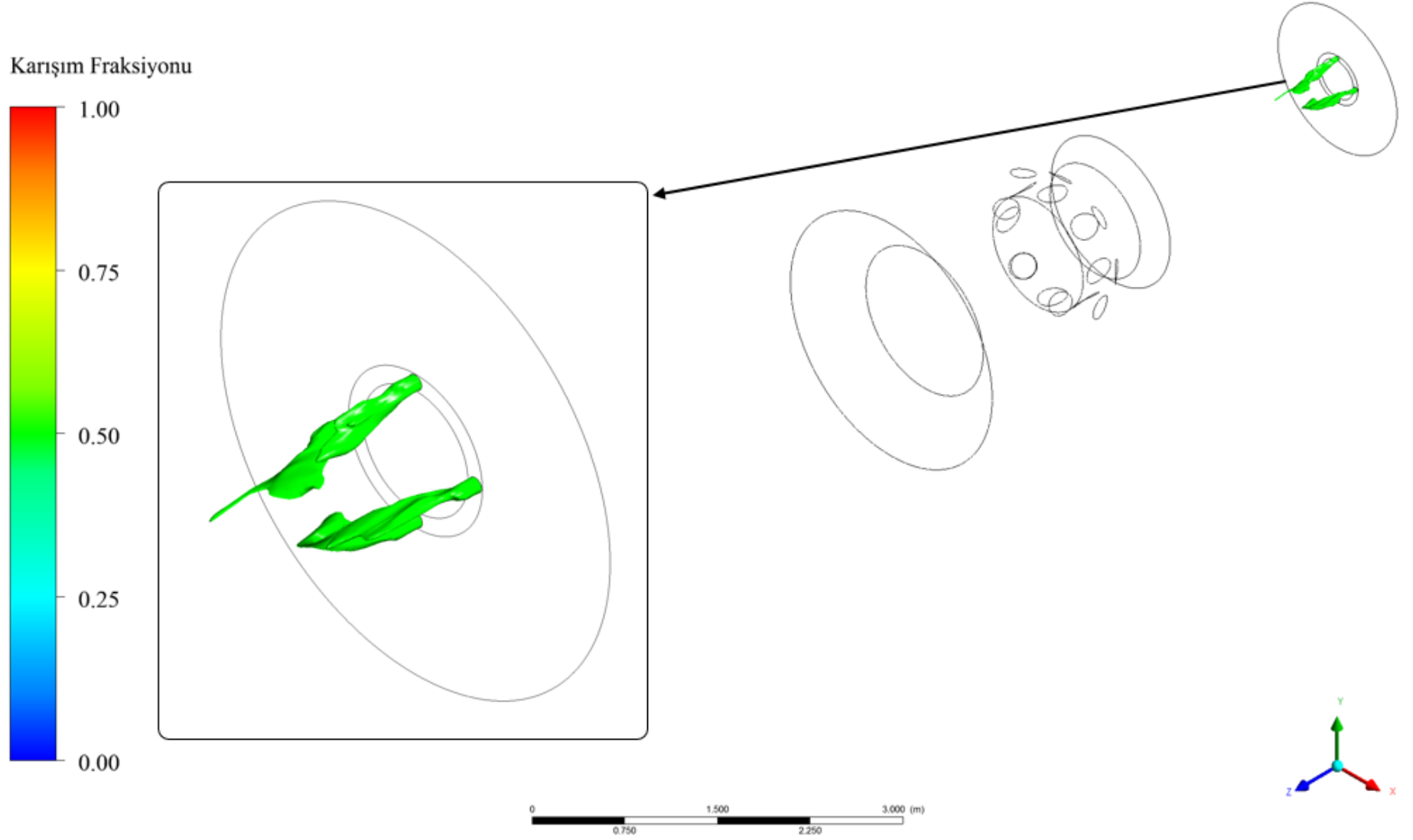
Ek Şekil 1.1. Mevcut çalışma durumu için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.75 olması durumu



