

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

MAKİNA ANABİLİM DALI

**HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ YAKMA SİSTEMLERİ
VE
SERAMİK SEKTÖRÜ UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OZAN MURAT AYNA

UŞAK 2012

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

MAKİNA ANABİLİM DALI

**HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ YAKMA SİSTEMLERİ
VE
SERAMİK SEKTÖRÜ UYGULAMASI**


YÜKSEK LİSANS TEZİ

OZAN MURAT AYNA

UŞAK 2012

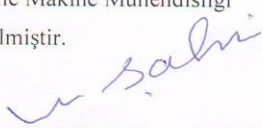
Ozan Murat AYNA tarafından hazırlanan “Hidrojenle Zenginleştirilmiş Yakma Sistemleri ve Seramik Sektörü Uygulaması” adlı bu tezin Yüksek Lisans olarak uygun olduğunu onaylarım.

((Ünvanı, Adı ve Soyadı)
Tez Danışmanı*, Anabilim Dalı



Yrd.Doç.Dr. Canan KANDİLLİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

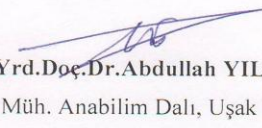
(Ünvanı, Adı ve Soyadı)**
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)


Yrd.Doç.Dr. Mükerrerem ŞAHİN
Enerji Müh. Anabilim Dalı, Yıldırım Bayezit Ün.

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)***
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)



Yrd.Doç.Dr. Canan KANDİLLİ
Makine Müh. Anabilim Dalı, Uşak Ün.

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)


Yrd.Doç.Dr. Abdullah YILDIZ
Makine Müh. Anabilim Dalı, Uşak Ün.

Tarih****: 03/07/2012

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.


Yrd.Doç.Dr. Mehmet AKTAŞ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezin tasarımında, hazırlanmasında, yürütülmesinde, araştırmaların yapılmasında ve bulguların analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini, bu çalışmaların birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atıf yapıldığını beyan ederim.

Ozan Murat AYNA

Bu sunum küresel ekonominin büyümesi, nüfus artışı, enerji tüketimi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik politikalar, enerji eldesi ve kaynakları konularında geleceğe yönelik ifadeler içermektedir. Geleceğe yönelik ifadeler olaylara ilişkin olduğundan ve gelecekte oluşacak ya da oluşma ihtimali bulunan şartlara dayandığından çeşitli riskler ve belirsizlikler içerir. Gerçekleşen sonuçlar ürün tedariki, talebi ve fiyatlandırması, siyasi istikrar, genel ekonomik şartlar, yasal ve düzenleyici gelişmeler, yeni teknolojilerin bulunması, doğal afetler ve olumsuz hava şartları, savaşlar, terörizm ve sabotaj olayları ile bu sunumda ele alınan diğer faktörler dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre farklılık gösterebilir.

HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ YAKMA SİSTEMLERİ

VE

SERAMİK SEKTÖRÜ UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

OZAN MURAT AYNA

UŞAK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2012

ÖZET

Pek çok inşaat malzemeleri alt sektörü enerji yoğun proseslere sahiptir. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı olması (petrolün %90'a yakın bir kısmı, doğalgazın %97'si ve kullanılan kömürün %20'si) ve enerji fiyatları açısından dünyadaki en pahalı enerjiyi kullanan ülkeler arasında yer alması, sektörün maliyetlerini oldukça artırmaktadır. Bu alt sektörlerden seramik sektörü, üretim prosesi içindeki pişirme ve kurutma işlemlerinden dolayı, oldukça yoğun enerji tüketen bir sektördür. Seramik sektörünün üretim maliyetleri içinde enerjinin payı diğer sektörlerle oranla oldukça yüksektir. Katma değeri en yüksek sektörlerden biri olan seramik kaplama malzemeleri sektöründe enerji için genel maliyet içinde %30 gibi bir oran söz konusudur ki seramik sektöründe enerji fiyatları büyük bir önem taşımaktadır. Temel girdi maliyetleri ana kalem olan sektörde; Türkiye'deki sanayi doğalgaz kullanımının %20'sini, sanayi elektrik kullanımının ise %10'unu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, doğalgazla çalışan bir seramik fırınının yakıt sistemine elektrolizle elde edilmiş hidrojenin farklı seramik üretimleri için farklı oranlarda, çok noktadan (her yanma hücrelerine-brülöre ayrı ayrı) ve tek noktadan (ana doğalgaz hattına doğrudan) ilavesinin verime ve doğalgaz tüketimine etkisinin deneysel sonuçları ile değerlendirilmesi, termodinamik ve ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada, Uşak ilinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında bulunan 102 brülör içeren seramik fırınında hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz yanma deneyleri gerçekleştirilmiş, birinci ve ikinci yasayı kapsayan enerji ve ekserji analizi ortaya konmuş, “Net Bugünkü Değer” yöntemi izlenerek sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

40x40 yer karosu pişirme prosesinde minimum doğalgaz tüketiminin gerçekleştiği optimum hidrojen debisi; çoklu nokta enjeksiyonu için 1,0752 kg/h, tek noktadan enjeksiyon içinse 1,1592 kg/h olup, enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla çoklu nokta enjeksiyonu için %63,13 ve %43,12, tek nokta içinse %62,63 ve %42,74’tür.

25x40 yer karosu pişirme prosesinde minimum doğalgaz tüketiminin gerçekleştiği optimum hidrojen debisi ise ; çoklu nokta enjeksiyonu için 0,756 kg/h, tek noktadan enjeksiyon içinse 0,9576 kg/h olup, enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla çoklu nokta enjeksiyonu için %65,08 ve %41,72, tek nokta içinse %63,53 ve %40,55’tir.

Çalışma sonucunda hidrojenle zenginleştirme sisteminin ortalama 3. aydan itibaren yatırım maliyetini geri ödeyen verimli bir sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 625.05.00

Anahtar Kelimeler : Hidrojen zenginleştirilmiş yanma sistemi, enerji ve ekserji analizi, seramik endüstrisi.

Sayfa Adedi : 141

Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr.Canar KANDİLLİ

THE HYDROGEN-ENRICHED COMBUSTION SYSTEMS**AND****APPLICATION FOR CERAMIC INDUSTRY****(M.Sc. Thesis)****OZAN MURAT AYNA****USAK UNIVERSITY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****JUNE 2012****ABSTRACT**

Many building materials sub-sector has energy-intensive processes. To be dependent on foreign energy (a portion close to 90% of oil, 97% of natural gas and 20% of coal) and Turkey in terms of energy prices to be among the countries using the world's most expensive energy, greatly increase the costs of the sector. The ceramic industry sub-sectors, due to firing and drying process in the production line, are very high energy consuming sectors. The share of energy in the ceramic industry of the production costs are very high, compared to other sectors. One of the sectors with the highest added value, for the overall cost of ceramic production, the energy has a proportion of 30% as energy prices has great importance in the ceramic industry. Basic input costs, which is the main item in this industry that, in Turkey 20% industrial natural gas usage, and 10% industrial electricity usage are belong to ceramic industry.

Optimum hydrogen flow rates were determined as 1,0752 kg/h and 1,1592 kg/h for multiple-point and single-point applications respectively. Energy efficiencies were found as 63,13% and 62,63% and exergy efficiencies were reached as 43,12% and 42,74% for multiple-point and single-point applications respectively for 40X40 ceramic tile production at the optimum hydrogen mass flow rate for the minimum natural gas consumption.

Optimum hydrogen flow rates were determined as 0,756 kg/h and 0,9576 kg/h for multiple-point and single-point applications respectively. Energy efficiencies were found as 65,08% and 63,53% and exergy efficiencies were reached as 41,72% and 40,55% for multiple-point and single-point applications respectively for 25X40 ceramic tile production at the optimum hydrogen mass flow rate for the minimum natural gas consumption. It is concluded that the hydrogen enrichment system has a short payback time after the first three months of operation in the present study.

Science Code : 625.05.00

Key Words : Hydrogen enriched combustion system, energy and exergy analysis, ceramic industry.

Page Number : 141

Adviser : Asist. Prof. Dr. Canan KANDILLI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince desteğini benden esirgemeyen, bilimsel bakış açımın gelişmesi için bilgi birikimiyle çalışmama yön veren ve bunu tüm sabrıyla sonuna kadar gerçekleştiren Değerli Danışmanım Yrd. Doç. Dr. Canan KANDİLLİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte ve iş hayatımda desteğini her zaman hissettiğim başta İsmail TANIŞ olmak üzere tüm Uşak Seramik Sanayi A.Ş. çalışma arkadaşlarıma, deney düzeneğinin kurulması, sağladığı veriler ve araştırma olanakları için Dr. Mükerrer ŞAHİN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Özveri ve sabırla sonuna beraber geldiğimiz bu süreçte, tüm eğitim hayatımda ve yaşamımın her anında bana olan güvenini hiç yitirmeyen, her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını tüm hayatımda izinden gittiğim ve özlediğim babam Hasan AYNA' ya ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. SERAMİK SEKTÖRÜ VE ENERJİ.....	4
2.1. Seramiğin Tarihi.....	4
2.2. Seramik Üretimi.....	6
2.2.1. Hammadde Stoklama ve Kırma.....	6
2.2.2. Tartma.....	6
2.2.3. Sulu ve Kuru Öğütme.....	7
2.2.4. Granül Haline Getirme (Masse Hazırlama).....	8
2.2.5. Şekillendirme.....	9
2.2.6. Kurutma.....	10
2.2.7. Frit ve Sır Hazırlama - Sırlama.....	11
2.2.8. Fırında Pişirme.....	12
2.2.9. Kalite Ayırım ve Paketleme.....	12

2.2.10. Seramik Üretiminde Tasarım ve Teknoloji.....	15
2.3. Karo Çeşitleri.....	18
2.3.1. Yer Karosu.....	18
2.3.2. Duvar Karosu.....	18
2.3.3. Porselen Karo.....	18
2.3.3.1. Sırlı Porselen Karo.....	19
2.3.3.2. Sırsız Porselen Karo.....	19
2.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin Kullanım Alanları.....	19
2.5. Türkiye ve Dünya Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü.....	20
2.6. Seramik Sektöründe Enerji Tüketimi.....	24
3. ENERJİ.....	26
3.1. Enerji Verimliliği.....	30
3.1.1. İklim ve Gelecek.....	31
3.2. Enerji ve Türkiye.....	32
4. HİDROJEN.....	34
4.1. Hidrojenin Özellikleri.....	37
4.2. Hidrojen Üretimi.....	40
4.2.1. Doğalgazın Buhar Reformasyonu.....	42
4.2.2. Parçalı Oksidasyon.....	42
4.2.3. Doğalgazın Termal Olarak Parçalanması.....	42
4.2.4. Kömür Gazlaştırma.....	43
4.2.5. Biyokütleden Hidrojen Üretimi.....	43
4.2.6. Elektroliz.....	44

4.2.7. Suyun Direk Termal Ayrışması (Termoliz).....	47
4.2.8. Termokimyasal Çevrimler.....	47
4.2.9. Fotoliz.....	47
4.2.10. Fotoelektrokimyasal Sistemler.....	48
4.2.10.1. Fotobiyolojik Sistemler.....	48
4.2.11. Bor Minerali ve Hidrojen Üretimi.....	49
4.3. Hidrojen Üretimle İlgili Öneriler.....	50
4.4. Hidrojenin Depolanması.....	50
4.4.1. Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama.....	51
4.4.2. Karyojenik (Dondurulmuş) Sıvı Halde Depolama.....	51
4.4.3. Metal Hidrit Sistemi ile Depolama.....	53
4.4.4. Karbon Adsorbsiyon Tekniği ile Depolama.....	54
4.4.5. Cam Mikrokürelerde Depolama.....	54
4.4.6. Yerinde Kısmi Oksidasyon ile Depolama.....	54
4.4.7. Karbon Nano Tüpler ile Depolama.....	55
4.4.8. Mağaralarda Depolama.....	55
4.5. Hidrojenin Taşınması.....	55
4.5.1. Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması.....	56
4.5.2. Sıvı Hidrojenin Taşınması.....	56
4.5.3. Metal Hidritlerin Taşınması.....	56
4.5.4. Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırılması.....	57
4.5.5. Hidrojenin Taşınması ile İlgili Öneriler.....	58
4.6. Hidrojen Kullanımında Güvenlik.....	60

4.7. Hidrojenin Kullanım Alanları.....	61
4.7.1. Hidrojenin Motorlarda Kullanımı.....	66
4.7.2. Hidrojenin Motorlarda Yakılması ile İlgili İşletim Problemleri.....	69
5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	71
6. TEZİN AMACI, ÖNEMİ, KAPSAMI.....	79
7. KURAMSAL ANALİZ.....	81
7.1. Enerji Analizi.....	81
7.2. Ekserji Analizi.....	82
7.2.1. Fiziksel Ekserji Analizi.....	83
7.2.2. Kimyasal Ekserji Analizi.....	84
7.2.3. Diğer Ekserjetik Parametreler.....	85
7.3. Ekonomik Analiz.....	85
8. SİSTEM TANITIMI VE DENEY TASARIMI.....	86
9. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	89
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	119
10.1. Sonuçlar.....	119
10.2. Öneriler.....	120
KAYNAKLAR.....	122
EK.....	129
EK - Kuramsal Analiz Sayısal Çözümlenmeleri.....	130
ÖZGEÇMİŞ.....	141

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 9.1.40X40 Yer karosu üretimi için çoklu nokta enjeksiyonunda kütle dengesi.....	89
Çizelge 9.2. 25X40 Duvar karosu üretimi için çoklu nokta enjeksiyonunda kütle dengesi.....	90
Çizelge 9.3. 40X40 Yer karosu üretimi için tek nokta enjeksiyonunda kütle dengesi.....	90
Çizelge 9.4. 25X40 Duvar karosu üretimi için tek nokta enjeksiyonunda kütle dengesi.....	91
Çizelge 9.5. 40X40 yer karosu üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	92
Çizelge 9.6. 40X40 yer karosu üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	92
Çizelge 9.7. 40X40 yer karosu üretimi tek nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	93
Çizelge 9.8. 40X40 yer karosu üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	93
Çizelge 9.9 25X40 Duvar karosu üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	94
Çizelge 9.10 25X40 Duvar karosu üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	95
Çizelge 9.11 25X40 Duvar karosu üretimi tek nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	95
Çizelge 9.12 25X40 Duvar karosu üretimi tek nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri.....	96
Çizelge 9.13 40x40 yer karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,0752 kg/h için giren ekserji analizi.....	98

Çizelge 9.14 40x40 yer karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,0752 kg/h için çıkan ekserji analizi.....	99
Çizelge 9.15 40x40 yer karosu üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,1592 kg/h için giren ekserji analizi.....	100
Çizelge 9.16 40x40 yer karosu üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,1592 kg/h için çıkan ekserji analizi.....	101
Çizelge 9.17 25X40 duvar karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,756 kg/h için giren ekserji analizi.....	103
Çizelge 9.18 25X40 duvar karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,756 kg/h için çıkan ekserji analizi.....	104
Çizelge 9.19 25X40 duvar karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,9576 kg/h için giren ekserji analizi.....	105
Çizelge 9.20 25X40 duvar karosu üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,9576 kg/h için çıkan ekserji analizi.....	106
Çizelge 9.21 40x40 yer karosu çoklu nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz.....	115
Çizelge 9.22 40x40 yer karosu tek nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz.....	115
Çizelge 9.23 25x40 duvar karosu çok nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz.....	117
Çizelge 9.24 25x40 duvar karosu tek nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz.....	117

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Kapalı stok sahası.....	7
Şekil 2.2 Tartım hopperları ve beşigeri.....	7
Şekil 2.3 Öğütücü bilyeli sulu değirmenler ve karıştırıcı havuzları.....	8
Şekil 2.4 Kuru öğütme değirmeni genel görünümü.....	8
Şekil 2.5 Spray-dryer genel görünümü.....	9
Şekil 2.6 Hidrolik presler genel görünümü.....	9
Şekil 2.7 Tek katlı yatay kurutucu genel görünümü.....	10
Şekil 2.8 Dikey kurutucu genel görünümü.....	10
Şekil 2.9 Sır hazırlama değirmenleri genel görünüm.....	11
Şekil 2.10 Sır bantları genel görünümü.....	11
Şekil 2.11 Hidrojen zenginleştirme prosesi entegre edilmiş tek katlı seramik fırını.....	12
Şekil 2.12 Kalite ayırım makinesi genel görünümü.....	13
Şekil 2.13 Paketleme makinesi genel görünümü.....	13
Şekil 2.14 3. Pişirim fırını genel görünümü.....	14
Şekil 3.1 Metan gazı ve hava ön karışımlarının hidrojenle zenginleştirilmesi sonucunda alev yüksekliğinin azalması.....	28
Şekil 8.1 Hidrojen üretim ünitesi "Hydrobor".....	87
Şekil 8.2 Seramik fırını ve hidrojen zenginleştirme sistemi.....	87
Şekil 8.2(a) Seramik fırını brulörleri.....	88
Şekil 8.2(b) Seramik fırını hidrojenle zenginleştirme sistemi tek nokta uygulaması.....	88
Şekil 8.2(c) Seramik fırını hidrojenle zenginleştirme sistemi çoklu nokta uygulaması.....	88

Şekil 9.1 40x40 Yer karosu çoklu nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi.....	107
Şekil 9.2 40x40 Yer karosu tek nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi.....	107
Şekil 9.3 25x40 Duvar karosu çoklu nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi.....	108
Şekil 9.4 25x40 Duvar karosu tek nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi.....	108
Şekil 9.5 40x40 Yer karosu çoklu nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri.....	109
Şekil 9.6 40x40 Yer karosu tek nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri.....	109
Şekil 9.7 25x40 Duvar karosu çoklu nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri.....	110
Şekil 9.8 25x40 Duvar karosu tek nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri.....	111
Şekil 9.9 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 40X40 Yer karosu çoklu nokta uygulamasında entropi üretimi.....	112
Şekil 9.10 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 40X40 Yer karosu tek nokta uygulamasında entropi üretimi.....	113
Şekil 9.11 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 25X40 Duvar karosu çoklu nokta uygulamasında entropi üretimi.....	113
Şekil 9.12 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 25X40 Duvar karosu tek nokta uygulamasında entropi üretimi.....	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
e	Spesifik Ekserji, kJ/mol
h	Entalpi, kJ/kg
m	kütle, kg
s	Spesifik Entropi (kJ/kgK)
C_p	Isıl Kapasite (kJ/kgK)
e_{ch}	Kimyasal Ekserji(kJ)
e_{ph}	Fiziksel Ekserji (kJ)
P	Basınç (bar)
P_0	Ölü Hal Basıncı (bar)
R_u	Universal Gaz Sabiti (kJ/kmolK)
T_1	Sıcaklık (K)
T_0	Ölü Hal Sıcaklığı (K)
S_{gen}	Entropi Üretimi (kW/K)
$\dot{E}x_{dest}$	Ekserji Yıkımı (kW)
$\dot{E}x_{in}$	Giren Ekserji (kW)
$\dot{E}x_{out}$	Çıkan Ekserji (kW)
η_I	Termodinamiğin I. Kanunu Enerji Verimi
η_{II}	Termodinamiğin II. Kanunu Ekserji Verimi
V_{AG}	Ayrışma gerilimi
V_{Anot}	Anot gerilimi
V_{Katot}	Katot gerilimi

Kısaltmalar	Açıklama
SKM	Seramik Kaplama Malzemeleri
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
NPV	Net Bugünkü Değer (Net Present Value)
DK	Duvar Karosu
YK	Yer Karosu
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
USD	Amerika Doları
GSMH	Gayri Safi Milli Hasıla
UV	Mor Ötesi
PEM - SPEFC	Proton değişim Membranlı - Katı Polimer Elektrolitli Yakıt Pili
AFC	Alkalin yakıt pili
PAFC	Fosforik asit yakıt pili
MCFC	Erimiş karbonat yakıt pili
SOFC	Katı oksit yakıt pili
DMFC	Direkt metanol yakıt pili
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
EGR	Eksoz gazları resirkülasyonu
CNG	Sıkıştırılmış doğalgaz
Hythane	Hidrojen-metan karışımı

1.GİRİŞ

İnsanoğlu buharın g¼c¼yle çarkları d¼nd¼rmeye başladıktan sonra gelişen teknoloji t¼m yaşamın vazgeçilemez bir unsuru haline geldi. İlk olarak k¼m¼r ve petrol sonrasında radyoaktif elementler, metrelerce derinlikten çıkarılan gazlar, esen r¼zgarlar, kaynayan sular ve g¼neřin sıcaklığı insanoğlunun modern yaşamın nimetlerinden yararlanması için yine insanoğlunun zekası sayesinde seferber edildi [1].

Maddenin ¼z¼ olan enerji, hareket etmenin, yer değiştirmenin, iş yapabilmenin kaynağıdır. Ne yazık ki; enerji kaynakları sonsuz değildir. Artan n¼fusa ve gelişen teknolojiye paralel olarak insanoğlunun enerji ihtiyacı da artmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve end¼strileřme, b¼y¼k ve hızla daha da ¼z¼lemez bir hal alan çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. D¼nya genelinde ¼lkeler enerjinin verimli ¼retilmesinin ve t¼ketilmesinin yeni yollarını keşfetmek için çalışmaktadır. Yarın sadece fosil yakıtlara dayalı enerji ile modern yaşamın s¼rd¼r¼lebilir olmadığı ortadadır.