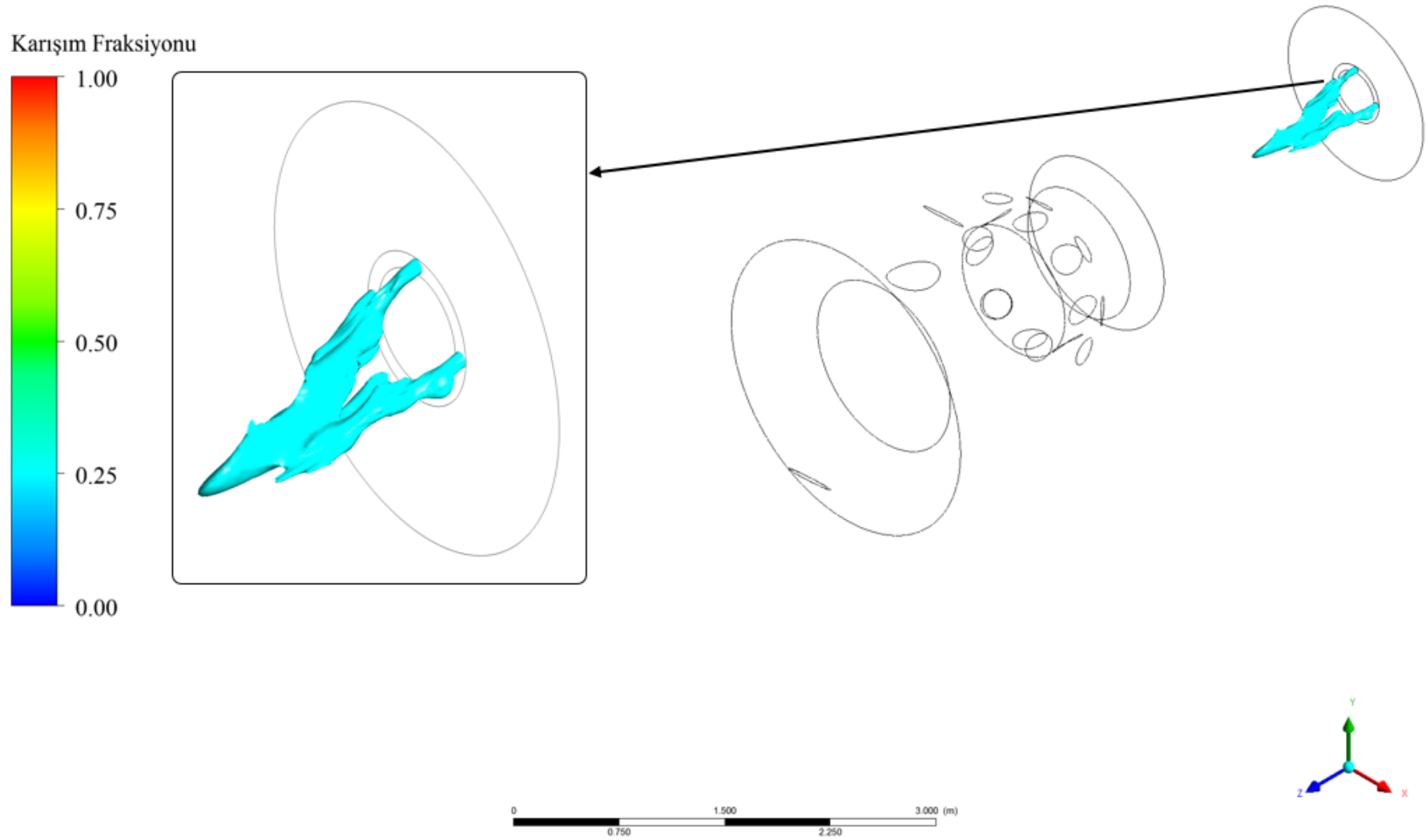
Ek Şekil 1.2. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.75 olması durumu



Ek Şekil 1.3. Mevcut çalışma durumu için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.50 olması durumu

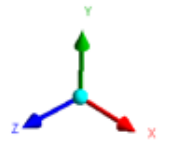
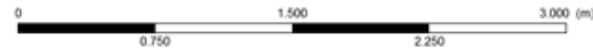
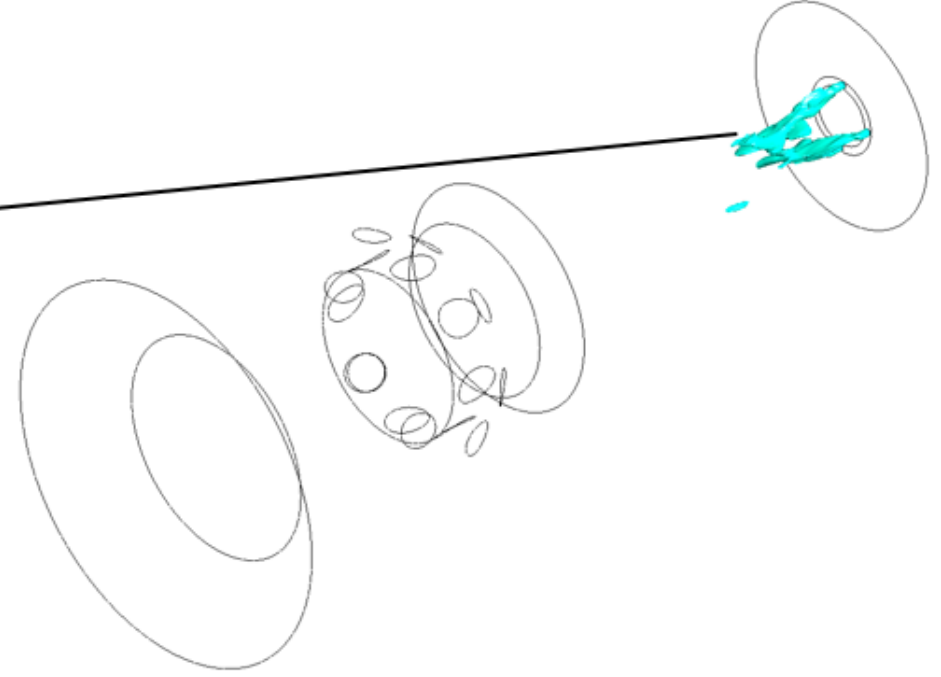
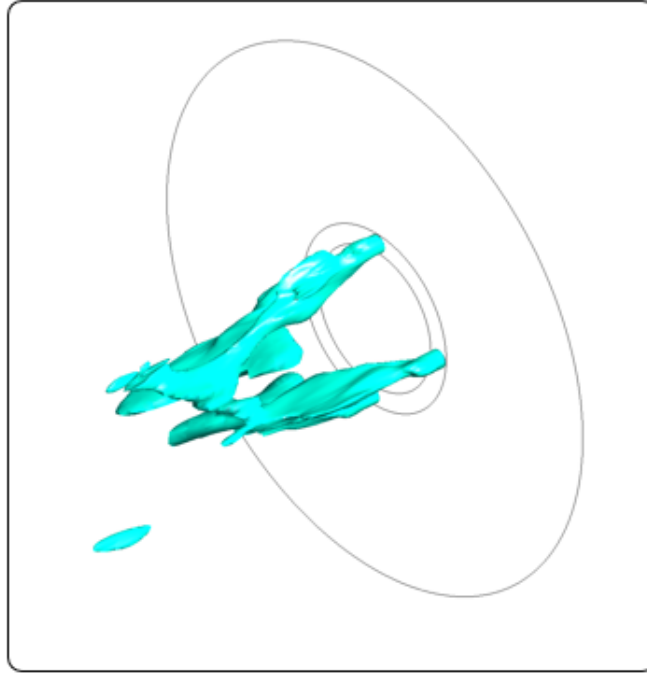
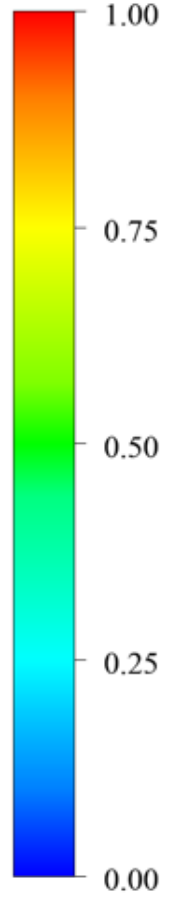


Ek Şekil 1.4. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.50 olması durumu