B¼y¼mek için sanayileşmeye, sanayileşme için ucuz, temiz ve kesintisiz enerjiye, enerji için ise finans, teknoloji ve insan kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Son 10 yıllık tabloya baktığımızda dış ticaret açığımızın yarısının, yani 154 milyar USD'lik tutarın enerji ithalatından kaynaklandığı g¼r¼lecektir. T¼rkiye ekonomisinin mevcut kompozisyonu enerji ve emek yoğun sekt¼rlere dayanmaktadır; fakat bu emek ve y¼ksek maliyete karşılık halen ¼lkemizin ihracat gelirinin 1/3'¼ enerji ithalatına gitmektedir. Başta demir elik, imento, taş toprak işleme gibi enerji yoğun ihracatçı sekt¼rlerimizde enerji girdi maliyetleri rekabet denkleminin en ¼nemli değişkeni olmaya devam edecektir [1].

Enerji yoğunluğu gayri safı milli hasıla (GSMH) başına t¼ketilen birincil enerji miktarı için t¼m d¼nyada kullanılan bir parametredir. T¼rkiye'nin kişi başına enerji t¼ketimi, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma ¼rg¼t¼ (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD) ortalamasının beşte biri civarında olmasına

rağmen Türkiye'nin enerji yoğunluğu, OECD ortalamasının üzerindedir. Bu durum enerji verimliliği ilkelerine dikkat edilmediğini göstermekle birlikte enerji yoğun sektörler ile kalkınmaya çalışmamızın sonuçlarını da ortaya koymaktadır [1].

Türkiye'deki sanayi, Türkiye doğalgaz kullanımının yüzde 20'sini, sanayi elektrik kullanımının ise yüzde 10'unu oluşturmaktadır [2]. Enerji yoğun proseslere sahip sektörlerden biri de inşaat malzemeleri sektörü ve alt sektörleridir. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı olması (petrolün %90'a yakın bir kısmı, doğalgazın %97'si ve kullanılan kömürün %20'si) ve enerji fiyatları açısından dünyadaki en pahalı enerjiyi kullanan ülkeler arasında yer alması, sektörün maliyetlerini oldukça artırmaktadır [2].

İnşaat malzemeleri alt sektörlerinden seramik sektörü, üretim prosesi içindeki pişirme ve kurutma işlemlerinden dolayı, oldukça yoğun enerji tüketen bir sektördür. Seramik sektörünün üretim maliyetleri içinde enerjinin payı diğer sektörlerle oranla oldukça yüksektir. Katma değeri en yüksek sektörlerden biri olan seramik kaplama malzemeleri (SKM) sektöründe enerji genel maliyet içinde %30 gibi bir orana sahiptir ki seramik sektöründe enerji fiyatları büyük bir önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, doğalgazla çalışan bir seramik fırınının yakıt sistemine elektrolizle elde edilen hidrojenin; farklı ebat ve özelliklerdeki karo üretimleri için farklı oranlarda, çoklu noktadan (her yanma hücresine-brülöre ayrı ayrı) ve tek noktadan (ana doğalgaz hattına doğrudan) ilavesinin verime ve doğalgaz tüketimine etkisinin deneysel sonuçları ile değerlendirilmesi, termodinamik ve ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Seramik sektöründe hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz kullanan fırınların termodinamik ve ekonomik analizi üzerinde herhangi bir çalışma, ulaşılabilen literatürde bulunamamıştır. Bu durum bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük motivasyon kaynağı olmuştur.

Çalışmada, Uşak ilinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasındaki 102 brülör içeren seramik fırınında hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz yanma deneyleri gerçekleştirilmiş, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını kapsayan enerji ve ekserji analizi ortaya konmuş, "Net Bugünkü Değer (NPV)" yöntemi ışığında sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

Çalışmanın “Enerji” bölümünde, enerji kaynakları, enerji verimliliği gibi temel kavramlar incelenmiş, enerji bakımından Türkiye'nin ve Dünya'nın içinde bulunduğu durum değerlendirilmiştir. “Seramik Sektörü ve Enerji” bölümünde seramiğin üretim aşamalarına ve SKM sektörünün Türkiye için önemine yer verilmiş, üretim, ithalat ve ihracat rakamları sunulmuştur. “Hidrojen” bölümünde ise kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından incelenen hidrojenin üretim, taşıma ve depolanma prosesleri incelenmiş, kullanım alanları ele alınmıştır. Çalışmanın “Önceki Çalışmalar” bölümünde hidrojenle zenginleştirilmiş yakıt kullanan proseslere ilişkin yapılan çalışmalara yer verilmiş ve detaylı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. “Tezin Amacı, Kapsamı ve Önemi” bölümünde tezin amacı belirtilmiş ve çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran yönleri gösterilmeye çalışılmıştır. “Kuramsal Analiz” kısmında termodinamiğin 1. ve 2. yasasını içeren modellemelere yer verilmiştir. Hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz kullanan fırın için kütle, enerji ve ekserji dengeleri sunulmuştur. Sistemin ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi için yararlanılan “NPV” yöntemi açıklanmıştır. “Sistem Tanıtımı ve Deney Tasarımı” bölümünde çalışmaya konu olan fırın ve elektroliz sistemi tanıtılmış, ilgili deney düzeneği ve yöntemi açıklanarak deney verilerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. “Bulgular ve Tartışma” bölümünde farklı ebat ve özelliklerdeki karo üretimlerine, farklı ilave yöntem ve oranlarında gerçekleşen doğalgaz ve hidrojen tüketimine ilişkin ölçülen veriler ışığında elde edilen sayısal sonuçlar, tablolar ve grafikler sunulmuş ve tartışılmıştır. Optimum hidrojen debisi, doğalgaz tüketiminin minimum olduğu duruma göre belirlenmiştir. Tek nokta ve çoklu nokta hidrojen enjeksiyonu durumları için enerji ve ekserji verimleri ortaya konmuştur. Entropi üretimi, çevre koşullarının sistem performansına etkilerini araştırmak için farklı referans (ölü hal) sıcaklıklarında irdelenmiştir. Sistemin maliyet analizi optimum hidrojen debisi için NPV yöntemine göre ortaya konmuştur. “Sonuç ve Öneriler” bölümünde bütün analiz sonuçları değerlendirilmiş, araştırmanın gelecek çalışmalara konu olabilecek yönleri incelenmiştir.

2. SERAMİK SEKTÖRÜ ve ENERJİ

Hava, su, ateş ve toprağın birlikteliğiyle ortaya çıkan ve geçmişten günümüze gelişen seramik sektörü, istihdam ve ihracat rakamlarıyla Türkiye'nin katma değeri yüksek lokomotif sektörleri arasında yer almaktadır.

Alışıl gelmiş olarak genellikle tabak, çanak-çömlek, biblo gibi eşyaların tanımlanmasında kullanılan "seramik"; yapı işlerinde kullanılmak üzere tuğla, kiremit, duvar ve yer karoları, ev eşyası olarak mutfak ve süs eşyaları, ısıya dayanıklı malzeme olarak ateş tuğlası, karbon tuğla, aşındırıcı malzeme olarak zımpara taşları, sentetik elmas, medikal ve tıp malzemesi; yani biyo-seramikler olarak seramik kemikler, seramik dişler, nükleer reaktörlerde yakıt sistemi seramikleri, mekanik olarak piston ve yataklarda, enerji iletim sistemlerinde süper iletken seramik olarak ve yüksek gerilim izolatörlerinde yalıtım malzemesi olarak, cam ürünlerinde, metal işleme fırınlarında, optik cihazlarda, haberleşmede, uzay araştırmalarında karşımıza çıkmaktadır.

Seramik karolar, genellikle yer ve duvar kaplamalarında kullanılan, çoğunlukla kil, kaolen, feldspat, dolomit, wollastonit, pirofillit, mermer, kuvars gibi inorganik hammaddelerin ve boya, oksit, frit, pegmatit, korund, çinko oksit, mermer, boraks, zirkon sır gibi yardımcı maddelerin belirli reçeteler dahilinde karıştırılmasıyla, kalıptan çekme ve döküm metoduyla ya da daha yaygın olarak oda sıcaklığında preslenerek üretim hattına sokulan, daha sonra kurutulup istenen özellikleri kazandırmaya yeterli olacak sıcaklıklarda pişirilen, kalınlıkları ve boyutları ihtiyaca ve türüne göre değişen plakalardır. Seramik, doğadan, doğal yollarla elde edilen maddelerden yapıldığı için sağlıklıdır, ekolojiktir. Karolar sırlı veya sırsız, desenli ya da desensiz üretilebilirler, yanmazlar ve ışıktan etkilenmezler.

2.1. Seramiğin Tarihi

Eski çağlardan zamanımıza kadar günlük yaşantımızın büyük bir bölümünde karşımıza çıkan seramiğin geçmişine bakıldığında, insanlık tarihinin hiçbir evresinde vazgeçilemeyen, doğaya saygılı ve sanatsal yönüyle de öne çıkan büyük bir buluş

olduğu ve insanoğlunun gelişimini ve uygarlık tarihini ortaya koyduğu görülür. Bugün geçmiş uygarlıkların tarihine baktığımızda dini idollerden mimari elemanlara, mutfak ve süs eşyalarından haberleşme tabletlerine kadar her yerde seramiklerle karşılaşmaktayız.

Önceleri avlanarak, çevresindeki yenilebilir besinleri toplayarak yaşama savaşı veren insanoğlu, İ.Ö. 10.000-8.000'den sonra yerleşik hayata geçmiş ve ilk seramik üretimine bu çağlarda başlamıştır. Bu aşamada insanoğlu doğada bulduğu malzemeleri birbirine katarak yüzyıllar boyu vazgeçemeyeceği ilk özgün seramik eserlerini ortaya koymuştur. Uygarlığın başlangıcında önce suyu, sonra toprağı, sonra ateşi kullanan insanoğlu, zekasını, yaratıcılığını ve kabiliyetini 8000 yıl önce bir araya getirmiş, tarih boyunca Lidya, Hitit, Urartu, Bizans, Selçuklu, Osmanlı gibi sayısız uygarlığa kapılarını açmış, bereketli topraklarında farklı kültürleri ağırlamış, insanlık tarihinin en önemli zamanlarına tanıklık etmiş Anadolu'da, milattan önce 6.000'de Çatalhöyük'te ilk seramikleri ortaya çıkarmıştır. Bunun için; Mısır'ın 1000, Çin'in ise 2000 yıl daha beklemesi gerekmektedir [3].

Anadolu'da ortaya çıkan seramik, 1950'li yıllardan itibaren Türkiye'de endüstriyel anlamda üreilmeye başlanmıştır. Seramik karo üretimi Anadolu'ya Selçuklular tarafından Orta Asya'dan getirilmiş ve Osmanlılar döneminde İznik ve Kütahya bölgelerinde altın çağını yaşamıştır. Ticari anlamda seramik üretimine ise 1960'larda adım atılmış, endüstriyel anlamda üretime başlayan Türk Seramik Sektörü kısa sayılabilecek bu süre içinde dünyanın en büyük seramik üreticilerinden biri konumuna gelmiştir [4].

Güzellik, estetik ve sanatın bütünleştiği bu topraklar şimdi Türk Seramiğinin kaliteli ürünlerine hayat vermektedir. Eski uygarlıkların seramik olarak değerlendirdiği topraklar bugün yine seramik olarak yine bu topraklardan bu sefer tüm dünyaya yayılmakta ve yaşama estetik katarken aynı zamanda da yaşamı kolaylaştırmaktadır.

2.2. Seramik Üretimi

SKM üretiminde kil, kaolen, feldspat, kuvars gibi ana hammaddeler ile frit, zirkon, korund, çinko oksit, boraks, asit borik, talk, volastonit, renk verici metal oksitler ve seramik boya ları gibi maddeler kullanılır. Ana hammaddeler çoğunlukla Türkiye'de bulunmaktadır. Bazı ana hammaddeler ve yardımcı hammaddelerden zirkon, korund, bazı seramik boya ları, oksitler ve kimyasal maddeler ithal edilmektedir.

Üretim prosesleri genel olarak sıralandığında seramik üretimi, hammadde stoklama ve kırma, tartma, bilyeli değirmenlerde sulu olarak ya da kuru öğütme prosesiyle susuz olarak öğütme, püskürtücülü kurutucularda ya da kuru öğütme prosesiyle püskürtücü kurutucular kullanılmadan granulatörlerde granül haline getirme (masse hazırlama), preste plaka halinde şekillendirme, kurutma, frit ve sır hazırlama, karo yüzeyini sırlama ve dekorlama (sırlama ve dekorlama işlemi karoya göre pişirim prosesinden önce de gerçekleşebilir), fırında pişirme, kalite sınıflarına ayırma ve paketleme süreçlerini içerir.

2.2.1. Hammadde Stoklama ve Kırma

Türkiye'de seramik üretici firmalar hammadde ihtiyaçlarını çoğunlukla kendi maden ocaklarından sağlamaktadırlar. Stok sahasında depolanan hammaddeler çeşitli kırıcılardan geçirilerek ufaltılmakta ve homojenleştirilmektedir.

2.2.2. Tartma

İşletme kapalı stok sahasına taşınan kırılmış hammadde üretilecek karo türüne göre hazırlanmış reçeteler esas alınarak iş makineleriyle kuru öğütme "hopper"larına ya da sulu öğütme "beşiger"lerine yüklenerek tartılır ve reçete oranları sağlandığında öğütülmek üzere işletmeye alınır. Şekil 2.1'de firmanın kapalı stok sahası görülmektedir.



Şekil 2.1 Kapalı stok sahası

Şekil 2.2'de ise tartımların gerçekleştiği kuru öğütme "hopper"ları (sağda) ve "beşiger"ler (solda) görülmektedir.



Şekil 2.2 Tartım "hopper"ları ve "beşiger"i

2.2.3. Sulu Ve Kuru Öğütme

Öğütücü bilyeli sulu değirmenlerde ya da kuru öğütme hattında üretime göre belirlenmiş sürelerde öğütülen hammaddeler, eleklerden ve manyetik ayırıcılardan

geçirilir. Sulu öğütülen çamur stok havuzlarına aktarılır Şekil 2.3'te çalışmaya temel oluşturan deneylerin gerçekleştiği firmadaki öğütücü bilyeli sulu değirmenler ve Şekil 2.4'te kuru öğütme değirmeni görülmektedir.



Şekil 2.3 Öğütücü bilyeli sulu değirmenler ve karıştırıcı havuzları



Şekil 2.4 Kuru öğütme değirmeni genel görünümü

2.2.4. Granül Haline Getirme (Masse Hazırlama)

Sulu değirmenlerde elde edilen masse çamuru stok havuzlarından alınarak, "Spray Dryer" denilen püskürtmeli kurutucularda granül haline getirilir. Kuru öğütme

prosesinde ise sulu değirmenler olmayıp, hammadde mekanik yolla öğütülür ve en son "granulatör"de granül halini alır. Şekil 2.5'te spray dryer ünitesi gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Spray-dryer genel görünümü

2.2.5. Şekillendirme

Granül masse silolarda homojenleşme ve olgunlaşma için bir süre bekletildikten sonra hidrolik preslerde istenilen karo formunda üretilen kalıplarda ihtiyaç duyulan basınçta preslenir. Şekil 2.6'da hidrolik presler görülmektedir.



Şekil 2.6 Hidrolik presler genel görünümü

2.2.6. Kurutma

Presten çıkan karolar yatay ya da dikey kurutucularda kurutulur. Yatay ve dikey kurutucular arasındaki farklar, kapasite ve kurutma süreleridir. Şekil 2.7'de yatay, Şekil 2.8'de dikey kurutucu görülmektedir.



Şekil 2.7 Tek katlı yatay kurutucu genel görünümü



Şekil 2.8 Dikey kurutucu genel görünümü

2.2.7. Frit ve Sır Hazırlama - Sırlama

SKM üretiminde çok çeşitli sırlar kullanılmaktadır. Sır üretimi için gereken frit, yatırım ve üretim maliyetleri göz önüne alındığında günümüz için fabrikalar friti kendi bünyelerinde üretmek yerine piyasadan temin etme yoluna gitmektedir. Belirli reçeteler dahilinde değirmenlerde karıştırılan sır ile yine reçetelere göre belirlenmiş kalınlıklarda tamburlu elekler, serigrafi elekleri ya da dijital baskı kullanılarak seramik üst yüzeyi kaplanır, desen ve dekor yapılır. Şekil 2.9'da sır hazırlama değirmenleri, Şekil 2.10'da sırlama hattı görülmektedir.



Şekil 2.9 Sır hazırlama değirmenleri genel görünümü



Şekil 2.10 Sır bantları genel görünümü

2.2.8. Fırında Pişirme

Karolar tek veya çift katlı fırınlarda, dönen rulolar üzerinde ilerlerken önce ısıtılır, neminin bir kısmını atılır, sonra cehennem bölgesinde pişirilir ve fırının son kısmında endirek ve direk soğutularak çıkarılırlar. Şekil 2.11'de hidrojen zenginleştirme tesisatı entegre edilmiş tek katlı seramik fırını görülmektedir.



Şekil 2.11 Hidrojen zenginleştirme prosesi entegre edilmiş tek katlı seramik fırını

2.2.9. Kalite Ayırım ve Paketleme

Fırından çıkan karolar kalite ayırma bantlarında işçiler ve çeşitli cihazlarla incelenerek kalite sınıflarına, renk tonlarına ve boyutlarına göre ayrılır. İstenilen sayıda ve kalitede, karton kutularla paketlenen seramikler ahşap paletler üzerine istiflenerek plastikle kaplanır. Şekil 2.12'de kalite ayırım, Şekil 2.13'te paketleme prosesleri görülmektedir.



Şekil 2.12 Kalite ayırım makinesi genel görünümü



Şekil 2.13 Paketleme makinesi genel görünümü

Presleme ve kurutmadan sonra gerçekleşen üretim yöntemlerindeki farklılıklar, farklı ürünlerin ihtiyaç duyduğu farklı pişirme proseslerinden kaynaklanmaktadır. Tek pişirim üretimlerde karo yüzeyi sırlandıktan sonra 1100 °C üzerinde pişirilmektedir. Duvar karosu (DK) üretiminde hızlı tek pişirim metodu yaygınlaşmıştır. Çift pişirim yönteminde ise, önce şekillendirilip kurutulan karolar, sırsız halde pişirilerek "bisküvi" elde edilmekte, daha sonra sırlanarak ikinci defa pişirilmektedir. Çift pişirimle yer karosu (YK) ve duvar karosu (DK) üreten firmalar daha hızlı ve dolayısıyla daha ekonomik olan tek pişirim yöntemine dönmektedirler. Fakat bazı DK üretimleri için çift pişirim şarttır. Dekor pişirimi ise genelde, daha

değerli olan ve ilgi çeken, canlı renklerle ve parlak malzemelerle süslenen DK üretiminde uygulanmaktadır. Bu ürünler ise sırlı ve iki kez pişmiş karoların dekorlanarak üçüncü kez pişirilmesiyle elde edilir. Şekil 2.14'te üçüncü pişirim fırını görülmektedir.



Şekil 2.14 3.Pişirim fırını genel görünümü

İlerleyen üretim prosesleri sayesinde karonun her yerine homojen basınç veren izostatik kalıp sistemleri yaygınlaşmış, böylece karolarda hassas boyutlarda çalışma ve şekil düzgünlüğü sağlanmıştır. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle, rulolu hızlı pişirim fırınların kullanılabilir kanal genişlikleri artmıştır. Gelişen brülörler sayesinde bu kanallar içinde homojen sıcaklık dağılımı sağlanmış, rulo malzemelerinin artan sıcaklık dayanımları da yüksek sıcaklıkta eğilmeyen ruloların üretiminin önünü açmış sonucunda artan kanal genişlikleri daha fazla kapasiteli fırınların üretilmesini sağlamıştır. Sırlama bantlarında üst üste çok sayıda renk ve desen uygulaması gelişmiştir. Kuru glazürleme, çoklu elek baskı, tamburlu rulolu baskı ve dijital baskı makinelerinin kullanımı çoğalmıştır. Pazarın üst seviyelerine hitap eden, lüks, pahalı karo üretimi amacıyla, daha fazla desenli, daha çekici ürün yapmak için üçüncü pişirim denilen dekor tesisleri yaygınlaşmıştır. Teknoloji ilerledikçe, yüksek basma gücünde olan seramik karo presleri imaline başlanmış, böylece, 600x1200 mm, 1000x1000 mm hatta 1200x1200 mm gibi büyük boyutlu karoların üretimi mümkün hale gelmiştir. Karolardan veya granit seramiklerden basınçlı su ile partikül püskürtme işlemi (water-jet) ile parçalar kesilerek ve kenarları taşlanarak, bu kesimlerin desen olacak şekilde file üzerine yapıştırılması yoluyla karo

imalatına başlanmıştır. Merdiven, basamak ve alınlıkları, süpürgelikler, iç köşe, dış köşe parçaları ve havuz seramikleri gibi malzemeler bir çok firma tarafından üretilmektedir. Son yıllarda geliştirilen karo yüzeyini optik olarak inceleyen ve yüzey hatalarına göre sınıflandıran makineler ile ayırma işlemi hızlandırılmakta ve işçi hatalarının önüne geçilmektedir. Firmalar ürün kutuları üzerine barkot yapııştırarak üretim, sevkiyat, stok ve satış miktar ve çeşitlerini bilgisayarlarla kontrol etmektedir.

2.2.10. Seramik Üretiminde Tasarım ve Teknoloji

Türk seramik firmaları çağdaş tasarımların yanı sıra, modern bir yaklaşımla, Anadolu tarihinin eskimeyen çağrışımlarını ve motiflerini deneyimli ve eğitimli tasarımcıların yorumlarıyla modern mekanlara taşıırken; dönemin Türk Seramiği'nin desenleri binlerce yıllık geleneğin gölgesinde şekillenmekte, binlerce yıllık tecrübe bugünkü teknoloji ve bakış açısıyla yeniden yoğrulmakta, yaşama hijyen, konfor ve estetik katmaktadır.