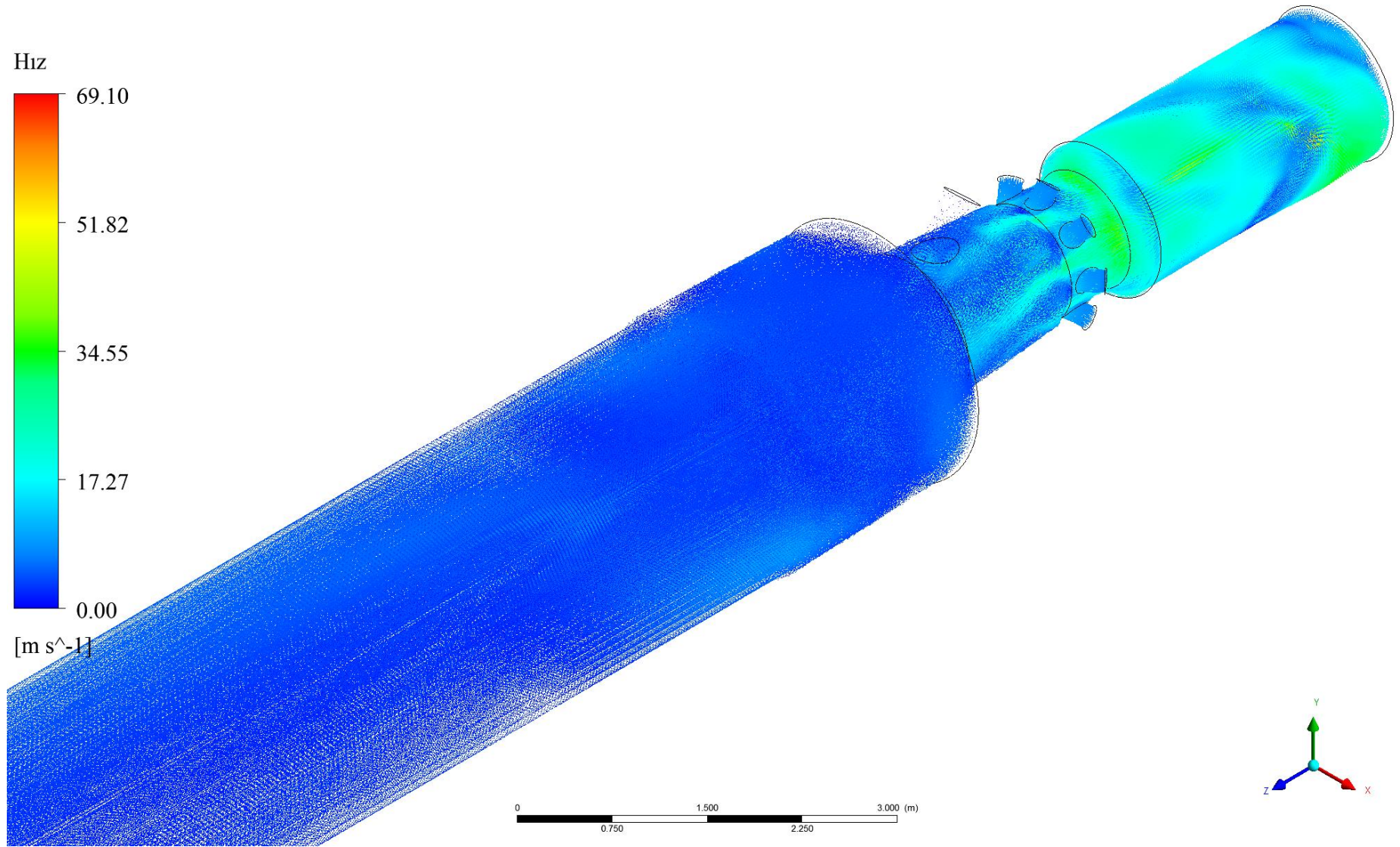


Ek Şekil 1.5. Mevcut çalışma durumu için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.25 olması durumu

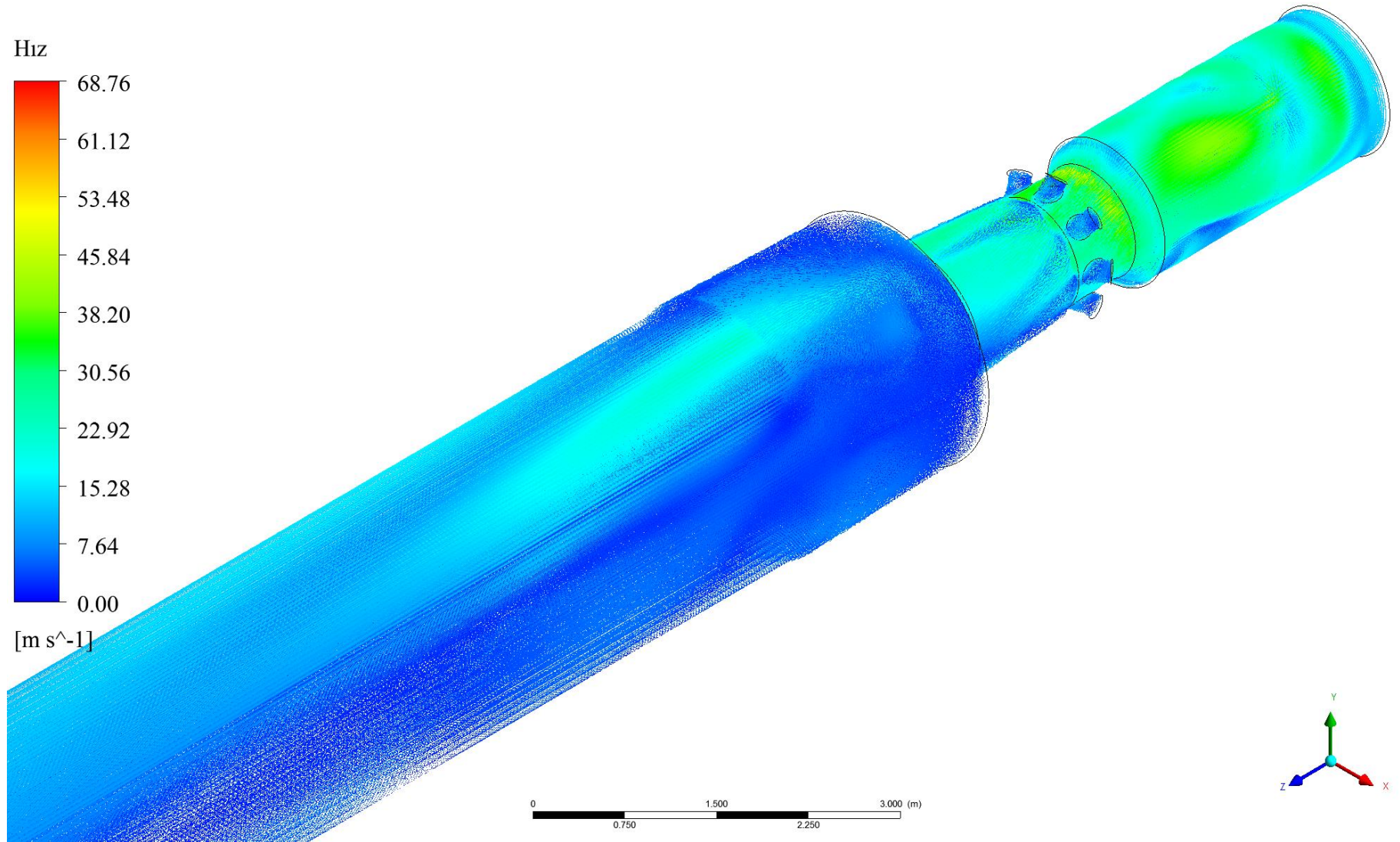
Karışım Fraksiyonu



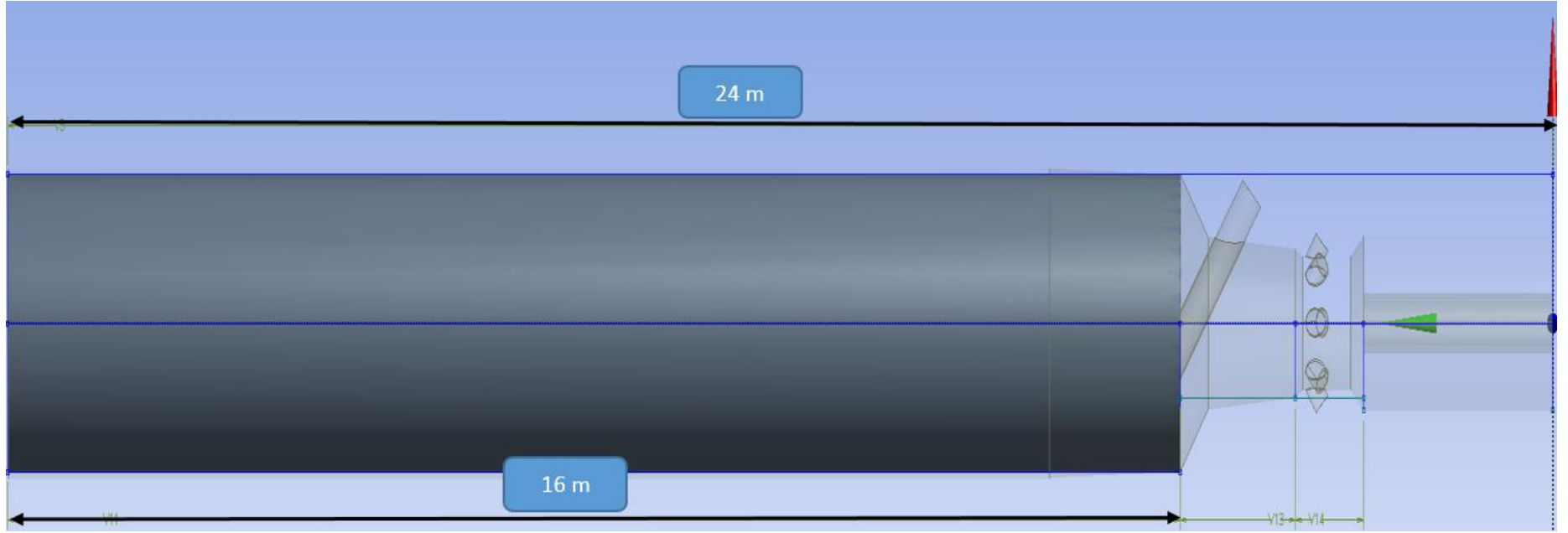
Ek Şekil 1.6. İkinci durum için elde edilen yakıtın karışım fraksiyonunun 0.25 olması durumu