Türk seramik sektörünün kısa zamanda gerçekleşen yükselişinde üretim teknolojisine olan sürekli yatırım stratejisinin yanı sıra, ürün geliştirmeye verdiği önemin de payı büyüktür. Seramik karo ve sağlık gereçleri alanında ürün yelpazesini giderek genişleten ve dünya pazarlarındaki rekabet ortamının koşullarına kısa zamanda ayak uydurma esnekliğine ulaşan Türk seramik firmaları, ürün tasarımında da rekabet şansını artıracak markaları oluşturma noktasına gelmiştir.

Bütün bunlara ek olarak ihracat yapılan ülkedeki müşterilerin zevkleri, istekleri, talep değişiklikleri izlenmekte ve seramik tasarımındaki beğeniler buna göre yeniden değerlendirilmektedir. Bunun için üretim teknolojileri geliştirilmekte, yeni ürünler tasarlanmakta, uluslararası standartlarda kabul görecektasarımlar oluşturulmaktadır. Türk seramik firmaları tüketici taleplerini ve beklentilerini tahmin ederek ya da önceden analiz ederek çözüm üretebilmekte, tasarım girdisini oluşturan parametrelerin irdelenmesi, konseptin bu doğrultuda gerçekleştirilmesiyle çağdaş tasarımlar yaratabilmektedir. Böylece rekabet gücünü geliştiren Türk firmaları,

seramik sektöründe araştırma geliştirme konusunda dünyaya öncülük yapmaktadır.

Ürün tasarımında kullanılan bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojileri ürün kalitesini artırmış, tasarım sürecini ise kısaltmıştır. Hem tasarım hem de standartlar açısından her ülkenin kendine özgü alışkanlıkları göz önünde bulundurulduğunda firmalar müşteri isteklerine çok hızlı cevap vererek ihracat konusunda rakiplerine oranla önemli bir avantaj sağlamışlardır. Günümüzde Türk firmalarının bu deneyimi sayesinde her beğeniye uygun ürünler tasarlanarak çok kısa sürede hayata geçirilebilmektedir.

İnsana ve çevreye duyarlılık, teknolojik, toplumsal ve kültürel gelişmelere açıklık, yenilik, deneysellik, işlevsellik ve yaratıcılık ilkelerini içeren özgün "Türk Tasarımları" bir yandan farklı çizgileri ve formları yaratırken, bir yandan da klasikle modern arasındaki dengelere sahip çıkarak diğer nesillere aktarılmaktadır.

Türk firmaları bugün 113 ülkeye ürünlerini ulaştırırken, giderek büyüyen üretim kapasitesi, modern teknoloji yatırımları ve yüksek kalite avantajları sayesinde Türk seramik sektörünün dünya pazarlarındaki rekabet gücü de artmaktadır. Kaplama malzemeleri ve sağlık gereçleri sektöründe Türkiye, dünyanın üçüncü büyük ihracatçı ülkesidir. Dünyanın tek çatı altında entegre üretim yapan en büyük fabrikaları Türkiye'dedir. Türk seramik üreticilerinin kapasite değerleri diğer ülke firmalarının çok üzerindedir. İtalya ve İspanya'daki seramik kaplama malzemesi üretimi yapan firmaların ortalama kapasitesi yıllık 2-3 milyon m² iken Türkiye'de 8 milyon m² düzeyindedir [5].

Bugün Türk seramik sektörünü zirveye taşıyan en önemli etkenlerden biri firmaların sürekli teknolojiye yatırım yapmaları ve en son yeniliklere çabuk uyum sağlamalarıdır. Seramik kaplama malzemeleri sektörü toplam kapasitesinin %60'ının 1990 yılından sonra kurulmuş olması ve 1990 yılından önce faaliyete geçen firmaların son 10 yıl içinde teknoloji yatırımlarını yenilemiş olması nedeniyle, Türk seramik firmaları teknolojik açıdan rakiplerine göre bir adım öndedir. 1980 yıllardan itibaren cirosunun belirli bir oranını araştırma-geliştirme faaliyetlerine ayıran Türk seramik firmaları, genel ticari trendler ve müşteri eğilimlerine dönük projeksiyonlarla

ilgili kapsamlı araştırmalar yapmakta ve bunların sonuçlarına uygun faaliyetlerle rekabet gücünü geliştirmektedir. Bir çok firma sektörün bugünkü durumu, yurtiçi ve yurtdışında neler yaşandığı, geleceğe yönelik ne gibi değişiklikler olacağı, bunun yanında dünya genel ticari trendinin nereye doğru gittiği ve bunun sektörü nasıl etkileyeceği hakkında titiz incelemelere ve analizlere önem vermektedir [5].

Araştırma geliştirme çalışmalarının bir diğer önemli ayağını ürün geliştirme çalışmaları oluşturmaktadır. Ürün geliştirme çalışmaları iç ve dış pazardaki verilere göre, pazarlama birimlerinin araştırıp belirlediği ya da müşteri ve tüketiciden doğrudan firmalar ulaşan isteklerin yerine getirilmesine yönelik olarak, yapılacak ürün tasarımlarının, fiyatlara ve günün moda akımlarına göre yapılmasını içermektedir. Araştırma-geliştirme çalışmaları çerçevesinde sayılabilecek bir diğer faaliyet de kalite güvencesi ve bunun devamlılığıdır. Üretimin her aşamasında kalite standardı ve bunun nasıl kontrol edileceği bilinmektedir. Yapılan her ürün, üretimin çeşitli aşamalarında kalite kontrolüne tabi tutulur. Üretim prosesleriyle ilgili hammadde, yarı mamul, mamul yakıt, atık ve benzeri maddelerin gerekli fiziksel, kimyasal, mineralojik analizleri gerçekleştirilir. Türk seramik üreticisi firmalar, sürekli teknoloji yatırımları yaparken, özellikle 90'lı yılların başından itibaren geliştirilen kalite yönetim sistemleriyle de iş süreçlerinde sürekli bir iyileştirme çalışmasını hedef olarak seçmişlerdir. Tümü ISO 9001 belgeli olan seramik firmaları dünyanın hemen her bölgesine ihracat yapmaları nedeniyle ürünlerinin ilgili ülkelerin standartlarına uygunluğuna ilişkin belgelere de sahiptir. Seramik firmalarının iş süreçlerine uyguladığı toplam kalite yönetimi, ürün kalitesi ve verimlilikte önemli artışlar sağlarken, firmaların iş süreçlerinde sürekli iyileştirmeler ve eğitim yoluyla dünya pazarlarında ürün ve markalaşma yönünde elde ettiği ilerlemeler göz doldurmaktadır [5].

2.3. Karo Çeşitleri

Mekana, amaca ve zevke uygun olarak karolar alt bölümlere ayrılmaktadır.

2.3.1. Yer Karosu

Yer karoları çok yüksek sıcaklıkta fırınlanır. Duvar karolarına göre daha sert ve dayanıklı olan yer karoları amaca ve zevke hitap ettiği taktirde duvarlarda da rahatlıkla kullanılabilir. Darbelere karşı duvar karolarına göre daha dayanıklı ve daha ağırdırlar. Yük taşıma kapasiteleri çok yüksektir. Düşük su emme kapasitesine sahip yer karolarının yüzeyindeki kaplama maddesi duvar karolarına göre daha serttir, bu yüzden de daha az aşınırlar.

2.3.2. Duvar Karosu

YK' ya göre daha hafif olan duvar karoları daha düşük sıcaklıklarda pişirildiği için daha fazla su emebilir. Bu nedenle yer karolarına göre darbe dayanımı daha düşüktür. İç mekanlarda kullanıma uygundur, yerde kullanımı amaca hizmet etmez.

2.3.3. Porselen Karo

Piştirme işlemi sırasında hamuruna katılan çeşitli renkli tanecikler nedeniyle doğal taşlara benzeyen porselen karolar diğer iki seramik türüne göre daha dayanıklıdır. Bu yüzden daha çok dış mekanlarda kullanılır. Apartman, iş merkezi ve çarşıların iç ve dış mekanları için en uygun döşeme malzemesidir. Bünyelerine su emmezler. Karo porselenler talebe göre mat veya parlatılmış olarak tüketiciye sunulabilir. Parlak porselen karolar, mat karoların taşlanması sonucunda elde edilir. Parlatma işlemi, karonun üst yüzeyinde, fırınlama aşamasında oluşan, çok sert tabakanın bir kısmının yok olmasına neden olur. Teknik özellikleri büyük ölçüde korunmasına rağmen, parlak yüzeyin aşınma dayanımı ve dolayısıyla lekelenmeye dayanımı mat yüzeylere göre daha düşüktür. Ancak estetik görünüş ve renk çeşitliliği nedeniyle tercih edilir.

Asit ve bazlara karşı duyarlı, donmaya karşı dirençli porselen karolar kayma riskine karşı kullanılabilir en uygun malzemedir. Güneş ışığı veya yapay aydınlatma ile yayılan ışıktan etkilenmeyen porselen karolar sırlı porselen karo ve sırsız porselen karo olmak üzere ikiye ayrılır.

2.3.3.1. Sırlı Porselen Karo

Yüzeyi su geçirmeyen sır ile kaplanmış seramik karodur. Renk desen dekor gibi karoya estetik katan unsurlar bu sır tabakasında gerçekleştirilir. Bu tabakanın fiziksel dayanımı (özellikle aşınmaya) karonun fonksiyonellik ve estetikliğinin devamlılığı için önemlidir, yere döşenen tüm sırlı karolar için üreticiler tarafından kataloglarında verilen aşınma değerlerine dikkat edilmeli, önerilen döşeme alanlarına göre karo seçimi yapılmalıdır.

2.3.3.2. Sırsız Porselen Karo

Yüzeyinde sır tabakası bulunmaması görünümüne homojen bir yapısı kazandırmakta, renk desen gibi estetik unsurlar bünyenin renklendirilmesi ile sağlanmaktadır. Genel olarak özellikle sırsız porselen karolar yüksek aşınma dayanımları sebebiyle iş alanları ve dış mekanlar için uygundur.

2.4. Seramik Kaplama Malzemelerinin Kullanım Alanları

Yer ve duvar seramikleri, binaların iç ve dış yüzeylerinde kaplama, koruma ve dekorasyon amaçlarına yönelik olarak kullanılmaktadır. Seramik karolarının kullanım miktarları inşaat sektöründe uygulanacak politikalara ve ülkedeki kentleşme düzeyine bağlıdır. 1990'lı yıllarda toplu konut projelerine ağırlık verilmesi ve kredi kullanımını yaygınlaştırılmasının inşaat sektöründe yarattığı canlılık seramik sektörünün gelişimine ön ayak olmuştur ve bu etkisi devam etmektedir. İç dekorasyonun önemli elemanlarından olan seramik kaplama malzemeleri tüketimi, yıpranma ve kırılma gibi şartlarda yenilenmesi dışında, estetik anlayışın gelişmesi ve modanın değişmesine bağlı olarak da artırmıştır.

Ortalama olarak 100 m²'lik alana sahip bir konutta 100-105 m²'lik yer ve DK kullanılmaktadır. Bunun 40-45 m²'sini DK ve yaklaşık 60 m²'sini YK oluşturmaktadır. Seramik ürünleri banyolar, mutfaklar, laboratuvarlar, yüzme havuzları, gıda fabrikaları, hastaneler, ilaç fabrikaları, arıtma tesisleri, mandıralar, hayvan barınakları ve kesim alanları , terminaller, bankalar, mağazalar gibi bir çok alanda hijyenik, ekolojik, dekoratif ve yüksek mukavemetli oluşları sebebiyle kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dünyada ve Türkiye'de bina cephelerinin giydirme metodu ile granit seramik karolarla kaplanması yaygınlaşmakta, granit seramik giydirme cepheler, ısı tasarrufu sağlamakta ve bina ömrünce bakım gerektirmemektedir [6].

2.5. Türkiye ve Dünyada Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü

SKM sektörü ülkemize istihdam ve döviz girdisi sağlayan, ülke ekonomisinde etkin ve önemli yeri olan bir sanayi dalıdır. Cumhuriyetin ilk yıllarında gerçekleştirilen ilk Beş Yıllık Sanayi Programı'nda bir porselen fabrikası yatırımı öngörülmüş ve bu konuda girişimlerde bulunulmuştur. Plan döneminde seramik hammaddesi araştırmak üzere Avrupa'dan uzmanlar gelmiş, yurtdışına araştırma-eğitim amaçlı öğrenciler gönderilmiştir. Ancak İkinci Dünya Savaşı'nın çıkmasıyla birlikte bu konudaki çalışmalara ara verilmiş, seramik sektörü geleneksel Kütahya seramikçiliğiyle sınırlı kalmıştır. Türkiye'de seramik sanayisinde ilk yatırımlar özel kesim tarafından gerçekleştirilmiştir. 1942 yılında İstanbul'da küçük bir tesiste seramik sofa ve süs eşyası üretilmeye başlanmış, 1958 yılında yine İstanbul'da 100 ton kapasiteli seramik sofa ve süs eşyası üreten küçük bir fabrika kurulmuştur. 1956 yılında ise Çanakkale Seramik tarafından Çanakkale - Çan'da ilk modern seramik tesisi yatırımına başlanmıştır. YK ve DK üretilen tesis 1960 yılında faaliyete geçmiştir. 1960'lı yılların sonuna kadar seramik ürünleri yurtiçi talebinin tamamına yakını ithalat yoluyla karşılanmakta iken 1960'lı yıllarda yaşanan döviz darboğazı ithal ikameci politikalarının katı bir biçimde uygulanmasını gündeme getirmiş ve yurtiçi talebin üretim yoluyla karşılanması yoluna gidilmiştir. Kamunun

seramik yatırımı konusundaki girişimleri 1960'lı yıllarda tekrar gündeme gelmiş ve 1961 yılında Sümerbank tarafından 400 ton kapasiteli İstanbul Yıldız Porselen Fabrikası kurulmuştur. Kamu kesimi tarafından seramik yatırımları daha sonraki yıllarda da devam etmiş, 1967 yılında Bozüyük (Bilecik) yer ve duvar karo üreten bir fabrika, 1968 yılında İzmit Yarımca'da porselen mutfak eşyası ve izolator tesisi yine Sümerbank tarafından kurulmuştur. 1968 yılından itibaren seramik ürünlerin ithalatı minimum düzeylere çekilmiş ve hatta ihracat yapılmaya başlanmıştır. Seramik sektörü 1990'lı yıllarda hızlı bir gelişme sürecine girmiş ve günümüzde Türkiye dünyanın sayılı seramik üreten ülkelerinden biri konumuna gelmiştir. 1950'li yıllardan itibaren gelişen Türkiye SKM sektörü, özellikle 1990 yılından sonra yaptığı büyük yatırım atağı ile bugün dünya seramik karo üretiminde söz sahibi olmayı başarmıştır [6].

Türkiye 2009 yılı itibariyle Dünya'nın dokuzuncu, Avrupa'nın ise üçüncü büyük seramik karo üreticisidir. Türkiye seramik sektörünün kurulu üretim kapasitesi 360 milyon metrekaredir ve 205 milyon m²'yi aşan üretimi ile Avrupa'nın üçüncü ve dünyanın 4. büyük seramik karo ihracatçısıdır. SKM üretiminde; Çin, İtalya, İspanya, Brezilya, Endonezya ve Türkiye ilk sıralarda yer almaktadır. SKM sektöründe dünya üretiminin %2.41'ini, Avrupa üretiminin ise %11'ini karşılamakta olan Türkiye seramik sektörü 160 milyon m² düzeyindeki yurtiçi pazar büyüklüğü ile seramik karo tüketiminde dünyanın 14. büyük pazarıdır. Bugün seramik kaplama malzemesi üreten firmalar 113 ülkeye, sağlık gereci üreten firmalar ürünlerini 95 ülkeye ihraç etmektedir [7].

İstihdam üzerindeki yüksek vergiler, enerji maliyetleri ve sosyal güvenlik yükleri maliyetleri artırmakta ve sektörün dünya üzerindeki rekabet edebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Fakat son yıllarda gayrimenkul sektöründe tüketiciye sunulan düşük faizli ve uzun vadeli konut kredileri sektörün hızla gelişmesini sağlamıştır. Seramik sektörü katma değeri en yüksek sektörlerden biridir. Ülkemizin sürdürülebilir bir ekonomik büyümeye kavuşturulabilmesi için, üretimdeki "Katma Değer" in ülkede daha fazla oluşması gerekmektedir. Çünkü "Yerli Üretim" olarak

tanımlanan “Katma Değer” in yurt içinde gelişmesi, sağladığı daha yüksek üretim ve istihdam ile toplumsal refahın da temel kaynağını oluşturmaktadır. SKM üretiminde kullanılan hammadde, yardımcı madde ve diğer işletme malzemelerinin dış girdi oranı çok düşüktür ve bu sayede seramik sanayinin yaratacağı katma değer, her ülkede için olduğu gibi Türkiye için de stratejik bir önem taşımaktadır.

Sektörün 800 milyon USD düzeyindeki ihracatı yanında gerçekleşen ithalat sadece 50 milyon USD civarındadır. Dolayısıyla sektör ihracatının yarattığı katma değer 750 milyon USD seviyesindedir [8].

Seramik sektöründe taşımacılık maliyetleri, seramik ürünlerin niteliğinden dolayı toplam maliyet içinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Mamullerin üretim bölgelerinden, yurtiçi iletimlerinin yapılması ve en önemli hammadde rezervlerinin bulunduğu bölgelerden üretim bölgelerine taşıma, uygun istasyon ve yükleme-boşaltma araç gereçleri olmadığından etkin olarak yapılamamaktadır. Özellikle hammadde nakliyesinde, ürünlerin birim fiyatları, mamul maddelere göre daha düşük olduğundan endüstriyel minerallerin üretim noktasından ihraç noktasına kadar olan karayolu nakliye maliyetleri önemli bir girdi teşkil etmekte ve sektörün rekabet gücünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Seramik sektörünün en önemli sorunlarından biri de enerji maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Türkiye, elektrik enerjisini seramik sektöründeki en yakın rakiplerinden biri olan İspanya'ya göre %32,4 daha pahalı kullanmaktadır [9]. Seramik sektörünün en önemli girdilerinden biri olan doğalgaz fiyatları açısından da durum farklı değildir. Türkiye'nin uluslararası pazarda rekabet gücünü korunabilmesi için elektrik ve doğalgaz fiyatlarının başlıca rakipleri olan İspanya ve İtalya' daki seviyelere çekilmesi gerekmektedir. Çin'in SKM ihracatının giderek artması dünya seramik satış fiyatları üzerindeki baskının artmasına sebep olmuş, üreticilerin kar marjlarını aşağılara çekmelerini zorunlu hale getirmiştir. Bunun yanına iç piyasadaki sermayesi güçlü yerli firmaların ihracat pazarlarındaki rekabetçi fiyatları da sektörün dış ticaret kazancını azaltmaktadır. Hammaddenin yurtiçinden temin edilmesi önemli bir avantaj oluşturmaktadır. İnşaat sektöründeki ilerleme ve çeşitli kredi sistemlerinin

uygulamaya geçmesiyle konut sektöründe yaşanan hareketlilik, seramik sektöründeki beklentileri olumlu yöne çevirmektedir.

SKM üretiminde yıllara göre genel olarak bir büyüme söz konusudur. 1990-2004 yılları arasında sektörün üretimindeki yıllık ortalama artış oranı %11.1 düzeyindedir. Ancak 1999 yılında, 1998 yılına oranla %3.6 oranında bir düşüş göstermiştir. Bu durum, ülkemizdeki genel ekonomik koşullar, Rusya krizi, iki büyük deprem ve özellikle de inşaat sektöründeki gerilemeden kaynaklanmaktadır [10].

Kasım 2000 krizinin hemen arkasından, Şubat 2001 ekonomik krizinin patlak vermesi sonucu döviz kurlarının serbest dalgalanmaya bırakılması nedeniyle Türk Lirasının dolar karşısında ani değer kaybına uğraması, akaryakıt ve enerjiye yapılan zamlar o dönemde SKM üreticilerini de önemli ölçülerde olumsuz şekilde etkilemiştir. Sektörde faaliyet gösteren firmalar üretimlerine zaman zaman ara vermek zorunda kalmışlar, sonuç olarak 2001 yılında sektörün üretimi 2000 yılına göre %14 oranında düşüş kaydetmiştir. 2002-2005 yılları arasında ekonominin genelindeki olumlu gelişmelere bağlı yurtiçi talepteki kısmi artış ve ihracattaki büyümeye paralel olarak bu dönemde üretim artış kaydetmiştir [10].

Ekonomik krizler ve depremlerin ardından ciddi oranda küçülme yaşanan emlak sektöründe 2004 yılından bu yana bir canlılık yaşanmış, 2005 yılının ilk çeyreğinden itibaren de bire iki oranında büyüme yaşanmıştır. 2006 yılında inşaatı devam eden konutların devreye girmesi ve mortgage sisteminin hayata geçmeye başlamasıyla birlikte sektördeki büyüme hızla gerçekleşmektedir.

Seramik sektörünün en önemli kalemi olan SKM sektöründe Dünya üretimi 2009 yılı için 8,46 milyar m²'ye ulaşmıştır ve en büyük üretici %42,28 payla, 3,6 milyar m² üretim gerçekleştiren Çin'dir. 1735 milyon m² olarak gerçekleşen Dünya SKM ithalatında en büyük paya 124 milyon m² ile Amerika Birleşik Devletleri (ABD) sahiptir [11]. Diğer önemli ithalatçı ülkeler Suudi Arabistan, Fransa, Almanya ve Güney Kore olarak sıralanmaktadır [11,12].

Tüketimde ilk sırayı Çin alırken, ikinci sırada Brezilya, üçüncü sırada ise Hindistan yer almaktadır. Türkiye ise 2009 yılındaki 138 milyon m² tüketim değeri

ile dünyada en fazla seramik karo tüketen ülkeler sıralamasında 14. sırada yer almaktadır [11].

Türkiye SKM sektöründe Avrupa'da 3., dünyada 4. büyük ihracatçı konumundadır [12]. Çin 584 milyon m² ihracatı ile birinci, İtalya 281 milyon m² ihracatı ile ikinci, İspanya 235 milyon m² ihracatı ile üçüncü, Türkiye ise 67 milyon m² ihracatı ile dördüncü sırada yer almaktadır. Bu dört ülke dünya ihracatının %67,26'sını gerçekleştirmektedir. Türkiye'nin 2009 yılı dünya ihracatında aldığı payı ise %3.86'dır. 2009 yılı ihracatında İtalya,İspanya ve Türkiye'nin toplam ihracatı hemen hemen Çin'in tek başına ihracatına eşittir [11].

2.6. Seramik Sektöründe Enerji Tüketimi

Pek çok inşaat malzemeleri alt sektörü enerji yoğun proseslere sahiptir. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı olması (petrolün %90'a yakın bir kısmı, doğalgazın %97'si ve kullanılan kömürün %20'si) ve enerji fiyatları açısından dünyadaki en pahalı enerjiyi kullanan ülkeler arasında yer alması, sektörün maliyetlerini oldukça artırmaktadır [2].

SKM sektörü, üretim prosesi içindeki pişirme ve kurutma işlemlerinden dolayı, oldukça yoğun enerji tüketen bir sektördür. SKM sektörünün üretim maliyetleri içinde enerjinin payı diğer sektörlere oranla oldukça yüksektir. SKM sektöründe enerji için toplam maliyet içinde %30 gibi bir oran söz konusudur ki seramik sektöründe enerji fiyatları büyük bir önem taşımaktadır.

SKM sektörü iki özelliği sebebiyle mevcut enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlayacak en önemli sektörlerin başında gelmektedir. Birincisi, SKM ürün olarak parçası oldukları yapılarda enerji verimliliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynar. İkincisi, SKM sektörünün enerji yoğun bir sektör olması sebebiyle sanayide enerji verimliliğinin artırılması ile birim üretim başına düşen enerji kullanımının önemli ölçüde düşürülme potansiyeline sahiptir [2].

Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı olması ve birim üretim başına harcanan birim enerji miktarları (enerji yoğunluğu) kıyaslandığında kullanılan enerjinin birçok

ülke ortalamasının altında verimsiz kullanılması, küresel ekonomiden yüksek pay almaya çalışan inşaat malzemeleri sektörleri için önemli bir dezavantaja sebep olmaktadır [1].

Türkiye sanayisinde önemli bir payı enerji yoğun sektörler almaktadır. Bu sebeple, sanayi sektörü gerçekleşen nihai enerji tüketiminin %40'nı ve birincil enerji kaynağımız olan toplam elektrik tüketiminin %47'sini kullanmaktadır [1].

Inşaat ve inşaat malzemeleri alt sektörleri, doğal kaynak tüketimi, yüksek yakıt ve elektrik tüketimine bağlı sera gazı salımı, inşaat malzemesi üretimi, inşaatın yapımı ve yapıların yıkımı sırasında ortaya çıkan atıklar düşünüldüğünde, çevre ve iklim değişikliği üzerinde en fazla etkisi bulunan sektörler arasında yer almaktadır. SKM sektörü enerji yoğun bir sektör olması sebebiyle, Kyoto Protokolü sonrası dönemde en fazla risk altına giren sektörlerinde başında gelmektedir. Sera gazı salım hedefi belirlemeyen ülkelerden ithal edilecek ürünlere karşı haksız rekabeti önlemeye yönelik AB'ye yapılacak ihracatlarda sınırda karbon eşitleme vergilerinin gelmesiyle, üreticiler için ek maliyetlerin ortaya çıkması söz konusu olabilecektir [2].

Türkiye'de üretilen SKM'yi global düzeyde farklılaştırabilmenin yolu çevre dostu ürün ve üretim proseslerinden geçmektedir [2].

3. ENERJİ

Evrendeki yaşamın kaynağı olan enerji, bir işi yapmak için harcanan emeğin tümüdür. Yürümek, nefes almak, evimizi ısıtmak ya da çalışmak enerji kullanımına birer örnektir. Bu enerjiyi elde ettiğimiz fosil yakıtların uzun seneler boyunca insanoğlunun enerji ihtiyacına karşılık verdiği ve yakın gelecekte enerji arzındaki önemlerini koruyacakları kaçınılmaz bir gerçektir. Bu yakıtlardan petrolün, taşıma sektöründeki öneminin en azından 2050'lere kadar devam edeceği öngörülmektedir. Bu süreçte belli ülkelerin elinde veya kontrolünde bulunan petrol rezervlerine bir çok ülkenin bağımlı olması, petrolü stratejik bir madde konumuna getirmiştir. Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde petrol tüketiminin hızla artması, petrol fiyatlarını hızla yükseltmiş, bu durum gelişmiş ekonomileri olumsuz etkilemeye başlamıştır. Bu sonuçtan pay çıkarmayı bilen gelişmiş ülkeler yeni enerji türleri üzerine arayışlarını hızlandırıp, özellikle hidrojen ekonomisi üzerine yapılacak araştırmalara büyük bütçeler ayırmaya başlamıştır. Yeni ve temiz enerji kaynaklarına yönelik araştırmaların hızla devam ettiği günümüzde, konvansiyonel enerji kaynakları önemini korumakla birlikte, fosil yakıtların çevreye verdiği zarar ve tükenmekte olduğu gerçeği, bu kaynakların verimli ve dikkatli kullanılması gerektiği gerçeğini ortaya koymaktadır.

Biyo yakıtların ya da kömürden elde edilecek sıvı yakıtların taşıma sektöründe öne çıkmaları için teknolojik ve ekonomik açıdan önemli ve uzun vadeli gelişmeler gerekmektedir. Aynı şekilde elektrik veya hibrid motorlu araçların önemli bir pazar payı almaları yakın bir gelecekte gerçekleşecek gibi gözükmemektedir. Hidrojenin geleceğin enerji kaynağı olabilmesi için de, hem hidrojen üretimi ve depolanması hem de hidrojen zenginleştirmede, hidrojenli yakıt hücrelerinde ve hidrojenle beslenen içten yanmalı motor teknolojilerinde çok kapsamlı gelişmelerin olması gerekmektedir. Tüm bunların yanında yeni bir teknolojinin kullanılan teknolojilerin yerine geçmesi çeşitli ve uzun süreçleri gerektirmektedir. 2050'lerde yeni yakıtlar ve bunları kullanabilecek motor sistemleri teknik açıdan hazır olsalar

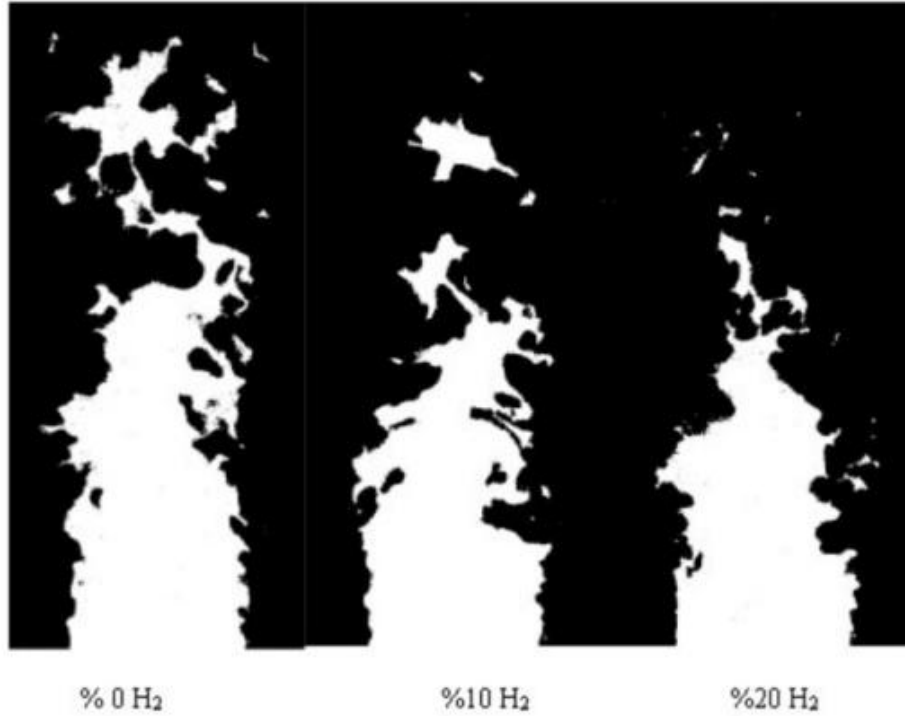
bile bunların var olan teknolojilerin yerini almalarının yani toplumsal kabul görmelerinin daha uzun süreceği göz ardı edilemez bir gerçektir [13].

Elektrik veya güç üretimi sektöründe de durum aynıdır. Elektrik üretiminde veya sanayi için gerekli ısı veya buhar üretiminde doğalgaz ve kömüre bağımlılığın devam edeceği ortadadır. Yenilenebilir ve nükleer enerji sistemlerinin güç talebine kapsamlı bir şekilde cevap vermelerinin 21. yüzyılda da tam olarak gerçekleşmeyeceği tahmin edilmektedir. İçinde bulunduğumuz yüzyılda, fosil yakıtlara bağımlılığın süreceğini kabul edersek, önemli iki soruyla karşı karşıya kalmaktayız. Cevap vermemiz gereken birinci soru; "Fosil yakıtları nasıl daha temiz yakabiliriz?" sorusudur. Fosil yakıtların enerjiye (ısıya) çevrilmesi yanma ile sağlanırken, karbon atomu içeren yakıtlar yandığında ortaya çıkan karbonik gaz salınımının sebep olduğu küresel ısınmanın dünyanın geleceği için küresel bir tehlike yarattığını göz ardı edemeyiz. İkinci soru ise "Yeni ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmelerine gereken zamanı ayırırken elimizdeki fosil yakıtları nasıl en verimli şekilde kullanabiliriz?" sorusudur. Bu sorular, sebeplerinin ve sonuçlarının tüm dünyayı ilgilendirdiği ve çözümlerinin bir an önce bulunması gerektiği sorulardır.

Günümüzde Türkiye yurtdışından belli ve ekonomik olmayan şartlarda alınan, kontrolünün tamamen ihracatçı ülkede olduğu doğalgaza bağımlı bir ülkedir. Bir ülkenin kendi kontrolünde olmayan bir enerji kaynağına bu kadar bağımlı olmasının çeşitli sebepleri ve sonuçları olduğu ortadadır. Üstelik Türkiye'nin doğalgaza bağımlılığı sadece yakıt kaynağına bağımlılık değil aynı zamanda yakıtı enerjiye çevirecek teknolojiye de bağımlılıktır. Dolayısıyla yapılan çalışmaların ve ilgili girişimlerin hem yakıt bağımlılığına hem de yakıtı kullanma teknolojileri bağımlılığına, günümüz için kısmi çözümler getirebilecek ve de gelecek için daha kapsamlı çözümler oluşturabilme potansiyeli olan çözümler olması gerekmektedir.

Doğalgaz rezervlerinin henüz tam kontrolünü ve işletilmesi için ilgili girişimleri gerçekleştiremeyen Türkiye, elindeki doğalgazı en verimli şekilde kullanmak için çözümler üretebilir. Çıkarılması zor olan petrol kuyularında

yapıldığı gibi karbonik gaz pompalayarak doğalgaz üretim verimliliği arttırılırken aynı zamanda bu doğalgazı kullanan termik santralin saldığı karbonik gazın depolanması için de bir çözüm üretilmiş olur [13].



Şekil 3.1 Metan gazı ve hava ön karışımlarının hidrojenle zenginleştirilmesi sonucunda oluşan alev yüksekliği azalması

Ayrıca elde edilen doğalgaz; bilinen teknolojiler ile hidrojene çevrilip yakıt pillerinde ya da hidrojen ile zenginleştirilerek kullanılabilir. Yeni araştırma sonuçlarından görülebileceği gibi, doğalgaza belirli oranlarda hidrojen ilavesi karışımın reaktivitesini ve önemli bir yanma parametresi olan alev yanma hızını artırmakta ve dolayısı ile alev boyunu azaltmaktadır [14,15].

İthal edilen doğalgaza gelince; başkasının malını bir taşıma ücreti dahilinde başkasına satmak, kolay ve katma değer getirmeyen bir çözümdür. Dışarıdan alınan doğalgazın anlaşmalarla başka ülkelere satılabilme hakkı olduğu takdirde Türkiye'ye giren doğalgazı bir şekilde zenginleştirdikten sonra, yani bir katma değer ekleyerek

satmak da mümkün olabilir. Bunun ilk akla gelen şekli yukarıda da değindiğimiz hidrojenle zenginleştirme yaklaşımıdır [13].

Enerji kaynağı olarak kömürü değerlendirecek olursak, kömürde en büyük sorun yanma sırasında açığa çıkmaktadır. İçindeki safsızlıkları azaltmak, baca gazındaki kükürtdioksiti yakalamak mümkün olmakla birlikte, geriye kalan milyarlarca ton külün yanında, her yıl çıkan milyarlarca ton CO₂ emisyonu bizi kömür kullanırken düşündürmelidir. Çünkü bu bir sera gazıdır ve aynı sorun diğer fosil yakıtlarda da karşımıza çıkar.

Mevcut petrol rezervlerinin daha büyük bir kısmını çıkartabilmek için yeni ve pahalı teknikler kullanılmakta, yeni surfaktanlar geliştirilmektedir. Bir şeyin taşınmaya ve hatta bulunup çıkartılmaya değer olması için, ya yükçe hafif ya da hacimce küçük, ancak iki durumda da pahaca ağır olması gerekmektedir. Kömür ve petrol, birim hacim ya da birim ağırlığı başına yüksek enerji içermektedir ki kara, deniz ya da tren yoluyla binlerce kilometre nakillerinde bile kullanılmaya değer bulunmaktadır. Petrolün, sıvı olması nedeniyle, daha kolay bir taşıma yolu olarak, boru hatlarından pompalanabilirliği petrolü ön plana çıkarmaktadır.

Petrolün kuyu başı, yani yalnızca çıkarma maliyetini içeren piyasa değeri, litresi başına çoğu kez 1 Dolar'ı bulmakta iken; taşınması, rafinasyonu, dağıtımından sonra, benzinin pompa başı fiyatı bunun altında kalmaktadır. Bunun bir probleme dönüşmemesi, petrolün aynı zamanda 500'den fazla farklı ürün üreten petrokimya sanayinin temel hammaddesi olmasından kaynaklanmaktadır. Benzin bunların 'en hafif'lerinden biri olup asıl yüksek kar marjları diğer petrol ürünlerindedir. Dolayısıyla petrol, bir enerji kaynağı olmanın yanında, değerli bir hammaddedir.

Bu yakıtları yavaş tüketmenin önemli bir yolu tasarruflu kullanmaktan geçmektedir. Günümüzde fosil yakıtların temiz ve verimli bir şekilde kullanılmaları için çeşitli yöntemler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Günümüz şartlarında konvansiyonel enerji kaynakları ile yarışabilecek düzeyde ekonomik olan çalışma ve çabaların benimsenmesi mümkün olabilir. Her şeyden önce bu çabaları kolaylaştıracak ülke stratejisinin oluşturulması ve bu stratejinin planlanmasında

bu konuda çalışan bilim insanlarına danışılması uygun olacaktır. İkinci olarak bu stratejiyi mümkün kılacak araştırma ve geliştirme altyapılarının kurulması, aynı şekilde bu çabaların uzmanlarını tarafından yapılması, kontrol edilmesi ve hayata geçirilmesi gerekmektedir [13].

3.1. Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, üretim kalitesini ve miktarını düşürmeden, ve sosyal refahı engellemeden enerji maliyetlerinin en aza indirilmesi, daha az enerji kullanarak aynı miktardaki işi aynı yaşam standartlarında gerçekleştirebilmektir. Verimlilik, niteliği ve niceliği düşürmeden, en az girdiyle işe yarar en çok çıktının elde edilmesi anlamına gelir. Enerji verimliliği, mevcut teknolojilerin iyileştirilmesi ya da yeni teknolojilerin kullanılmasıyla tüketilen enerji miktarının azaltılmasıyla gerçekleştirilebilir. Enerji verimliliği; daha verimli enerji kaynaklarının kullanımının yanı sıra gelişmiş endüstriyel süreçler ve enerji geri kazanımları gibi etkinliği artırıcı önlemlerle de gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte; enerji verimliliği her zaman teknolojik dönüşümlerle ortaya konulan bir süreç değil aynı zamanda kamuoyunda farkındalık oluşmasını, kamusal düzenlemelerin yaşama geçirilmesini, sektörel dönüşümü hızlandıran ve verimliliği teşvik eden yasal düzenlemelerin devreye sokulmasını kapsayan uzun soluklu bir süreçtir.

Enerji verimliliği, proseslerde büyük ve küçük ölçekli dönüşümleri zorunlu kılarken aynı zamanda yeni iş imkanları yaratmaktadır. Düşük karbon ekonomisine geçiş; hem yerel, hem ulusal, hem de küresel ölçekte, yeni iş imkanları, yeni endüstriler, yeni pazarlar ve daha verimli, daha üretken ve daha yeşil bir ekonomi için bir başlangıç noktası olabilir. Türkiye'nin enerji verimliliği ile ilgili atabileceği birçok adım bulunmaktadır. Ağır sanayiden ulaşıma, binalardan bireysel tüketime kadar geniş bir alanda maliyet, etkin dönüşümler ve yeni tasarımlar devreye sokularak enerji tüketimi %30 ile %80 arasında azaltılabilir. Enerji verimliliği önlemleri uzun vadede, emisyonların yanı sıra pahalı ve sınırlı bir kaynak olan benzin ve doğalgaz ithalatına bağımlılığın önüne geçilmesi için öne çıkan bir seçenektir.

3.1.1. İklim ve Gelecek

Başta insan olmak üzere tüm canlı organizmalar, içinde yaşadıkları iklimi değiştirmektedirler ve ülke yönetimlerinin bu sorunu ciddiye alarak çeşitli girişimlerde bulunması kaçınılmazdır. Günümüz enerji ihtiyacına paralel olarak artan yakıt kullanımı atmosfere son yüzyılda önemli miktarlarda kükürtdioksit, karbondioksit, metan ve nitrik oksit gibi gazların salınmasına sebep olmaktadır. Bunlardan kükürtdioksit derişiminin yükselmesi asit yağmurlarına yol açmakta; karbondioksit, metan ve nitrikoksit ise yeryüzüne çarpıp yansıdıktan sonra frekans dağılımı değişen güneş ışınlarını soğurarak, uzay boşluğuna geri dönmelerine büyük oranda engel olmaktadır. Karbondioksit gazının atmosfere salınım hızı doğal çevrimlerle yeryüzüne geri dönme hızından çok daha fazla olduğundan, atmosferde karbondioksit derişimi her geçen gün artmaktadır. Havaya salınan karbondioksit miktarının artışına neden olan iki önemli kaynak canlıların solunumu ve fosil yakıtların tüketilmesidir. Dünya nüfusunun hızlı artışını durduracak ya da bu artışı düzenleyecek bir çözüm yolu olmadığı için, fosil yakıtların tüketimi üzerinde yoğunlaşmak gerekmektedir. Fosil yakıtların yanmasıyla salınan karbondioksit, küresel ısınmanın ana nedeni olarak görülmektedir. Bugün itibariyle havaya salınan karbondioksit gazının yaklaşık üçte biri fosil yakıtların yanması kaynaklıdır. En fazla salınan sera gazı olan karbondioksit içinde bulunan karbonun atom ağırlığı 12 gram, CO₂'in molekül ağırlığı 44 gram olduğuna göre, yakılan her bir gram karbon, atmosfere 3,667 gram karbondioksit salınması anlamına gelmektedir [16].

Geçen yüzyılda salınan gazların iklimin ısınması yönünde sebep olduğu artış 7 W/m^2 dir ve bu güneşin parlaklığındaki %1 artışa eşdeğerdir. Sonuç olarak da bu artışın yıllık ortalama atmosfer sıcaklığını $0,75^\circ\text{C}$ artırdığı düşünülmektedir. Dünyamızın geçirdiği son küçük buzul dönemi ve şimdiki ılıman dönem arasında, atmosferin ortalama sıcaklığı açısından 5°C fark olduğu düşünüldüğünde bu sıcaklık artışına bir çare bulmanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü; her 1 derecelik artış, kuzey ve güney yarım kürede iklim kuşaklarına 160 km'lik yer değiştirebilecek, 5

derecelik artış ise kutuplardaki buz erimeleri sonucu, denizlerin 1 m'den daha fazla yükselmesine, pek çok yerin sular altında kalmasına, tarımsal kuraklığa ve erozyona neden olabilecektir. Bunun yanında daha karamsar tabloyu düşünecek olursak geçen yüzyılın biriktirdiği ısınma etkisi, henüz tümüyle kendisini göstermiş değildir. Çünkü okyanuslar geç ısınmakta ve iklim değişikliğine katkılarını 100 yıl kadar gecikmeyle göstermektedir [16].

3.2. Enerji ve Türkiye

Büyüme için sanayileşmeye, sanayileşme için ucuz, temiz aynı zamanda kesintisiz enerjiye, enerji için ise finans, teknoloji ve insan kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Son 10 yıla baktığımızda dış ticaret açığımızın yarısının, yani 154 milyar USD'lik tutarın enerji ithalatından kaynaklandığı görülecektir. Türkiye ekonomisinin mevcut kompozisyonu enerji ve emek yoğun sektörlerle dayanmaktadır; fakat sarfedilen bu emeğe ve yüksek maliyete karşılık halen ülkemizin ihracat gelirinin 1/3'ü enerji ithalatına gitmektedir. Başta demir-çelik, çimento, taş toprak işleme gibi enerji yoğun ihracatçı sektörlerimizde enerji girdi maliyetleri rekabet denkleminin en önemli değişkeni olmaya devam edecektir [1].