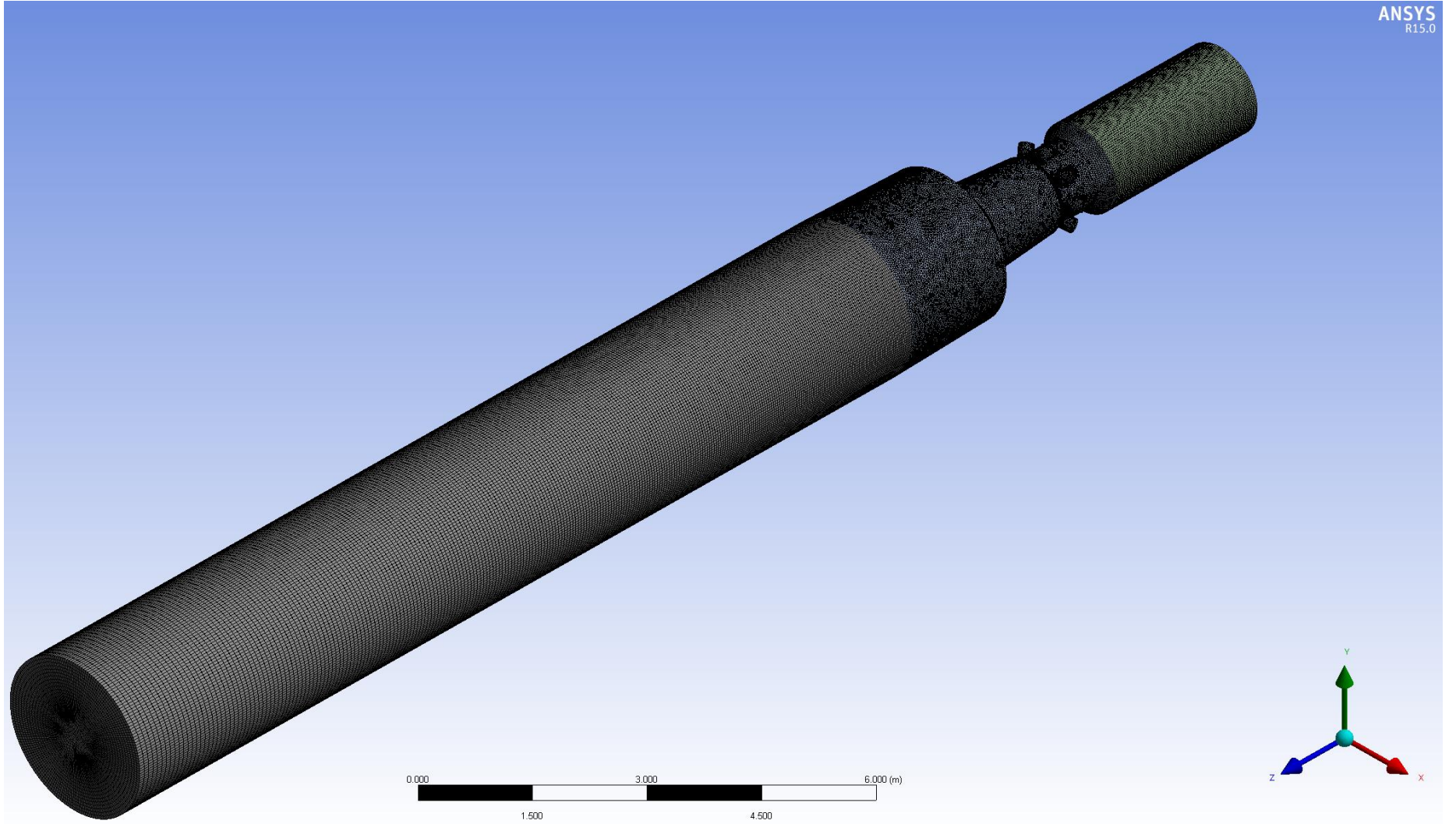
Ek Şekil 1.7. Mevcut çalışma durumu için döner fırın içerisindeki hız vektörlerinin gösterilişi



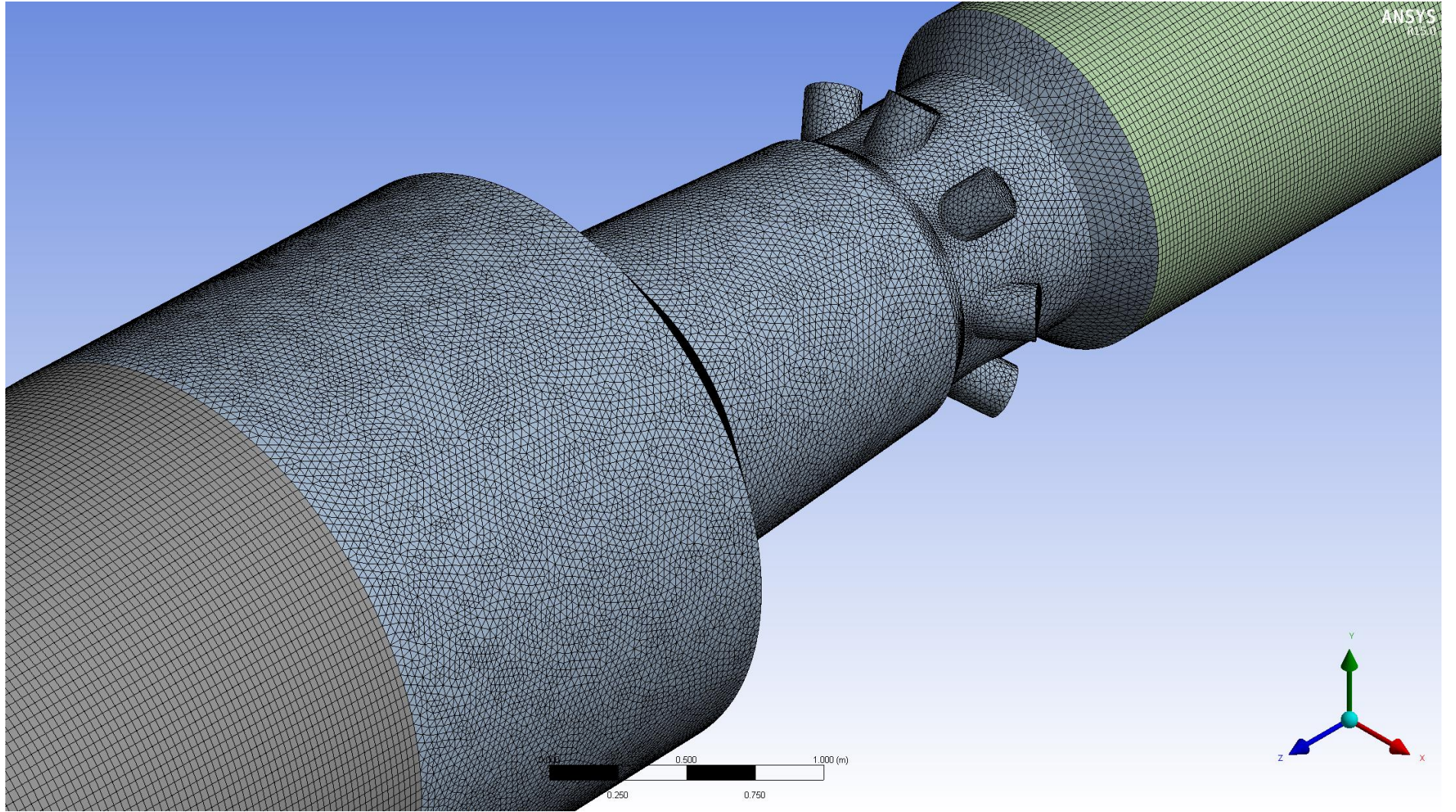
Ek Şekil 1.8. İkinci durum için döner fırın içerisindeki hız vektörlerinin gösterilişi