Enerji kaynakların çeşitlendirilmesi, üretim kapasitelerinin artırılması, ucuz, temiz, sürdürülebilir enerjinin sağlanması Türkiye'nin temel ve öncelikli gündemini oluşturmalıdır. Türkiye küresel enerji sorununa yerli teknolojilere ve yerli kaynaklara yatırım yaparak çözüm aramalı, Dünya'nın sıkıştığı bu dar boğazdan en az kayıpla sıyrılmalıdır.

Enerji yoğunluğu, GSMH başına tüketilen birincil enerji miktarı için tüm dünyada kullanılan bir göstergedir. Türkiye'nin kişi başına enerji tüketimi, OECD ortalamasının beşte biri civarında olmasına rağmen Türkiye'nin enerji yoğunluğu, OECD ortalamasının üzerindedir. Bu durum enerji verimliliği ilkelerine dikkat edilmediğini göstermekle beraber aynı zamanda enerji yoğun sektörler ile kalkınmaya çalışmamızın sonuçlarını da ortaya koymaktadır [1].

Yerli enerji kaynaklarına sahip olmak son derece önemli ve ülke zenginliğini arttıracak bir faktördür. Ancak bugün gelişmiş ülkelerin büyük bir bölümü enerji ihtiyacını ithal etmektedir. Örneğin; Japonya enerji bakımından en fakir ülkelerin başında geldiği halde büyük bir ekonomidir. Japonya’da petrol %99,6, doğalgaz %96,4 oranlarında ithal edilmektedir. Petrol kaynaklarına uzak olduğu halde Japonya’da 31 tane rafineri vardır. Petro-kimya endüstrisi Japonya’nın tüm sanayi kollarını destekleyen ve ülkenin rekabetçi gücünü artıran bir tasarımla inşaa edilmiştir. Petrole bu kadar yakın olan ülkemizde sadece 4 rafineri ve 2 petro-kimya tesisi kurulabilmiş olması ülke performansımızı göstermektedir. Japonya dünya genelinde kurulu 438 nükleer santralin 55’ine sahiptir. Yoğun enerji gerektiren demir-çelik sektöründe Japonya, Türkiye’nin yaklaşık 5 katı; yaklaşık 120 milyon ton çelik üretmektedir. İster Japonya ister Güney Kore veya başka bir gelişmiş ülkeyi incelediğimizde şu gerçek karşımıza çıkmaktadır. Ulusal sanayileşme politikalarını destekleyen kamu-özel işbirliği ile yürüyen güçlü bir enerji sektörü vardır [1].

Düşük karbon ekonomisi enerji ihtiyacını azaltmayacak, enerji kaynaklarının yapısını değiştirecek ve sera gazı emisyon seviyesini düşürecek yaklaşımları içerir. Doğa ile savaşmadan gelişmenin yollarını aramak insanlığı yepyeni araç-gereçlerle tanıştıracaktır. Elbette; çeliğe, petro-kimya türevlerine, cama, seramiğe olan ihtiyaçlar devam edecektir. Türkiye mevcut endüstrilerinde sera gazı emisyonlarını küresel standartlara çekmeye çalışırken bu endüstrilerin rekabetçi gücünü korumalıdır.

Türkiye’de toplam enerji tüketiminin %40’ının sanayi, %32’sinin konutlar , %20’sinin de ulaşım tarafından gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda, verimlilik kaynaklı çalışmaların öncelikle konut ve sanayi sektörlerinde başlatılması önemli bir fayda sağlayacaktır [2].

Türkiye Enerji Verimliliği Derneği (ENVER) tarafından hazırlanan Temmuz 2010 tarihli “Türkiye Enerji ve Enerji Verimliliği Çalışmaları Raporu”nda Türkiye’de alınacak önlemlerle, binalarda %30, sanayide %20 oranında enerji tasarrufu potansiyeline sahip olduğumuz ortaya çıkmaktadır [1].

4. HİDROJEN

Hızla artan nüfus ve ilerleyen teknolojiye paralel olarak artan enerji talebi karşısında yerkürenin fosil yakıtlarına dayalı enerji kaynaklarının bir bölümünün yaklaşık bir insan ömrüne eşdeğer bir süre içinde tükenecek olması günümüz bilim insanlarını yeni arayışlar içine sokmaktadır. Yaklaşık 30 yıl sonra fosil yakıt tüketiminin ikiye katlanacağı ve buna paralel olarak önümüzdeki 41,6 yılda petrolün, 60,3 yılda doğalgazın ve 133 yılda daha çok rezervi bulunan kömürün tükeneceği öngörülmektedir. Daha iyimser bir yaklaşımla Dünyamızın, ‘ekonomik rezerv’ olarak, şimdiki tüketim hızlarıyla yaklaşık 200 yıl yetecek kadar 1 trilyon ton kömürünün 80 yıl yetecek kadar 250-350 milyar ton (2-3 trilyon varil) petrolünün ve 70-80 yıl yetecek kadar 150 trilyon m³ doğalgazının olduğu tahmin edilmektedir [16]. Bu tablo karşısında insanlık enerji kaynaklarını daha verimli ve etkin kullanmanın yollarını bulmalı, fosil kaynaklarının hızla tükenişini yavaşlatmalı dolayısıyla kullanımını en aza indirmelidir.

Günümüzde küresel enerji sektörünün yapısı, tüm arz ve talepler tamamen çevresel faktörlere bağlı olarak şekillenmeye başlamıştır. Sürdürülebilir enerji kavramında, güvenli, temiz ve sürekli kaynaklardan enerjinin çevre dostu teknolojiler kullanılarak üretimi ve tüketimi ile ilgili tüm sorunlar ele alınmakta ve bu sorunlara çözümler aranmaktadır. Sürdürülebilir enerjiye geçişin bu yüzyılda insanlığın en önemli kazanımı olacağı orta ve kaçınılmazdır. Sürdürülebilir enerji geleceği kavramında ele alınan ve çözüm önerileri geliştirilmesi hedeflenen sorunlar şöyle özetlenebilir [19]:

- (i) Dünya enerji gereksiniminin güvenli ve temiz kaynaklardan sağlanması.
- (ii) Enerji kaynaklarının yeryüzünde eşit olmayan dağılımından ileri gelen jeopolitik anlaşmazlık risklerinin azaltılması, bu anlaşmazlıkların neden olabileceği çatışmaların önlenmesi.
- (iii) Tüm insanlığın çağdaş enerji hizmetlerinden eşit şekilde yararlanmasının sağlanması. Dünya nüfusunun dörtte birinin henüz daha elektrik enerjisinden

yararlanma olanağına sahip olmadığı gözönüne alınır, bu konunun önemi daha iyi anlaşılacaktır.

(iv) Enerji üretiminde kullanılan kaynakların doğaya uyumlu olması, enerji üretim ve tüketiminin çevre dostu teknolojiler kullanılarak sağlanması [19].

Bu süreçte sadece belli ülkelerin elinde ya da kontrolünde bulunan petrol ve doğalgaz rezervlerine bir çok ülkenin bağımlı olması, petrolü stratejik bir madde konumuna getirmiştir [17].

Enerji dünyanın önemli gündem maddesidir ve bu konumunu uzun yıllar daha sürdüreceği gibi gözükmektedir. Çünkü insanlığın refahı, enerjiyi üretebilme ve kullanabilme yeteneği ile doğru orantılıdır. Dünya enerji gereksinimi hızla artmakta ve insanlık, artan enerji gereksinimini karşılarken diğer önemli yaşamsal sorunlarla uğraşmaktadır. Enerji ile ilgili tüm sorunları ele alan ve çözüm önerileri üreten "sürdürülebilir enerji yaklaşımı" ile artan enerji gereksiniminin karşılanması hedeflenmektedir.

Bildiğimiz en küçük ve en basit atom olan hidrojen, Büyük Patlama'dan sonra evren soğumaya başlarken ortaya çıkan ilk element olmuştur. Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, evrende bulunan atomların yaklaşık %90'ını, fosil yakıtların da büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Hidrojen, diğer atomlarla ve özellikle oksijenle elektron alışverişi sonucu kolaylıkla kimyasal bağ yaparak ortama enerji verir. Bu bakımdan hidrojen doğada serbest halde bulunmaz. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer reaksiyonla vermiş olduğu enerjinin yakıtı da yine hidrojen olup, hidrojen evrenin temel enerji kaynağıdır [18].

Yerküremizde önce kömür, daha sonra petrol ve doğal gaz yüzyıllar boyu sanayi ve taşıma sektörünün gereksinimi olan enerjiyi sağlayıp, uygarlığın lokomotifi olmuşlardır. Küresel iklim değişikliğinin yanı sıra hava ve çevre kirliliği problemlerine neden olan fosil yakıtlar yerine çevre dostu, temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı için tüm dünyada çalışmalar hızla devam etmektedir. Günümüz teknolojileriyle güneş, rüzgar gibi temiz kaynakların yaygın kullanılmasını önleyen problemlerin başında bunların kesikli ve düzensiz olmaları ile

günümüz için pratik olarak taşıtlarda yakıt olarak kullanılamaması gelmektedir. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların zaten sınırlı rezerve sahip olması ve yüz milyonlarca yılda oluşmuş bu yakıtların 150-200 sene gibi kısa bir süre içinde hızla tüketilmesi dünyamızı çevre felaketleri ile karşı karşıya bırakmıştır. İnsanların sahip oldukları konfor ve yaşam standardından vazgeçmeleri mümkün olamayacağına göre, fosil yakıtlar yerine yeni bir sentetik yakıt bulunması kaçınılmazdır.

İlk defa 1776'da Henry Cavendish tarafından izole edilen, 1784'te su buharını kızdırılmış metal üzerinden geçirerek hidrojen ve oksijenine ayıran Antoine Laurent de Lavoisier tarafından isimlendirilen hidrojenin gelişim sürecine bakıldığında çalışmaların 200 yıldır sürdüğü görülmektedir. Hidrojen, temiz, çevre dostu, sonsuz, yenilenebilir, her yerde kullanılabilir, kolayca taşınabilir, yüksek kalori değeri ve diğer enerjilere dönüşümünde yüksek verime sahip bir kaynaktır. Hidrojen, oksijen ile enerji vererek yanar ve suya dönüşür. Hidrojenin 141,9 MJ/kg olan enerji içeriğine karşılık, kömürün 34,1 MJ/kg, benzinin 46,7 MJ/kg ve doğalgazın 42,5 MJ/kg enerji içeriği bulunmaktadır. Buna göre, birim kütle başına enerji içeriği konvansiyonel rakiplerine göre çok daha yüksektir. Sadece enerji yoğunluğu ve hafifliği bile hidrojeni, petROLSÜZ geleceğin yakıtı ve enerji taşıyıcısı olarak bir adım öne çıkarmaktadır. Hidrojenin eldesi ve depolanması ekonomik sistemlerle çözüldüğünde, hidrojenin enerji taşıyıcılığı konusunda elektriğe bile üstünlük sağlayacağı düşünülmektedir [20].

Hidrojen günümüzde kullanılan yakıtlara göre birçok avantaja sahiptir. Hidrojen bir yakıt hücresinde kullanıldığında, yüksek verimle enerji elde edilirken, atık olarak sadece saf su oluşmaktadır. Hidrojen kaynağı olarak suyun kullanılabilmesi hidrojenin en önemli avantajlarından biridir. Yapılan maliyet hesaplarına göre hidrojen teknolojisi sistemlerini kullanmak, mevcut fosil yakıt sistemlerinden daha pahalı olmakla birlikte yakın gelecekte artmaya devam edecek petrol ve doğalgaz fiyatları ile bu konudaki eşitliğin gelecek yıllarda sağlanacağı öngörülmektedir. Fosil yakıtların sosyal maliyeti olarak tarif edilen; küresel iklim

değişikliği, hava kirliliği, maden kazaları vb. unsurların dünyaya yılda tahmini 5 trilyon dolar zararı olduğu hesaplanmıştır. Bu sosyal maliyet; fosil yakıt fiyatlarının üzerine konulduğunda, hidrojen bir adım öne çıkmaktadır. Son birkaç yıl içindeki gelişmeler göz önüne alındığında, hidrojen kullanılan sistemlere geçişin beklenenden daha erken olacağı öngörülmektedir [20].

19. yüzyıl ortalarında başlayan endüstri devriminden bu yana, önce kömür daha sonra petrol ve doğalgaz gibi yer altı kaynakları, yoğun bir şekilde insanoğlunun enerji ihtiyacına hizmet ederek, her geçen gün artan bir hızla tükenmektedir. Önceleri sonuçları çok önemsiz olmayan bu artış, çevre kirliliğinin yanı sıra, küresel iklim değişikliğine sebep olmaktadır. Asıl sorunsal tüm bu zararlarının yanında fosil yakıtlardan en çok kullanılan petrol ve doğalgaz rezervlerinin sınırlı olması, 10-20 yıl içinde üretiminin maksimum değerine ulaştıktan sonra azalmaya başlayarak takip eden 50-60 yıl gibi çok kısa bir sürede tükenecek olmasıdır. Günümüz enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile; milyarlarca yıl yetecek enerji devamlı olarak üretilebilecektir.

4.1. Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen elementini ilk olarak 16.yüzyılda İsviçreli kimyacı Paracelsus, asitlerin bazı metaller üzerindeki etkisini araştırırken elde etmiştir. 1766'da İngiliz kimyacı Henry Cavendish ise hidrojenin öbür yanıcı gazlardan ayrı bir gaz olduğunu belirlemiş ve belirli miktardaki asitleri ve metalleri tepkimeye sokarak oluşan hidrojen miktarını ve yoğunluğunu ölçmüştür. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776'da gözlenmiş, hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Laurent Lavoisier tarafından önerilmiştir [21].

Periyodik tablonun başında yer alan hidrojen elementi, yalnızca bir proton ve bir elektrondan oluşan en hafif elementtir. Normal sıcaklık ve basınç altında zehirsiz, kokusuz, tatsız ve renksiz olan hidrojen gazı oksijenle birleştiğinde canlı hayatı için en önemli madde olan su elde edilmektedir. Hidrojen çok hafif bir gaz olup bu fazda, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğalgazın 1/9'u, sıvı haldeki hidrojenin

yoğunluğu ise benzinin ise 1/10'u kadardır. Sıvı haline dönüştürüldüğünde gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ünü kaplamaktadır [22,18]. Atom numarası 1'dir ve atmosfer basıncında -253°C' ye soğutulduğunda sıvı hale geçen hidrojen ortalama olarak, fosil yakıtlardan %26 daha verimlidir [23]. Özgül kütlesi 0,071 g/cm³tür. Sıvı hidrojenin üst ısıl değeri 141,9 kJ/g; petrolün 3,2 katıdır, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg iken, uçak benzinin ısıl değerinin kg başına yalnız 44 MJ olduğu göz önüne alındığında, sıvı hidrojenin uzay araştırmalarında neden roket yakıtı olarak kullanıldığını kolaylıkla anlamak mümkündür [20].

Sıvı hidrojenin birim hacminin ısıl değeri ise 10,2 MJ/m³tür ve petrolün % 28'i kadardır. Gaz hidrojenin birim kütlelerinin ısıl değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2,8 katı kadarken, birim hacminin ısıl değeri 0,013 MJ/m³ tür ve doğalgazın %32,5'i kadardır. Metal hidridlerin kütleli enerji içeriği 2-10 MJ/kg ile sıvı hidrojene göre çok küçükken, hidridlerin hacimsel enerji içeriği 12,6-14,3 MJ/ m³ ile gaz ve sıvı hidrojenden büyüktür [24].

Birim hacim başına ısıl değeri düşük olan hidrojen gazının ısıl değeri, metre küp başına yaklaşık 12 MJ olarak verilmektedir [20]. Evrendeki görünür maddenin %90'ını oluşturan hidrojen doğada en çok bulunan element olup toplam kütleinin dörtte üçünü oluşturur, diğer elementlerin de hidrojen çekirdeklerinin füzyonuyla oluştuğu bilinmektedir [17].

Saf haliyle, olağan koşullar altında iki atomlu bir gaz oluşturmaktadır. Bu gaz, havanın 1/14'ü kadar bir yoğunluğa sahip olduğu için, kaçak anında yer seviyesinde birikmemekte havada hızla yükselip dağılmakta, yanması için gerekli olan %4 konsantrasyonun altına çok hızlı düşmektedir. Yani gazın kendisi kolayca yanıcı ve hatta yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle patlayıcı olmakla beraber, sızıntı sonucu bir yerde birikip kaza riskine yol açması çok zordur [17].

Hidrojen birincil ve yenilenebilir enerji kaynaklarından ya da su gibi değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Yakıt ve yakma ürünlerinin zehirliliği, difüzyon katsayısı, ateşleme enerjisi, patlama enerjisi gibi faktörlere göre belirlenen emniyet değerlendirmesi açısından, hidrojen en güvenilir yakıtlardan

biridir. Hidrojen sıvı ve gaz şeklinde ya da metal hidrit gibi bir çok şekilde depolanabilirken boru hatları veya tankerler yardımıyla uzak mesafelere taşınabilir. Hidrojen diğer yakıtlar göz önüne alındığında daha ileri teknoloji içeren ve daha masraflı güvenlik sistem ve prosedürlerini gerektirse de diğer yakıtlardan daha tehlikeli değildir. Hidrojen üretilirken, taşınırken, depolanırken ve kullanılırken herhangi bir kirletici üretmez veya çevreye herhangi bir zarar vermez. Hidrojenin tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su açığa çıkar, SO_x, CO, CO_x gibi kimyasal oluşumuna sebep olmaz. Hidrojenin yanması yüksek sıcaklıkta gerçekleştiğinde havadaki azot ve oksijenden NO_x oluşabilir fakat bu sorunla diğer yakıtlarda da karşılaşılmaktadır ve üstesinden gelinebilir.

Hidrojen, benzin, propan veya doğalgazdan daha hafiftir. Benzin veya doğal gaz ile karşılaştırıldığında hidrojenin patlama yapması için havada daha yüksek derişimde bulunması gerekir. Patlama için yakıt/hava oranı hidrojen için %13-%18'dir ve bu oran doğalgazın sahip olduğu orandan 2 kat, benzinin sahip olduğundan 12 kat büyüktür. Yakıtlar içerisinde hidrojen birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir. Birim hacim için hidrojen aynı hacimdeki benzin buharından 22 kat daha az patlama enerjisine sahiptir. Temiz ve kokusuz olduğu için sızıntısı benzin veya diğer yakıtlara göre daha zor fark edilir ve yanan hidrojenin alevini farketmek de oldukça zordur [25].

Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir [18]. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir. Hidrojen kullanım verimini, en çok bulunan fosil yakıt olan kömürün diğer yakıt ve enerjilere dönüştürülerek ulaştırmada kullanılması ile kıyaslayacak olursak; 1 ton kömürün benzine dönüştürmesi ile çalışacak otobüsün 708 km, elektriğe dönüştürülmesi ile 772 ve hidrojene dönüştürülmesiyle 1030 km yol gidebileceğini görmekteyiz [26].

Hidrojenin yanması için havada hacimce %4 - %75 arasında olması gerekir. Bu aralık diğer yakıtlarda düşüktür. Örneğin doğalgaz için %5,3 - %15 propan için %2,1 - %10 ve benzin için %1 - %7,8'dir. Herhangi bir kaçak anında hidrojenin en

düşük tutuşma sınırı statik elektrikten kaynaklı bir kıvılcımla bile tutuşan benzininkinden 4 kat, propaninkinden 1,9 kat ve doğalgazinkinden de çok az büyüktür [25,27].

Bütün bu özelliklerinin yanı sıra hidrojen içeren prosesler bütün olarak düşünüldüğünde; eldesi, depolanması, taşınması ve yakılması ile ilgili aşılması gereken bir dizi sorunları da beraberinde getirmektedir. Örnek olarak içten yanmalı motorlarda oksijenin hızlı verilmesi halinde, atık ürün olarak su buharının yanında, nitrikoksitler gibi karsinojen sera gazları da ortaya çıkmaktadır. Sadece su buharı çıkması isteniyorsa, yanma odasına oksijenin yavaş verilmesi gerekmektedir. Bu durumda ise prosesten elde edilen güç azalmaktadır. Dolayısıyla, hidrojeni yüksek verimli yakıt hücrelerinde enerjiye dönüştürmek daha mantıklı bir hidrojen enerji sistemidir. Bu avantajın yanında önümüze çıkan problem ise ilgili teknolojinin ekonomik hale gelmesini beklemenin zaman alacağıdır. Günümüz teknolojisiyle içten yanmalı motorlar ufak bir bedel karşılığında hidrojenle zenginleştirilmiş konvansiyonel yakıtları yakmak mümkündür. Fakat halen, otomobil üreticileri yakıtı henüz kolay ve ucuz olarak üretilmeyen bir arabayı üretmek, enerji firmaları da kullanıcısı olmayan bir yakıtı günümüz için yatırım yapmak istememektedir. Bu kısır döngüden kurtulmak için de hidrojenin, hiç değilse fotovoltaikler ekonomik hale gelinceye kadar fosil yakıtlardan üretilip, aynı zamanda yakıt hücreleri ekonomik hale gelinceye kadar da içten yanmalı motorlarda konvansiyonel yakıtların zenginleştirilmesinde kullanılması, otomobil yakıtı olarak şimdiden piyasaya sürülmesi gerekmektedir [17].

4.2. Hidrojen Üretimi

Hidrojenin üretiminde çeşitli yöntemler bilinmektedir. Aslında doğa, en önemli ve en verimli hidrojen üreticisidir. Bitkiler, fotosentez yoluyla karbondioksit ve suyu güneş ışığı altında bünyesindeki klorofiller yardımıyla önce hidrojen ve oksijene dönüştürmekte, hidrojenden karbonhidratları üretirken oksijeni de diğer canlıların soluması için atmosfere vermektedir. Tek hücreli organizmalar ve

bakteriler de normal sıcaklıklarda çeşitli moleküler süreçler yardımı ile hidrojen elde etmektedirler. Bakterilerde bulunan bazı enzimler de karmaşık elektronik yapılarıyla proton ve elektrondan hidrojen molekülünün oluşmasına aracılık etmektedirler.

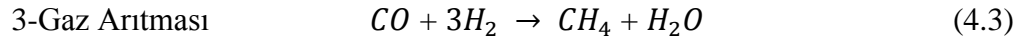
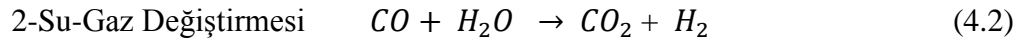
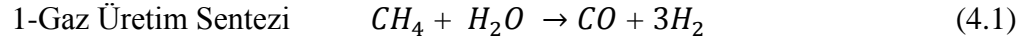
Geleceğin enerji kaynağı olarak gösterilen hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, kömür, su, hava ve doğalgaz gibi değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen aynı elektrik gibi ikincil bir enerji, yani enerji taşıyıcısı olup, birincil enerji kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir. Hidrojenin basit ve saf üretildiği yöntemlerden biri suyun elektrolizi olmakla birlikte bu yöntem, elektroliz sırasında gerçekleşen kayıplar nedeniyle yüksek maliyete sahiptir. Bu problemin önüne geçmek için kayıpları en aza indirecek uygun elektrot ve elektrolit ortamları üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Çalışma ortamı olarak yakıt hücrelerinde de olduğu gibi potasyumhidroksit ve sodyumhidroksit çözeltileri kullanılmaktadır. Elektrolizde kullanılacak elektrotların düşük gerilim göstermesi gerekmektedir. Ancak çözeltideki korozyon iyonlar metal yüzeyine işleyerek elektrotun korozyonuna neden olmaktadır. Elektroliz yönteminde elektrot olarak kullanılacak metallerin çalışma ortamındaki korozyon dayanımları da oldukça önemlidir. Elektrotların ömrünü kısaltan çözeltideki korozyon iyonlar aynı zamanda elektrotun geriliminin arttırmasına ve elektrolitin kirlenmesine neden olacaktır. Hidrojenin temiz enerji kaynakları ile sudan elde edilmesi insanoğlunun dünyadaki varlığı boyunca kullanabileceği, hayatına eş süreli, bir anlamda sonsuz bir enerji, hem de dünyanın küresel ısınma başta olmak üzere tüm çevre problemlerinden kurtulması anlamına gelmektedir. Hidrojene 21. yüzyılın değil güneş ömrü olarak öngörülen 5 milyar yılın da yakıtı olacağı söylenebilir. Çünkü doğadaki tüm enerjilerin kaynağı güneş, güneşteki enerjinin kaynağı da hidrojendir [28]. Güneş enerjisi ile elektrolizi, elde edilen hidrojenin istenilen yere boru hatları veya depolanarak taşınması ve daha sonra oksijenle birleşerek yakılması sonucunda elde edilen enerjinin sözde atık maddesi sadece saf su veya su buharıdır. Rüzgar ya da hidroelektrik tesislerinin ürettiği yüksek enerjinin kullanılmayan atıl kısmı ile hidrojen üretilir. Dolayısıyla elektrik enerjisi hidrojen enerjisine dönüşmüş

olacaktır. Nükleer enerji tesislerinin bir çıktısı olan ısı enerjisi, elektroliz sıcaklığını arttırmada kullanılarak, hidrojen üretim verimliliğini arttırabilir.

Günümüzde hidrojen üretiminin %48'i doğal gazdan, %30'u ham petrolden, %18'i kömürden ve %4'ü suyun elektroliz yolu ile ayrıştırılmasıyla üretilmektedir [29].

4.2.1. Doğalgazın Buhar Reformasyonu

Hidrokarbonların (genellikle doğalgaz) buhar reformasyonu hidrojen üretimi için en yaygın, ekonomik ve verimli yöntemdir. Yöntem basitçe 3 ana adım içerir.



Reformasyon reaksiyonu doğalgaz veya fuel oil'in yanmasıyla oluşan çok güçlü bir endotermik ve enerji sağlayıcı reaksiyondur. Reaksiyon sıcaklığı genelde 700-925 °C arasındadır. Buhar reformasyon yöntemi verimliliği enerji girişi ve üretilen hidrojen oranı ile hesaplanır ki bu değer yaklaşık olarak %65 ile %75 arasındadır [30].

4.2.2. Parçalı Oksidasyon

Parçalı oksidasyon hidrokarbonları petrol yağından daha ağır hale çevirmek için kullanılır. Bu işlemde işlem sıcaklığı yaklaşık olarak 1150 °C ile 1350 °C arasındadır. Genel olarak parçalı oksidasyonun verimi buhar reformasyonundan düşük olup %50 civarındadır [30].

4.2.3. Doğalgazın Termal Olarak Parçalanması

Doğalgazın termal ayrımı uzun yıllardır değişik ürünler elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bir metan-hava alevi sıcaklığı 1400 °C'nin üzerine çıkarmak için kullanılır. Yan ürün (siyah karbon) üretebildiğinden dolayı bu yöntem

ekonomik olarak oldukça uygundur. Ayrıca hidrokarbonlardan hidrojen üretiminde CO₂ emisyonu sağlamayan tek yöntem olması da önemlidir [30]. Enerji verimi buharlı metan reformasyonu için %86'dır. Doğalgazın buhar reformasyonunun maliyeti, kömür ya da su elektrolizi ile elde edilenden %33 daha ucuzdur.

4.2.4. Kömür Gazlaştırılması

Kömür gazlaştırılması işleminde toz haline getirilmiş kömür atmosferik basınç altında oksijen ve buhar ile hızlıca parçalanarak oksidasyona uğratılır. Kömür gazlaştırılması işlemi özellikle katı yakıt taşıma gerekliliği ve büyük miktardaki kül atığından dolayı çok detaylı bir işlem halini almaktadır. Kömürün gazlaştırılması işleminde ortamdaki kükürtün uzaklaştırılabilmesi bu yöntemi bir adım öne çıkarmaktadır. Genel olarak bakıldığında ise kömür ucuz bir yakıt olmasına karşın kömür gazlaştırma işlemi hidrojen elde etmek için ucuz bir yöntem değildir. Ortalama olarak 6 kg kömürden 3,785 L benzine eşdeğer 1 kg hidrojen elde olunur [29]. Kömür dünyanın rezervi en bol fosil yakıttır. Bilinen kömür yataklarının günümüz için ömrü 200 yıl olsa da, iyimser hesaplarla 400 yıla kadar uzayabileceği öngörülmektedir [29]. Bu yöntem daha çok zengin kömür rezervlerine sahip ülkelerde kullanılır.

4.2.5. Biyokütleden Hidrojen Üretimi

Biyokütleden hidrojen bir pirolisis/gazlaştırma işlevi ile elde edilebilir. Biyokütle bir reaktör içinde yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında işleme alınır. İşlem sonunda hidrojen, metan, karbondioksit, karbonmonoksit ve nitrojen elde edilir. Yüksek saflıkta hidrojen elde edilebilir. Tüm sistem biyokütle hazırlama birimi ve reaktör dizaynı dışında kömür gazlaştırma santraline çok benzer. Ayrıca biyokütlenin daha düşük kalorifik değerinden dolayı kömür gazlaştırma santralinden daha büyük bir alana kurulmuşlardır [30].

4.2.6. Elektroliz

Suyun doğru akım (DC) kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması işlemine elektroliz denmektedir. Su elektrolizinden hidrojen üretimi 50 yılı aşkın bir süredir bilinen basit bir altyapıya sahip olan ve hareketli parçası olmayan bir sistemdir. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinen elektroliz yönteminde ilke olarak, bir elektroliz hücresi içinde, genelde metal veya karbon plakalar olan iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvı bulunmaktadır. DC kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektrota doğru gerçekleşmektedir. Oluşan yüklü parçacıklardan hidrojen iyonu pozitif elektrik yüküne sahiptir ve negatif elektrotta toplanır, oksijen ise negatif yüke sahip olduğundan pozitif elektrotta doğru hareket eder. Bunun sonucu olarak da, elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrışacaktır. Su iyi bir iletken olmadığı için elektrolitin içine iletkenliği artırıcı olarak genelde potasyum hidroksit gibi bir madde eklenir.

Suyun elektrolizi için, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1,23 volt yeterlidir. Teorik olmayan koşullarda , elektroliz işleminde daha yüksek gerilimlerde kullanılır. Hidrojen üretim hızı, devreden geçecek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, yüksek akım yoğunlukları gerekmektedir. Bundan dolayı pratikte suyun ayrıştırılması için her bir elektroliz hücresi başına uygulanan gerilim 1,7'den fazladır ve 2 volt olarak kabul edilir [21].

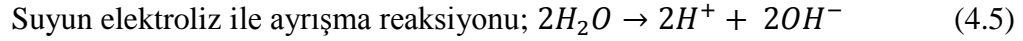
Kuramsal olarak, bir metreküp oksijen için 2,8 kW/h elektrik enerjisi yeterli olmakla birlikte, yukarıda özetlenen nedenlerle pratikte kullanılan elektrik enerjisi miktarı bir metreküp hidrojen üretimi için 3,9 - 4,6 kW/h arasında değişmektedir. Buna göre elektroliz işleminin verimi %70 dolayında olmaktadır. Ancak, son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde %90 verim elde edilmiştir.

Elektrolizde 2 su molekülü, 4 pozitif yüklü hidrojen ve 2 negatif yüklü oksijen iyonuna ayrılırlar. Her bir oksijen iyonu bir hidrojen iyonu ile birleşerek 2 hidroksit

iyonu oluşturur. 2 hidrojen iyonu ise kalır ve her biri 2 hidrojen atomunu oluşturmak için katotta 2 elektrona bağlanırlar. Hidrojen çift atomlu bir molekül olduğu için 2 hidrojen atomu 1 adet hidrojen molekülüne dönüşür. Elektrik suyun iletkenliğini arttırarak, iyonların anota doğru çekilmesine izin verir ve 2 negatif hidroksit iyonu da anota gider [31].

Bir elektrolizde, elektrik reaksiyonlarının başlaması için gerekli olan minimum potansiyele ayrışma gerilimi denir. Teorik ayrışma gerilimi anot ve katotun denge haline karşı gelen elektron potansiyelleri Nernst denklemi ile hesaplanarak bulunabilir [21].

$$V_{AG} = V_{Katot} - V_{Anot} \quad (4.4)$$



denklemi göz önüne alındığında;

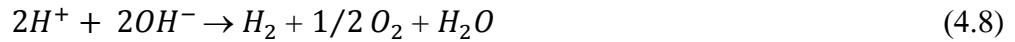
Katotta hidrojen çıkışı:



Anotta oksijen çıkışı:



Toplam reaksiyon:



Suyun elektrolizinde ayrışma gerilimi şöyle hesaplanır;

Katot potansiyeli;

$$V_{Katot} = V_{AG} - 0,059/2 \log (10^{-7})^2 \quad (4.9)$$

Anot Potansiyeli;

$$V_{Anot} = V_{AG} - 0,059/2 \log (1/10^{-7})^2 \quad (4.10)$$

Suyun teorik ayrışma gerilimi (4.4) bağıntısına göre;

$$V_{AG} = 0,413 - (-0,814) = 1,227 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

Bu değer suyun teorik ayrışma gerilimidir. Gerçekte suyun ayrışması için her iki elektrotta oluşan aşırı gerilimlerin de yenilmesi gerekir. Suyun gerçek ayrışma gerilimi 1,7 Volt'tan daha yüksektir [21].

$$1 \text{ kmol } e^- \text{ yükü } 96500.103 \text{ Coulumb' dur [21].} \quad (4.11)$$

Bir elektroliz devresinden geçen yük miktarı Q (birimi *Coulumb*), ; I akım şiddeti (birimi amper) ve t zaman (birimi saniye) olarak alındığında bağıntısıyla bulunur [21].

$$Q = I \cdot t \quad (4.12)$$

Elektroliz işleminde V , ayrışma gerilimi (birimi Volt), I akım şiddeti (birimi amper) ve Δt (birimi saniye) süre olarak alındığında yapılan elektrik işi W_{el} (birimi *Joule*) ise;

$$W_{el} = V I \Delta t \text{ bağıntısıyla bulunur [21].} \quad (4.13)$$

Elektroliz işleminde kullanılacak enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi temel ilkedir. Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken sistemlerdir. Paneller birden çok fotovoltaiik hücreden meydana gelir. Bu sistemlerde hidrojenin güneş enerjisi ile üretimi iki basamaklı olarak gerçekleştirilir. İlk basamakta, güneş pilleri aracılığıyla DC elde edilir. Daha sonra ikinci basamak olarak bu akım ile suyun elektrolizi gerçekleştirilir. Burada güneş pillerinin verimi ortalama %15, elektroliz hücresi verimi %75 den daha büyük alınabilir. Dünyanın 2/3'nün sularla kaplı olduğu ve her gün dünya üzerine düşen güneş enerjisinin bir yılda kullanılan enerjiden daha büyük olduğu düşünüldüğünde, ortaya çıkan potansiyelin boyutu gelecek için umut vericidir [32].

4.2.7. Suyun Direk Termal Ayrıştırılması (Termoliz)

Su termal olarak 2000 K sıcaklığının üzerinde ayrılabilir. Gazların karışım ürünü oldukça yüksek sıcaklıklardadır. Bu işlemin en büyük problemi reaksiyonu gerçekleştirmek için gerekli olan malzemelerin bu sıcaklığa dayanamamasıdır. Gelecekte gelişen teknoloji ile daha yüksek sıcaklıklara dayanan malzemelerin üretilmesi bu yöntemi yaygınlaştırabilir [30].

4.2.8. Termokimyasal Çevrimler

Hidrojenin termokimyasal üretimi termoliz için gereken sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarla suyun kimyasal parçalanmasına izin verir. Bir çok termokimyasal çevrim mevcuttur ancak bunlardan sadece 20-30 kadarı günümüzde hidrojen üretimi için kullanılabilir durumdadır.

Bunlardan bazıları şunlardır;

- Sülfürik Asit-İyot Çevrimi
- Hibrid Sülfürik Asit Çevrimi
- Hibrid Sülfürik Asit-Hidrojen Bromür Çevrimi
- Kalsiyum Bromür-İyot Oksit Çevrimi

Sıcaklığa bağlı olarak değişmekle beraber bu yöntem ile oldukça yüksek (%40-%50) verim elde etmek mümkündür. Ancak kimyasalların saldıdığı toksik atıklar ve yüksek sıcaklıklarda malzemelerde oluşan korozyon problemi metodun gelişmesinin önünde duran problemler arasında yer almaktadır [30].

4.2.9. Fotoliz

Fotoliz sudan hidrojen elde etmek için enerji kaynağı olarak gün ışığını kullanan sistemdir ve fotobiyolojik sistemler, fotokimyasal çeviriciler veya fotoelektrokimyasal hücreler ile desteklenebilir [30]. Hidrojenin güneş enerjisi kullanılarak üretilmesi, hem çevre yönünden hem de ekonomik yönden büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükeneceği gerçeği göz

önüne alınarak son yıllarda yapılan çalışmalar güneş-hidrojen hibrit sistemleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Isıl işlemlerde, güneş enerjisi önce ısıya çevrilir ve ya bu ısı enerjisinden yararlanılır ya da mekaniksel veya elektriksel enerjiye dönüştürülür. Işık fotonları kullanılarak hidrojen elde etmek için fotokimyasal sistemler, güneş pili sistemleri veya foto biyolojik sistemlerden biri kullanılır [32].

4.2.10. Fotoelektrokimyasal Sistemler

Bu yöntemde suyun elektrolizi için yüksek sıcaklık ve elektriğe gerek duyulmadan, doğrudan güneş enerjisinin morötesi (UV) bölgesi kullanılmaktadır. Hidrojen üretmek için iki elektrokimyasal sistem kullanılır. Bunlardan birisi katalizör olarak çözünebilir metal bileşikleri kullanırken diğeri yarı iletken yüzeylerinden faydalanır. Çözünebilir metal bileşiğinin çözülmesi sırasında bileşik, güneş enerjisini soğurarak bir elektrik şarjı oluşturur ve su moleküllerinin parçalanmasını sağlar. Bu yöntem fotosentez olayını taklit etmektedir. Diğer yöntemde ise yarı iletken elektrotlar bir fotokimyasal pil içerisinde optik enerjiyi kimyasal enerjiye çevirirler. Yarı iletken yüzeyi iki amaca birden hizmet eder, bir taraftan güneş enerjisini soğururken diğeri taraftan elektrot olarak çalışır. Bu yöntem, herhangi bir oynar parça veya makine kullanımı gerektirmediğinden, diğer yöntemlere göre ucuzdur ve verimi yüksektir [32].

4.2.10.1. Fotobiyolojik Sistemler

Hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için ekonomik ve doğayla uyumlu bir üretim tekniğinin geliştirilmesi gerekir. Bu nedenle biyolojik olarak hidrojen üretimini gerçekleştiren mikroorganizmalardan yararlanmak gündeme gelmiştir. Doğada bulunan anaerobik bakteriler, fotosentetik bakteriler ve alglerin birçok türü, metabolizmalarının gereği olarak hidrojen üretmekte; ayrıca kullanılan hammaddeler ve oluşan tüm ürün ve yan ürünler, biyolojik çevrimin bir parçası olduğu için üretim süreci doğaya zarar vermemektedir.

Biyolojik hidrojen üretiminin büyük ölçeklerde gerçekleştirilmesinin önündeki önemli engeller, üretim hızının düşük, maliyetin yüksek olması, bakteri davranışının çoğu zaman yeterli bir biçimde öngörülememesi dolayısıyla istikrarlı bir üretim performansının sağlanamaması şeklinde sıralanabilir.

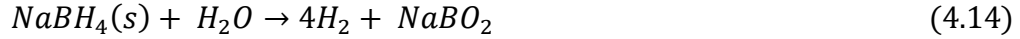
Fotosentetik organizmalar, güneş enerjisini bütün dünyada çok büyük miktarlarda depolayan bir enerji depolama mekanizması oluşturmaktadır. Normal olarak fotosentetik sistemler karbondioksiti karbondihidratlara indirger, fakat doğrudan hidrojen vermezler. Foto sentetik bakteriler, foto fermantasyon sonunda uygun organik bileşikler ortama verildiğinde ve oksijensiz ortamda büyütüldüklerinde hidrojen üretebilmektedirler. Bugüne kadar hidrojen üretebilen en verimli foto biyolojik sistemlerin, yeşil alg ve cyanor-bakteria gibi alglar olduğu anlaşılmıştır. Yeşil alglerin havasız ortamda hidrojen ürettiği saptanmış ve verimleri %10 olmuştur [32].

4.2.11. Bor Minerali ve Hidrojen Üretimi

Ülkemiz dünya bor rezervinin yaklaşık %64'üne sahiptir. Bir çok alanda kullanılan ve üzerine en çok araştırmanın yapıldığı minerallerden biri olan bor mineralinin 3 özelliği öne çıkmaktadır [30]:

- Hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılabilir
- Hidrojenden daha iyi bir enerji hammaddesidir.
- Füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabilir.

Bor üzerinde yapılan araştırmalardan enerji elde etmek için kullanılan hammaddeler saf su ve sodyum bor hidrittir. Sodyumborhidrit sodyumlu bor tuzunun rafinasyonu sonucu elde edilen ve deterjan sanayinde de kullanılan bir üründür. Geliştirilen bu teknoloji taşımacılığın yanı sıra taşınabilir enerji sağlayıcı piller için de uygulanabilir bir teknoloji olmuştur. Yakıt pillerinde sodyumborhidritin kullanımı fosil yakıtlardan daha pahalı olan ve eldesi, depolaması, nakli zor olan hidrojenin dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır.



Yukarıdaki denkleme göre su içerisinde çözünen sodyum borhidrit, bir karışım olarak depolanmakta, enerji üretmek için hidrojene ihtiyaç duyduğunda bu karışım içine tatbik edilen katalizör vasıtasıyla kimyasal reaksiyon başlatılmaktadır. Reaksiyon sonucunda gaz halinde hidrojen elde edilir [30].

4.3. Hidrojen Üretimi ile İlgili Öneriler

Yakıt olarak hidrojenin sudan, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilen elektrikle üretilmesi en verimli yaklaşımdır. Elektroliz için elektrik gereksinimi fosil yakıtlardan, hidroelektrik kaynaktan, nükleer enerjiden, jeotermal enerjiden, güneş, rüzgar ve deniz dalga enerjilerinden elde edilebilir.

Hidrojen üretimi sırasında tüketilen enerji miktarı günümüz için bazı endişelere sebep olmaktadır. Hidrojen üretim esnasında su ya da fosil yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması doğal kaynakların tükenmesine, buna karşın CO₂ üretilmesine neden olurken; suyun elektroliz edilmesi için ihtiyaç duyulan enerjinin önemli bir kısmı, yine fosil yakıtlardan elde edilen elektrik enerjisiyle sağlanmaktadır.

4.4. Hidrojenin Depolanması

Hidrojen, birim kütle için çok yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olmasına karşın, bir gaz olarak, normal şartlarda hacim başına çok düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle, depolanıp yüksek basınçta saklanması ya da sıvılaştırılması gerekmektedir. Kullanım yerine ve ihtiyaca bağlı olarak farklı tipte depolama yöntemlerine başvurulmaktadır. Depolama sistemleri için maliyet geleceğin enerji seçeneklerinden biri olan hidrojen gazının kullanımı için en kritik faktördür.