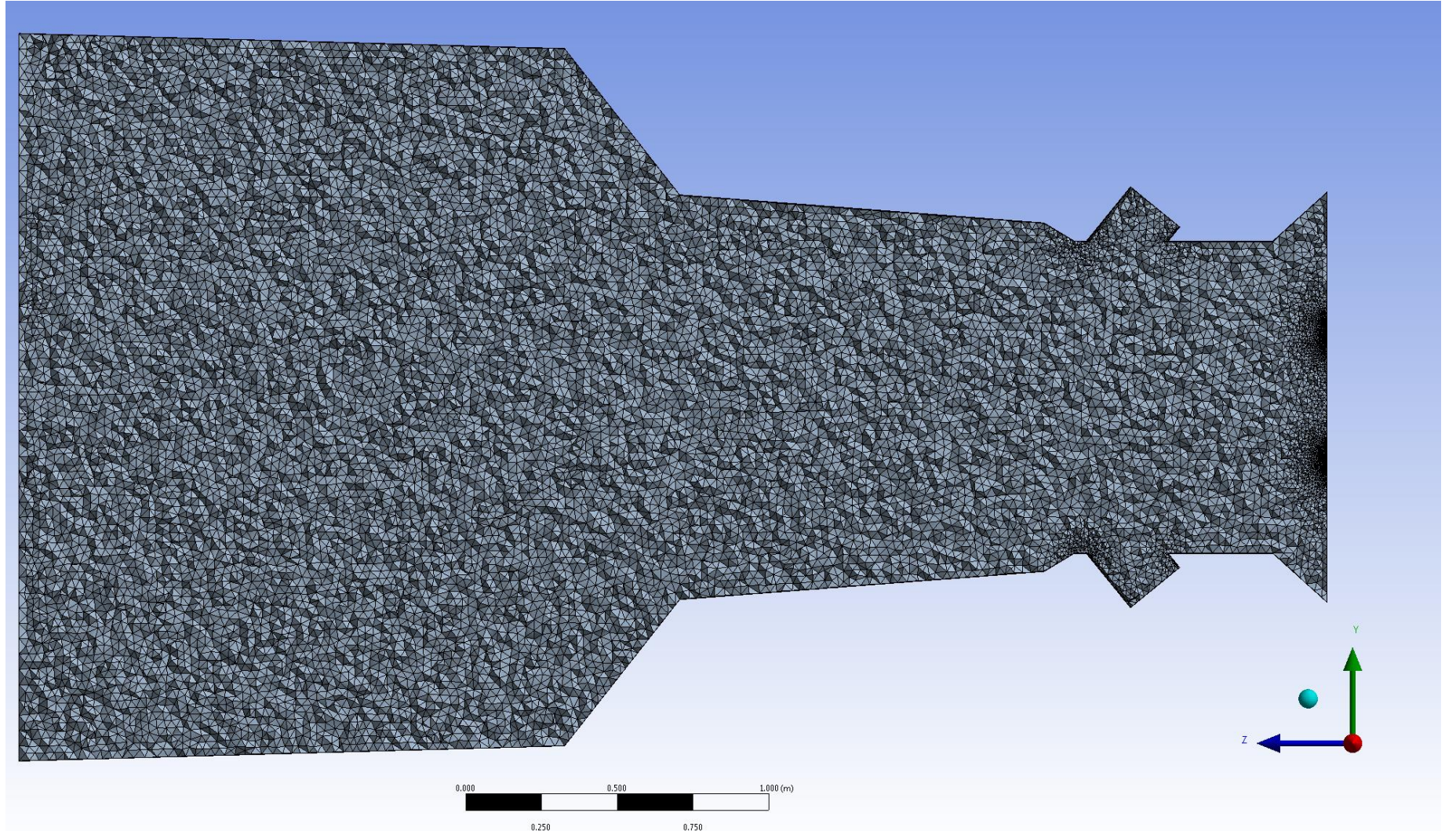
Ek Şekil 1.9. Döner fırının geometrik ölçüleri