Bugünün depolama yöntemleri pahalıdır ve çeşitli uygulamaların gereksinim gösterdiği performansları karşılamamaktadır. Yüksek enerji yoğunluğuna ve düşük ağırlığa sahip taşınabilir depolara ihtiyaç duyulmaktadır. Normal sıcaklık ve basınç

altında hidrojen çok düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu sebeple depolama konusunda amaç, ağırlık ve hacimsel olarak depolama yoğunluğu açısından benzinle karşılaştırılabilir teknolojilerin gerçekleştirilmesidir. Ekonomik ve pratik hidrojen depolama sistemi; kapasiteye, depo malzemelerinin yapısal bileşenlerine, toplam maliyet ve hidrojenin emniyetli kullanımı için gerekli olan basınç ve sıcaklık şartlarına bağlıdır.

Günümüzde büyük miktarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunamamış olması, depolanabilirlik özelliği ile hidrojeni bir adım öne çıkarmaktadır. Günümüzde hidrojenin depolanabilirliğinden yararlanılarak hidroelektrik santrallerinin belirli yoğunlukta sürekli çalışması sonucunda üretilen enerjinin ihtiyaç fazlası, suyun elektrolizi ile hidrojen üretiminde değerlendirilmekte ve bu şekilde yüksek miktarlarda enerji depolanabilmektedir.

4.4.1. Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama

En çok bilinen yöntem hidrojeni sıkıştırılmış gaz olarak basınçlı tanklarda depolamaktır. Bu yöntem, yer üstündeki tüm hidrojen depolama yöntemleri arasında en düşük maliyetli, en elverişli ve uygun olanıdır. Depolama işlemi oda sıcaklığında yüksek basınca dayanıklı tanklarda yapılmakta, tankın ağırlığına ve tankın tipine bağlı olarak ağırlıkça %1-7 hidrojen depolanmaktadır. Daha hafif, dayanıklı ve ağırlıkça daha fazla hidrojen depolayabilen tanklar üretimi daha ileri teknolojiler gerektirdiğinden daha maliyetlidir. Dolayısıyla yöntem büyük miktarda hidrojen depolama için ekonomik değildir. Bu yöntemde hidrojen gazının sıkıştırılması için hidrojenin enerji içeriğinin %20-%25'ine ihtiyaç vardır [33].

4.4.2. Karyojenik (Dondurulmuş) Sıvı Halde Depolama

Hidrojenin sıvı olarak saklanması sistem olarak ağırlıktan büyük tasarruf sağlarken, sıvılaştırmak için büyük enerji ihtiyacı karşımıza çıkar. Bu enerji yaklaşık olarak hidrojenin tutuşma enerjisinin %30'una yakın bir enerjidir [21]. Bu oran büyük olsa bile, uzay araçları ve roketlerdeki sıvılaştırma masrafları göz ardı edilmektedir.

Hidrojenin sıvılaştırılması gaz hidrojenin kompresörlerde yüksek basınçta sıkıştırılması, sıkıştırılmış gazın sıvı nitrojen ile soğutulması ve türbinlerde genişletilmesiyle olur. Sıvılaştırma işlemi, gazın sıvı hale gelene kadar soğutulması ile gerçekleştirilir ve istenilen soğutmayı sağlamak için kompresörlere, ısı değiştiricilere, türbin ve kısılma valfine ihtiyaç duyulur [34]. Sıvılaştırılmış hidrojen benzinin sahip olduğu enerji yoğunluğunun dörtte birine sahiptir. Sıvılaştırılmış hidrojeni depolayacak tankların çok iyi yalıtımları gerekir. Buna karşın tankın etrafında oluşabilecek buzlanma, tankın ve yalıtımının çürümesine neden olabilir. Hidrojen deposu yalıtımları genellikle pahalı ve hassastır. Sıvılaştırılmış hidrojeni depolayacak tankın oldukça kalın ve ağır bir gövdesi olması gerekmektedir. Hidrojen küçük ve enerjik bir molekül olduğu için, onu çevreleyen yüzeylerin içinde ilerleme eğilimi gösterir. Bu durum da yine tankın zayıflamasına neden olan bir başka etkidir.

Yüksek basınç seviyesi hidrojen ekonomisinin önünde ki en büyük engellerden biridir. Atmosfer basıncında ve 20 K'de, yalıtılmış tankta depolanan hidrojen sıvı şekilde olduğu için, eşdeğer ağırlıktaki gazolinden 3 kat fazla enerji içerir ve eşdeğer enerji içerdiği durumda da 2,7 kat fazla hacim gerektirir. Tank ve yalıtım dahil ağırlıkça %16 hidrojen depolanabilir. Sıvı hidrojen, 900 bar basınç altındaki hidrojen gazıyla aynı 71 kg/m^3 yoğunluğa sahiptir. Ancak sıvı depolama, gaz sıkıştırmaya göre daha düşük basınçlarla çalışıldığı için daha emniyetlidir. Diğer bir dezavantaj yalıtıma rağmen tanka ısının sızmasıdır. Bu sızma sonucunda hidrojen kaynar. Sıvı hidrojen büyük tanklarda depolanmışsa günlük %0,06'sı, küçük tanklarda depolanmışsa günlük %3'ü buharlaşarak kaybolmaktadır. Bu oranın azaltılması izolasyona ve tank basıncına bağlıdır fakat basınçlı tanklarda da ağırlık ve boyut problemi karşımıza çıkmaktadır [33].

Hidrojenin basınçlı gaz veya sıvılaştırılmış olarak taşınması esnasında ciddi emniyet sorunları bulunmaktadır. Kısaca, gelecek uygulamalarda hidrojenin verimli ve emniyetli bir şekilde depolanması, hidrojen ekonomisinin önünde çözülmesi gereken önemli bir problemdir.

4.4.3. Metal Hidrit Sistemi ile Depolama

Hidrojen metallerde, alaşımlarda ve ara metallerde hidrür olarak depolanabilir. Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun, güvenilir ve az yer kaplayan bir yöntem olmasına karşın, ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya karşımıza çıkmaktadır. Metal hidrit sistemler basınca dayanıklı bir tank, parçacık filtresi, metal alaşım, soğutma ve ısıtma düzeneklerinden meydana gelmektedir. Bu sistemlerde hidrojenin geri kazanılması için gereken sıcaklık çok yüksektir ve de tüm hidrit sistemlerin doldurulması uzun zaman almaktadır. Ayrıca bu malzemelerin düşük ısı iletim katsayıları ve oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılması gerektiği için iyi bir ısı dizayna ihtiyaç vardır. Kimyasal bir yöntem olan metal hidrit depolama işlemi, hidrojenin kimyasal olarak metal, metaloid elementler ve alaşımlara bağlanması şeklinde gerçekleşir. Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Metal ve hidrojen genellikle iki farklı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdur. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya uygun yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Hidrojenin metallere yaptığı kimyasal bağ ve reaksiyon ısı birleşimiyle oluşan hidritler sadece hidrojeni değil aynı zamanda ısıyı da depolarlar. Hidritlerin hem sabit hem de hareketli teknik uygulamalarda kullanılabilmesi de bu ısı ve hidrojeni beraber depolaması sayesinde olmaktadır. Kullanım sırasında ise ısıtma ile hidrojen salınır [35].

Doldurma işlemi:



Boşaltma işlemi:



Gaz hidrojenle reaksiyona girerek metal hidrit oluşturabilen bir çok element, metal ve alaşım bulunmaktadır [34]. Araştırma aşamasında olan uygulamalarda

ağırlıkça %7 hidrojen depolanabilmektedir. Sıkıştırılmış gaz veya karyojenik sıvı depolamanın aksine metal hidritleri yeniden doldurulmada çok az enerji gerektirir. Ancak yakıtın dışarıya salınımı için enerji harcanır. Hidrojenin bir metal tarafından emilme ve salıverilme işlemi hidrojenin basıncına, metalin sıcaklığına ve hidrojenin akış hızına bağlıdır.

4.4.4. Karbon Adsorpsiyon Tekniği İle Depolama

Bu teknik basınç altındaki hidrojen gözenekli süperaktif grafit yüzeyinde depolanır. Mevcut sistem ağırlıkça %4 hidrojen depolar. Bu teknik sıkıştırılmış gaz depolamaya benzer, ancak burada basınçlandırılmış tank, grafit ile doldurulur. Grafitler ek ağırlık getirmesine rağmen aynı basınçta ve tank boyutunda daha fazla hidrojen depolamaya elverişlidir [33].

4.4.5. Cam Mikrokürelerde Depolama

Bu yöntemde depo olarak çapları 25-500 µm arasında değişen ve çeper kalınlıkları yaklaşık 1 µm olan cam küreler kullanılır. Hidrojen bu kürelere yüksek basınç ve sıcaklık altında depolanmaktadır. Bu mikro küreler 200-400 °C'de hidrojen gazı ile doldurulur. Yüksek sıcaklıkta cam kürenin kazandığı geçirgenlikle gaz kürelerin içine dolar. Cam küre oda sıcaklığına soğutulduğunda ise, hidrojen kürelerin içine hapsolür. Kullanılacağı zaman kürelerin ısıtılması ya da kırılması ile hidrojen tekrar elde edilir [33].

4.4.6 Yerinde Kısmi Oksidasyon İle Depolama

Benzin veya dizel gibi geleneksel yakıt kullanılan kısmi oksidasyon süreci doğrudan %30 hidrojen gazı ve %20 karbonmonoksit verir. Daha sonra karbonmonoksit su buharı ile tepkimeye girerek yakıt hücresinde kullanıma hazır hidrojen ve karbondioksit gazı oluşturur [33].

4.4.7. Karbon Nano Tüpler İle Depolama

Karbon nano tüpler, üzerlerindeki mikroskobik gözeneklerde ve yapıları içinde karbon depolayabilen tüplerdir. Karbon atomları ve gaz molekülleri arasında oluşan çekim kuvveti nedeniyle gaz depolamaya en elverişli maddelerden biridir. Nano tüplerdeki absorbe işlemi, karbon atomlarının hidrojen moleküllerine uyguladığı Van Der Waal's kuvveti ile gerçekleşmektedir. Yani kimyasal değil, fiziksel bir olaydır [36]. Karbon nanotüpler kısaca grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron seviyesindedir. Karbonu soğurma ve serbest bırakmada metal hidritlere benzerlikleri ile birlikte avantajları depolayabildikleri hidrojen miktarındadır [36]. Karbon nano tüpler kendi ağırlıkların %4,2 ila %65'e kadarını hidrojen olarak depolayabilmektedirler. Karbon nanotüplerin hidrojen depolama kapasiteleri nanotüpün cinsine (tek duvarlı, çok duvarlı), tüplerin kapalı veya açık olmasına, tüp ölçülerine (tüp çapı ve uzunluğu v.b) ve tüp yüzeylerinin aktifliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

4.4.8. Mağaralarda Depolama

Bütün bu yöntemlerin dışında, hidrojeni sıkıştırılmış gaz olarak depolamanın en ucuz yollarından birisi, doğalgaza benzer şekilde, yeraltında, tükenmiş petrol veya doğalgaz rezervuarlarında depolamaktır. Hidrojen yeraltında hem doğal, hem sonradan yapılan mağaralarda depolanabilmektedir. Depolanan hidrojenin yılda %1-3'ü arası, sızıntı nedeniyle kaybolmaktadır [37]. Hidrojenin yeraltında depolanması büyük miktarlardaki hidrojen için en düşük maliyetli depolama yöntemidir.

4.5. Hidrojenin Taşınması

Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı ya da metal hidritlerle katı halde taşınabilir. Çift çeperli yalıtılmış 25 m³ hacmindeki tanklara konulan sıvılaştırılmış hidrojen, karayolu ile yine benzer şekilde 130 m³ hacminde tanklara konulan sıvı hidrojen ise

demiryolu ile taşınabilmektedir. En ucuz taşıma yöntemi, taşınacak hidrojenin miktarına ve taşıma yapılacak mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Hidrojenin taşınması karayolu, demiryolu, denizyolu ve boru hatları gerçekleştirilmektedir [38].

4.5.1. Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması

Sıkıştırılmış gaz hidrojen yüksek basınçlı silindirler, tüp treylerler ve boru hatları kullanılarak taşınabilir. Hidrojen gaz halde taşınırken, tank kapasitelerini maksimum kullanabilmek için çok yüksek basınçlarla sıkıştırılmalıdır [38].

4.5.2. Sıvı Hidrojenin Taşınması

Sıvı hidrojen, yalıtılmış tanklarla, buharlaşmayı önleyebilecek şekilde taşınabilir. Isı transferini minimize edebilmek için sıvı hidrojen tankının dış yüzeyini soğutmak amacıyla bazı tankerlerde sıvı nitrojen ısı kalkanları kullanılır [41]. Sıvı hidrojenin taşınmasında ana problem özel izolasyon ihtiyacı ve sıvı hidrojenin pompalama ve soğutma kayıplarıdır [38].

4.5.3. Metal Hidritlerin Taşınması

Hidrojen, metal hidrit tarafından absorbe edildikten sonra metal hidrit ulaşım araçlarından kapasitesine uygun olan herhangi birine yüklenerek taşınır ve boş hidrit konteyneri ile değiştirilir ya da konvensiyonel tanker kullanılır. Metal hidritlerin taşınmasında maliyeti en çok etkileyen baş faktör ilk yatırım maliyeti olarak metal hidrit ve konteynerin maliyetidir. Bir kez doldurulduktan sonra hidrit konteynerleri herhangi bir kargo gibi mesafe ve ağırlığa bağlı olan maliyetlerle taşınırlar [38].

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Fakat hidrojen çelikleri zayıflatıp, kırılabilir hale getirdiği için, bugünkü doğalgaz dağıtım şebekesinden olduğu gibi yararlanılarak dağıtılması mümkün değildir. Hidrojen için yapılabilecek özel dağıtım şebekelerinin ise çok pahalı sistemler olacağı ortadadır.

Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bugüne kadar geliştiren bir çok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47 kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir. Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyet artmaktadır. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi ile oluşan kayıplar ve yakıt ikmali zorluğudur.

Hidrojen iletiminde diğer bir alternatif ise, hidrojen ve karbondioksitin birlikte kullanılarak, etanol ya da metanol gibi sıvı bir yakıtta dönüştürülmesidir. Hidrojeni, üretildiği tesisten taşımak yerine, aynı tesiste diğer sıvı yakıtlara dönüştürerek, mevcut dağıtım ağında taşınması ve kullanılması sağlanabilir. Böylece hidrojen gazının taşınması ve depolanması ile ilgili zorluklar aşılırken, karbondioksit gazının tüketilmesi ile ilgili endüstriyel bir alternatif yaratarak, sera gazlarının azaltılması ile ilgili önemli bir adım atılabilir.

4.5.4. Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırması

Hidrojenin taşınmasında seçimi etkileyecek ana faktörler uygulamanın türü, miktarı ve üretim yerinden son kullanıcıya olan mesafedir [38].

Büyük miktarlardaki hidrojen için en ucuz taşıma yöntemi boru hatlarıyla taşımadır. Fakat deniz aşırı mesafeler söz konusuysa en ucuz yöntem sıvı hidrojenin tankerlerle taşınmasıdır. Boru hattıyla taşımanın işletme maliyetleri çok düşük olmasına rağmen ilk yatırım maliyeti çok yüksektir. Diğer taraftan sıvı hidrojeninde ise işletme maliyetleri yüksek fakat ilk yatırım maliyetleri hidrojen miktarı ve taşıma yapılacak mesafeye bağlı olarak daha düşüktür. Küçük miktarlardaki hidrojen için boru hattı ile taşıma yatırımlar göz önüne alındığında karlı olmamaktadır. Bu durumda en uygun yöntem sıkıştırılmış gaz halde taşımadır. Sıvı hidrojenle kıyaslandığında sıkıştırılmış gaz hidrojen eldesi için gerekli enerji ve ilk yatırım maliyeti daha düşüktür. Bu ikisi arasındaki tercih taşınacak mesafeye bağlı olarak belirlenmelidir. Uzun mesafeler için sıvılaştırmanın yüksek enerji maliyeti

karşılaşılan en büyük problemdir. Mesafe kısa ve miktar çok küçük ise sıkıştırılmış gaz hidrojen en uygun seçimdir. Metal hidrit taşıma maliyeti gaz ve sıvı hidrojenin arasında kalmaktadır. İlk yatırım maliyeti çok yüksek olmasına karşın metal hidrit sıkıştırılmış gaz hidrojene kıyasla çok daha fazla miktarlarda hidrojen taşıma kapasitesine sahip olduğundan tercih edilebilir [38].

Mesafe taşıma maliyetleri açısından en önemli faktördür. Kısa mesafeler için boru hatları çok ekonomik olmaktadır. Boru hattının ilk yatırım maliyeti tanker ya da tırlara yüklenecek depoların maliyetine yakın olmakta ve bunun dışında taşıma ve sıvılaştırma gibi maliyetleri de bulunmamaktadır. Mesafe arttıkça boru hattının ilk yatırım maliyeti hızlı bir şekilde artmakta ve ekonomiklik taşınacak miktara bağlı kalmaktadır [38]. Mesafe sıvı ve sıkıştırılmış gaz hidrojen arasında bir karar parametresidir. Uzun mesafelerde aynı miktardaki gaz hidrojeni taşımak için gereken taşıyıcı araç miktarı sıvı hidrojene göre çok daha fazla olacaktır [40]. Yani uzun mesafedeki gaz hidrojeni taşıma maliyeti, sıvılaştırma maliyetleri eklenmiş sıvı hidrojeni taşıma maliyetinden daha maliyetli bir hal alabilmektedir

Taşımada bir diğer kıstas enerjinin uzun mesafelere iletimidir. Hidrojeni üretip boru hatlarıyla ısı ya da elektrik enerjisi ihtiyacı olan yere taşımak düşük enerji kayıplarından dolayı ucuz olmaktadır [39].

Hidrojen taşıma yöntemlerini tüm bu koşullara göre ele aldığımızda; uzun mesafelere taşımada sıvı hidrojen, büyük miktarlar ve uzun mesafelerde boru hattı, , küçük miktarlar ve kısa mesafelerde sıkıştırılmış gaz, büyük miktarlar ve kısa mesafelerde taşımada metal hidritler kullanılması en uygun yöntemlerdir.

4.5.5. Hidrojenin Taşınması ile İlgili Öneriler

Hidrojen güvenli, temiz ve kullanımı dünyadaki canlı yaşamına eş süreye sahip bir yakıt olup, üretiminde (yenilenebilir enerji kaynakları kullanıldığında ve bazı diğer yöntemlerle) taşınmasında ve depolanmasında çevreye hiç bir zarar vermemektedir. Bugün için dezavantaj sayılabilecek tek nokta, henüz yaygın ticari kullanımı bulunmadığı için üretim, taşıma ve depolama maliyetlerinin yüksek

oluşu ve bunları sağlayacak teknolojiye geçişin yüksek yatırımlar ve zaman gerektirmesidir.

Gelecekte yakıt hücrelerinde elektrik enerjisi, hidrojeninden elde edilecektir. Depolama sistemlerindeki gelişmeler ise hidrojenin gelecekte; elektrik eldesinin merkezi bir santrale bağlı kalmadan mobil sistemlerde elde edilmesini sağlayacak, enerjiye istenilen her anda ulaşabilme olanağı sunacaktır. Hidrojen depo kartuşları ve yakıt hücreleri, portatif olarak elektriği her yerde üretebilme ve taşıyabilme olanağı yaratacaktır [20].

Günümüzde hidrojen depolama ve taşıma ortamı olarak büyük bir önem kazanmış olan sodyumborhidrür, özel bor kimyasalları içinde de önemli bir potansiyele sahiptir. Sodyumborhidrürün benzer amaçlı diğer bileşiklere oranla daha fazla hidrojen depolayabilmesi, yanıcı ve patlayıcı olmaması, kolay kontrol edilebilir bir reaksiyon ile hidrojenini verebilmesi gibi özellikleri, yeni ve temiz enerji politikaları ile birlikte değerlendirildiğinde ülkemizin zengin bor kaynakları için yaygın ve kalıcı bir tüketim alanı yaratabilecektir. Teknolojisini yenilemek ve sanayisel üretim sürecini hızlandırmak zorunda olan Türkiye, ilk on yılda hidrojen enerjisine geçiş için bütün yasal ve hukuki zeminleri hazırlamalı ve bu ikincil enerji kaynağını temin edeceği birincil sistemleri kurmalıdır. Daha sonraki aşamada ise bu yakıtın daha verimli depolanabilmesi ve taşınabilmesi için alternatif olarak önerilen hidrür üretim sistemlerini geliştirmeli ve borlu yakıt çözeltilerini piyasaya sunacak teknolojiyi hazırlamalıdır. Bu teknolojiler ise elektrik enerjisine dönüşüm için gerekli yakıt hücre sistemleri ile entegre olmalı ve dışa bağımlılıktan kurtulmak için, pahalı bir yöntem olan teknoloji transferi yerine teknoloji üreten bir ülke olmalıdır [20].

4.6. Hidrojen Kullanımında Güvenlik

Hidrojen zehirli bir gaz değildir. Kullanımındaki tehlike oksijen ve havayla karıştığında ileri derecede tutuşabilir olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, renksiz ve kokusuz oluşu ve çok soluk bir alevle yanması dolayısıyla varlığı kolayca fark edilemez.

Hidrojen-hava karışımlarının patlama ve tutuşma sınırları benzinin ve metanın hava karışımlarına nazaran daha geniştir. Hidrojenin moleküler ağırlığı, yoğunluğu (havanın 1/14 misli, metanın 2/3 misli) ve viskozitesi çok düşüktür. En küçük molekül olması nedeniyle depo ve boru malzemeleri içine rahatlıkla sızarak metalleri kırılganlaştırır; kolaylıkla kaçak yapabilir. Bu özelliği dolayısıyla, hidrojen kaçağı tuttuğu takdirde yukarıya doğru yükselen dar bir alev oluşturur, dolayısıyla çevreye verebileceği zarar diğer gaz ve sıvı yakıtlara kıyasla çok daha azdır.