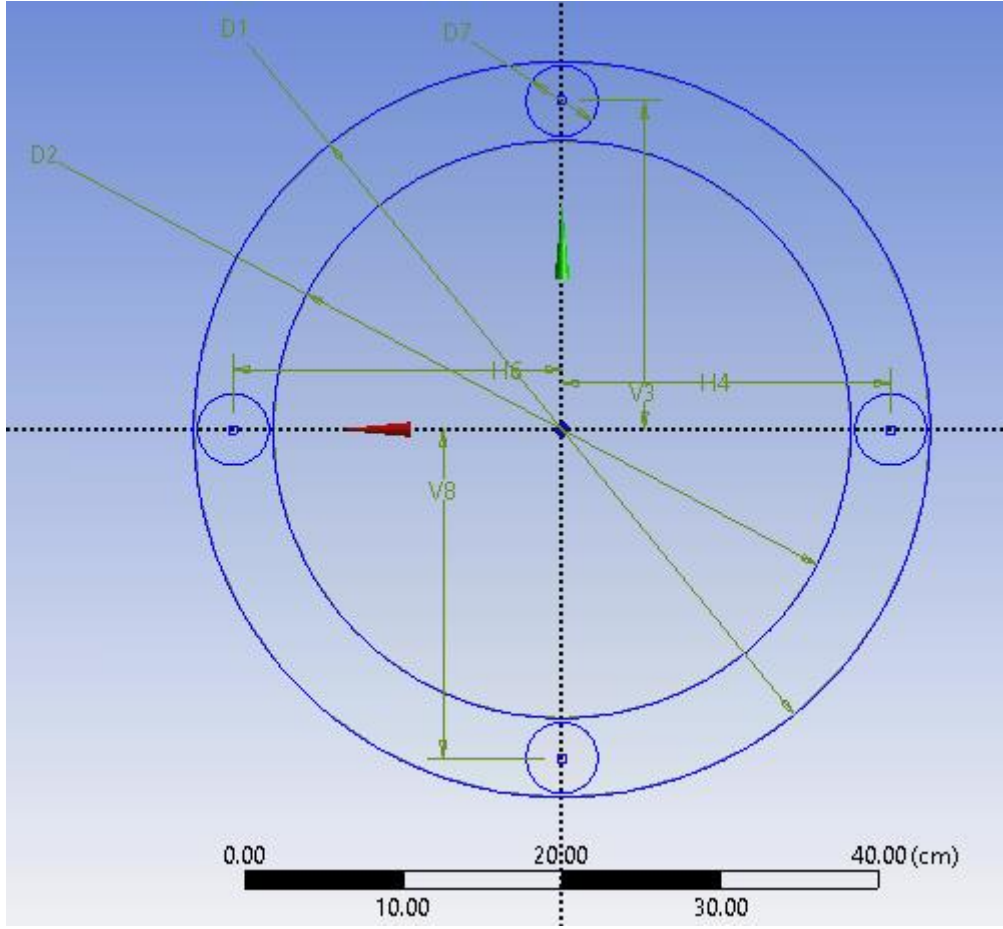
Ek Şekil 1.10. Döner fırının ikinci durum için oluşturulan genel ağ yapısı



Ek Şekil 1.11. İkinci durum için oluşturulan yanma odası, alçı taşı ve baca gazı geri dönüşüm girişi



Ek Şekil 1.12. Baca gazlarının döner fırına giriş yaptığı bölümün kesit görünüşü ve ağ yapısı



Ek Şekil 1.13. Brülörün geometrik ölçüleri

Ek Tablo 1.8. Ek Şekil (1.12.)’da gösterilen brülörün geometrik ölçüleri

Simgeler	Ölçü (cm)
D1	46.5
D2	36.5
D7	4.5
H4	20.75
H6	20.75
V3	20.75
V8	20.75

ÖZGEÇMİŞ

Mert GÜRTÜRK, 07 Ocak 1984 yılında Elazığ’da doğmuştur. İlköğrenimini Elazığ’da tamamlamıştır. Orta Öğrenimini Elazığ Endüstri Meslek Lisesinin Motor bölümünde gördükten sonra, 2003 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Bölümü Otomotiv Öğretmenliği programına kayıt yapmış ve bu bölümden 2007 yılında mezun olmuştur. 2009 yılı Şubat ayında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında lisansüstü eğitime başlamıştır. Lisansüstü eğitimini güneş enerji ve ısı depolama konuları üzerinde yapmış olduğu yüksek lisans tezini sunarak, 2011 yılında mezun olmuştur. Yine 2011 yılında, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı Enerji Programında Doktora başlamıştır. 2014 yılında, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi kadrosuna atanmış olup, halen bu görevine devam etmektedir.