Büyük ölçekte hidrojenin kullanıldığı açık hava amonyak tesislerinde yangın olayları seyrek olup genellikle talimatlara yeterince uyulmamasından kaynaklanmaktadır. Petrokimya endüstrisinde yangınların yarıdan fazlası belli ekipman elemanlarından (contalar, boru flanşları, vana aksamı, eşanjörler, atık ısı kazanları gibi) gaz sızması sonucu çıkmaktadır. Sıvı hidrojen uzun süredir roket yakıtı olarak kullanıldığından güvenlikle ilgili deneyim ve bilgi birikimi oluşmuştur.

Sıvı hidrojenin depolama sıcaklığı çok düşüktür. İyi yalıtılmamış kaplarda sıvı hidrojenle temas eden hava sıvılaşır ve hidrojene karışarak yangın tehlikesi oluşturur. Sıvı hidrojen döküldüğünde çevresindeki hava atmosferle denge halinde sıvılaşır, yaklaşık %50 oranında hidrojen-oksijen karışımı oluşur ve bir yangına veya patlamaya neden olabilir. Viskozitesi çok düşük olduğundan hidrojen defolu tanklardan yüksek hızla sızabilir. Bu yüzden sıvı hidrojen, çift cidarı arasındaki hava boşaltılıp yerine perlit doldurularak yalıtılmış sağlam kaplarda depolanır. Uzun süre depolanan hidrojen buharlaşma kayıpları sonucu eksilir. Hacmi 10^3 m^3 mertebesindeki hareketsiz depolardan günde %0,03-0,05, hacmi $10-10^2 \text{ m}^3$ düzeyindeki demiryolu ve karayolu tanklarından günde %0,3-0,5 hacmi 1 m^3

dolayında olan hareket halindeki depolardan günde %1-2 buharlaşma kaybı olduğu saptanmıştır. Teknolojideki gelişmelerle bu sorunların yakında çözümlenmesi beklenmektedir.

4.7. Hidrojenin Kullanım Alanları

Bugün yakıt seçimindeki kriterler olarak; motor yakıtı olma özelliği, dönüşebilirlik, çok yönlü kullanıma uygunluk, kullanım verimi, çevresel uygunluk, emniyet ve maliyet açısından yapılan değerlendirmelerin sonuçları, hidrojeni ön plana çıkarmaktadır. Fosil yakıtların kullanıldığı her yerde hidrojen kullanılabilir. Yakıtın dönüşebilirliği ya da çok yönlü kullanımı, yanma işlemi dışında, diğer enerji dönüşümlerine uygunluğunu gösterir. Hidrojen alevli yanmaya olduğu kadar katalitik yanmaya, doğrudan buhar üretimine, hidridleşme sayesinde kimyasal dönüşüme ve yakıt pilleri ile elektro-kimyasal dönüşüme uygun bir yakıttır. Fosil yakıtlarsa sadece alevli yanma ile enerji verebilir . Alevli yanma hidrojeni içten yanmalı motorlarda, dizel motorlarda, gaz türbinlerinde, jet motorlarında, roket motorlarında, ısıtma ve pişirmede kullanılabilir hale getirmektedir. Her türlü birincil enerji kaynakları yardımıyla üretilen hidrojen, günümüzde suni gübre sanayisi, bitkisel yağ üretimi, petrokimya endüstrisi ve roket yakıtı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Hidrojen, yakıt pillerinde veya taşıtlarda benzin ve mazot yerine ve bunlarla beraber, evlerde kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğalgaz yerine ve doğalgazla beraber kullanılabilir.

Hidrojen üretiminin üçte ikisi amonyak elde edilmesinde kullanılır. Dünya nüfusu arttıkça, artmak zorunda olan tarım, amonyuma duyulan talebi sürekli büyütmektedir. İkinci derecede önemli kullanma alanı petrol rafinasyonundaki katalitik parçalama işlemidir. Bu işlem ağır petrol kaynaklarını, yakıt olarak kullanılabilir hale daha hafif türevlere dönüştürmek için gerçekleştirilir. Üçüncü derece kullanıldığı alan metanol imalatıdır. Bundan başka yağların doyurulmasında kullanılır ve margarin elde edilir. Plastik madde yapımında, kaynak işlerinde yakıt olarak hidrojen, zeplinlerin (balonlar, güdümlü balonlar v.b.) şişirilmesinde kullanılırken,

çabuk alev aldığından, yerini helyum gazına bırakmıştır. Silâh sanayi günümüzde hidrojeni, füze yakıtı olarak kullanmaktadır. Gerçekten de, sıvı halde çok yüksek bir enerjiye sahip olmasına karşılık az yer kaplar. Hidrojen bombasının yapımında da kullanılan hidrojen günümüzde yakıt pilleri formunda cep telefonlarından uçaklara kadar bir çok yerde kullanılmaktadır.

Günümüzde daha çok roket yakıtı olarak kullanılmakta olan hidrojen ve çeşitli motor tasarımları ile uyumlu oluşu dolayısıyla uçaklarda da kullanılmaya başlanmıştır. Kalkış esnasında bir uçak motorunun uçak ağırlığını, yükünü ve gideceği yer için ihtiyaç duyulan yakıtı kaldırması gerekmektedir. Hidrojen birim ağırlıkta jet yakıtına göre 2,5 kat daha fazla enerji içermektedir. Böylelikle jet yakıtlı bir uçağa kıyasla, kalkış ağırlığı %25 eksilmekte ve yük taşıma mesafesi %30-35 artmaktadır. Hidrojen uçaklarda basınçlı gaz ya da karyojenik sıvı olarak kullanılmaktadır.

Kimyasal enerjiyi en verimli şekilde elektrik enerjisine dönüştüren yakıt pillerinin çalışma prensibinin temelleri, Sir William Grove tarafından, 1839'da atılmıştır. 1932'de üzerinde gelişmeler sağlanmış ve 1952 yılında NASA tarafından uzay çalışmalarında enerji kaynağı olarak kullanılan yakıt pilleri, 1960'lı yıllarda ilk yakıt hücreli traktör yapımı ile kara ulaşımında kullanıma sunulmuş 1980'li yıllarda yakıt hücreli tren, 1990'lı yıllarda yakıt hücreli denizaltı ve uçak ile gelişim gösteren yakıt pillerinin son yıllarda kara araçlarında ve güç santrallerinde kullanılması yaygın araştırma ve uygulama konusudur. Yakıt pili sisteme dışarıdan sağlanan yakıt ve elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır. Yakıt pillerinde elektroliz prosesi tersine çevrilerek, hidrojenle oksijen elektro-kimyasal bir prosesle birleştirilir. Bunun sonucu elektrik, su ve ısı açığa çıkar.



Teoride, elektroliz için kullanılan aynı miktardaki enerji bu dönüşüm ile serbest bırakılır. Pratikte ise, farklı kimyasal süreçler nedeniyle kayıplar meydana

gelmektedir. Böylece elektrik gücü hidrojenle depolanabilmektedir. Yakıt pili ile hidrojenle depolanan elektrik gücü geri alınabilmektedir. Birçok yakıt pili hava ile çalışabildiğinden oksijeni depolamaya gerek yoktur. Bir yakıt pili, anot (negatif, hidrojen elektrot), katot (pozitif, oksijen elektrot), yüklü parçacıkları bir elektrottan diğerine taşıyan elektrolit ve reaksiyonları hızlandırmaya yarayan katalizörlerden oluşur. Temel olarak anot kanadından sisteme giren hidrojen burada katalizörler yardımıyla proton (iyonize hidrojen, H⁺) ve elektron (e⁻) olarak ayrışır. Protonlar elektrolit yardımıyla katoda doğru yönlendirilir. Negatif yüklü elektronlarsa dış devrede harekete zorlanır ve teller üzerinden negatif yüklü anottan pozitif yüklü katoda çekilen elektronlar elektrik akımını oluşturur. Oksijen ise sisteme katot kanadından girer ve burada devrini tamamlayan elektronlar ve anottan çıkıp elektrolit üzerinden geçerek gelen iyonize hidrojen atomlarıyla birleşir. Dolayısıyla oluşan son ürün sudur. Saf hidrojen yerine dizel, metanol ve kimyasal hidritler kullanan yakıt hücreleri de vardır, fakat bunlar atık olarak suyun yanı sıra karbondioksit gibi başka atıklar da oluştururlar. Bu işleyişte özellikle elektrolit kilit bir rol oynar. Elektrolit sadece protonların geçişine izin vermeli ve serbest elektron ya da diğer maddelerin geçişine engel olmalıdır. Aksi halde kimyasal işleyiş bozulabilir. Yakıt pilleri elektrolit tipine ve zara göre sınıflandırılmaktadır. Kullanılan elektrolite göre pilde meydana gelen reaksiyonlar, kullanılan elektrotlar, yakıt pilinin çalışma sıcaklığı ve kullanılan yakıt değişmektedir. Günümüz için üzerine yoğunlaşmış yakıt pilleri olarak Proton değişim membranlı (PEM) veya katı polimer elektrolitli yakıt pili (SPEFC), Alkalın yakıt pili (AFC), Fosforik asit yakıt pili (PAFC), Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC), Katı oksit yakıt pili (SOFC), Direkt metanol yakıt pili (DMFC) örnek gösterilebilir. Bunlardan en çok kullanılanı PEM tibi yakıt pildir. Hidrojen–Oksijen (proton değişim membranlı yakıt hücresi, PEM) tasarımını ele alacak olursak, proton ileten bir polimer membran (elektrolit), anot ve katotu birbirinden ayırır. Anot tarafında, hidrojen, proton ve elektronlara ayrışır. Protonlar membran üzerinden katoda doğru ilerlerken, elektronlar da, membranın elektriksel olarak yalıtkan olması nedeniyle harici bir devre üzerinden akar ve elektrik akımı

oluştururlar. Oksijen molekülleri katot üzerinde elektron ve protonlarla reaksiyona girerek su oluşturur.

Yakıt pilleri DC üretir ama eğer gerekliyse bir dönüştürücü yardımıyla bu akım kolaylıkla alternatif akıma (AC) dönüştürülebilir. Bu şekilde tasarlanmış tek bir yakıt pili yaklaşık 0,7 - 0,8 V üretir. Pratik uygulamalarda yeterli voltajı üretebilmek için yakıt hücreleri seri ve paralel bağlanarak bağlanabilirler. Seri devreler daha yüksek voltaj, paralel devreler daha yüksek akım elde edilmesine olanak verir. Yakıt hücresinin verimliliği devreden geçen akıma bağlıdır. Genel olarak bakıldığında akım arttıkça verimlilik düşer. Elektriğe dönüştürülemeyen enerji ısı olarak kaybedilir. Verimliliği hesaplarken üretimde, taşımada ve depolamadaki kayıplar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Her ne kadar çalışma prensipleri ilk bakışta benzer olsa da yakıt hücreleri normal pillere göre daha ileri teknoloji içeren güç kaynaklarıdır. Normal pillerin depoladıkları enerji kısıtlıdır ve kimyasal reaksiyon tamamlandıktan sonra piller ya atılır ya da yeniden şarj edilmeleri gerekir. Yakıt hücreleri ise dışarıdan yakıt ve oksijen sağlandığı sürece çalışmaya devam eder. Ayrıca pillere göre daha uzun ömürlüdür. Fazla hareketli parça içermemeleri (hareketli parçalar sürtünme, dolayısıyla hem aşınmaya hem de verim kaybına yol açmaktadır) ve ayrıca içlerinde yanma olayının gerçekleşmemesi ömürlerini ve verimliliklerini artırmaktadır. Sistem sıcaklık değişimlerine dayalı olarak işlemediğinden verim, termodinamik yasalarla sınırlı değildir. Hareketli parçanın yokluğu gürültü kirliliğini ortadan kaldırır, bakım masraflarını düşürür. Yakıt pillerinin en önemli faydasıysa saf hidrojen kaynağı kullanıldığı takdirde enerji üretirken hiçbir zehirli atığı ortaya çıkarmamalarıdır. Hava ve çevre kirliliğinin tehlikeli boyutlarda olması ve üretilen karbon dioksit gazının kontrol altına alınmasının gerekliliği, bu tarz güç kaynaklarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yakıt hücrelerinin kullanımı hava kirliliğinde ve petrol tüketiminde önemli azalma meydana getirecektir.

Hidrojen duyulan ilginin büyük bir kısmı, yakıt hücrelerinin otomobillerde kullanılması fikrinden kaynaklanmaktadır. Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlara

göre daha sessiz çalışırlar, çok daha yüksek verimliliğe ve teorik olarak sıfır emisyonu (hidrojen üretimi sırasında kullanılan yöntemler emisyonu neden olabilirler) sahiptirler.

Yakıt pilleri ile yüksek verimde elektrik üretilebildiği için bu pillerin kullanım alanları çok geniştir. Bunlar; ana yük güç tesisleri, elektrikli ve hibrid araçlar, şebeke dışı güç kaynakları, laptoplar, bilgisayarlar ve ev eşyaları, uçak, otomobil, otobüs, motosiklet, bisiklet gibi ulaşım araçlarının yanında forklift gibi iş makineleri ve denizaltılardır. Ulaşım, endüstride ve evlerde hidrojen kullanımı aslında sanıldığı kadar yeni değildir. Dünyanın pek çok yerinde hala evlerde kullanılmakta olan havagazı aslında hidrojen, karbonmonoksit, metan ve uçucu hidrokarbonlar gibi kalorili gazlardan ve az miktarda da karbondioksit ve azot gibi kalorisiz gazlardan oluşan bir karışımdır.

Uygun şekilde depolandığı takdirde hidrojen , ister sıvı , ister gaz halde bulunsun yakıt olarak kullanılabilir. Otomobil üreticileri hidrojenle çalışan otomobiller geliştirmişlerdir. Hidrojen benzinden daha verimli yanar ve daha az kirliliğe yol açar. Benzin/hava karışımına optimum oranda hidrojen eklenmesiyle azot oksit salınımı azaltılabilir. Tamamıyla hidrojen yakan bir motor sadece su ve az miktarda azot oksit üretecektir. Hidrojen daha yüksek ateşleme hızına , daha geniş ateşleme sınırlarına, daha yüksek patlama sıcaklığına sahiptir ve daha yüksek sıcaklıkta yanarken benzinden daha düşük ateşleme enerjisine ihtiyaç duyar. Bu hidrojenin daha hızlı yandığı ama erken ateşleme tehlikesi taşıdığını gösterir. Hidrojenin taşıtlarda yakıt olarak kullanılması için önemli avantajları olsa da benzinin yerini alabilmesi için daha pek çok araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrojen, sürekli üretim yapamayan (güneş, rüzgar) ya da enerji tüketim merkezlerinin çok uzağında inşa edilen (hidroelektrik, jeotermal) enerji üretim tesislerinde üretilen enerjinin tamamının ya da o an için kullanılmayan kısmının depolanması için kullanılabilir, yakıt pilinde yakılarak enerji ihtiyacı karşılanabilir.

4.7.1. Hidrojenin Motorlarda Kullanımı

Günümüzde yakıt seçiminde ölçüt olarak alınan ulaşım araçlarına uygun yakıt olma özelliği, çok yönlü kullanıma uygunluk, kullanım verimi, çevresel uygunluk, emniyet ve maliyet açısından yapılan değerlendirmeler hidrojen bir adım öne çıkartmıştır. Egzoz emisyon değerlerinin düşük olması, petrole olan bağımlılığı azaltması hidrojenin avantajlarından sadece birkaçıdır.

Hidrojeni otomobil yakıtı olarak kullanmanın iki yolu bulunmaktadır. Birincisi, içten yanmalı bir motorda havayla karıştırarak yakmaktır. Bu yöntem, benzin-hava karışımından biraz daha yüksek (%23) verim sağlar. Fakat verim hâlâ, Carnot verimiyle sınırlıdır. İkinci yöntemde ise, hidrojeni bir yakıt hücresinde havadan alınan oksijenle elektrokimyasal olarak yakılmaktadır. Hidrojen Carnot çevriminin sınırlayıcı etkisi altında kalmadan, yakıt pillerinde elektrokimyasal çevrimle direkt elektrik üretiminde de kullanılabilir. Bu durumda verim %50-60'lara, yani termal çevrim veriminin iki katından fazlasına çıkabilir. Günümüz benzinli otomobilleri, yaklaşık olarak 400 km'de 24 kg benzin yakar. Aynı yol için, içten yanmalı hidrojen motorunda 8, yakıt hücreli otomobilde 4 kg hidrojene ihtiyaç duyulur. Hidrojenin 4 kg'ı, oda koşullarında 45 m³ hacim kaplar. Çelikten yapılma yüksek basınç depoları, 300 atmosfer basınca dayanır ve normal olarak 200 atmosfere kadar doldurulur. Bu basınçta 4 kg hidrojen 225 litre hacim tutar: Bu hacim hâlâ büyüktür, üstelik deposu da oldukça ağırdır. Karbon elyafıyla desteklenmiş kompozit malzemeler 600 atmosfere kadar denenmiş, düzenli kullanım için 450 atmosfere kadar doldurulmuşlardır. Fakat hidrojen karbonla tepkimeye girer ve bu tankların içini, çelik ya da alüminyum gibi bir metalle kaplamak gerekir. Bu durumda ve 450 atmosfer basınçta, 4 kg hidrojen 600 mm çapında bir küreye sığdırılabilir. Ancak tank fazla ağır olacak ve dolu olduğu durumdaki ağırlığının %4'ü oranında hidrojen taşıyacaktır. Üstelik, hidrojenin kabın içindeki 450 atmosferden dışarıdaki 1 atmosfere geçme zorunluluğu vardır ve bunca büyük bir fark, ara basınç kontrol sistemleri gerektirir. Dolayısıyla sistem daha da ağırlaşacaktır. Halbuki bir

otomobilde yakıt verimini artırmanın en etkin yöntemi, araç ağırlığını düşük tutmaktır. Ayrıca bu denli yüksek basınçlı tankların, başta doldurma ve taşıma sırasında olmak üzere ciddi patlama riskleri bulunduğundan, bazı ülkelerde karayollarına çıkmaları yasaktır [42].

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakılması ve oksijenin hızlı verilmesi durumunda, atık ürün olarak su buharına ek olarak, nitrik oksitler gibi karsinojen sera gazları da açığa çıkmaktadır. Eğer yalnızca su buharı çıkması isteniyorsa, yanma odasına oksijeni yavaş vermek, yani havayı dikkatli pompalamak gerekmektedir. Ama bu durumda da güç azalacaktır. Dolayısıyla, %50-60'lara varan yüksek verim avantajından yararlanabilmek için, hidrojeni yakıt hücrelerinde yakmak en mantıklısıdır. Şu an ilgili teknolojinin ekonomik hale gelmesini beklenirken, içten yanmalı motorlar ufak bir bedel karşılığında hidrojen yakar hale getirilip, bu yakıtın kullanımını başlatmak mümkündür. [42].

İçten yanmalı motorlarla çalıştırılan taşıtların büyük bir kısmı benzin, mazot ve lpg gibi sıvı yakıtları kullanmaktadır. Bunların yanında çok küçük bir oranda olsa da propan, doğalgaz gibi yakıtlarla da çalışan taşıtlar vardır. Bütan, propan ve doğalgaz için kullanılan mühendislik yaklaşımları hidrojen için de uygulanabilir. Ancak bugünün araç üstündeki donanımları, yakıt-hava karışım oranlarındaki farklılık sebebi ile çeşitli modifiyeler olmaksızın doğrudan hidrojen sistemine geçirilemez. İçten yanmalı motorlarda hidrojeni kullanmanın bir diğer yöntemi de motorların çift yakıtlı olarak çalıştırılmasıdır. Çeşitli modifikasyonlarla benzin ve dizel motorlar çift yakıtlı olarak, yani yakıt hidrojenle zenginleştirilerek çalıştırılabilir. Bu, çevre kirliliğinin azaltılmasına, petrol kaynaklarının daha ekonomik kullanılmasına yol açacak, fosil kökenli yakıtlardan hidrojen enerjisine bir geçiş dönemi oluşturacaktır.

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olmasına rağmen, hidrojen-hava karışımlarının tutuşturulabilmesi için gerekli enerji miktarı düşüktür. Tutuşma aralığının geniş olması, hidrojenin daha geniş karışım aralığında düzgün yanmasını sağlar ve yanma sonucunda daha az kirletici oluşur. Benzin motorları ise

stokiyometrik orana daha yakın oranlarda ya da zengin karışım oranlarında çalıştırılmak zorunda olduklarından egzoz gazlarında önemli miktarda azotoksit, karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonlar oluşur. Azotoksit yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle havanın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Aslında hidrojenin yanma ürünü su buharıdır. Hidrojen motorları, maksimum yanma sıcaklığını azaltacak biçimde fakir karışım ile çalıştırılabilirler. Böylece daha az NO_x oluşurken, HC ve CO emisyonları oluşmaz, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile oluşan HC'ler egzoz gazları arasında bulunabilir. Alev hızının yüksek olması ise Otto motorlarında ideale yakın bir yanmanın oluşmasını sağlayarak, ısı verimi artırır. Geniş tutuşma aralığı sayesinde, gaz keleşine gerek kalmadığından, karışımın silindirlere kısılmadan gönderilmesi sonucu pompalama kayıpları azaltılmış olur. Hidrojenin yüksek sıkıştırma oranlarında, fakir karışım ile yanabilmesi yakıt tüketimini azalttığı gibi, yanma sonucu oluşan maksimum sıcaklığı da azaltır. Yanma sonucu partikül madde oluşmadığından bujiler kirlenmez. Alev parlaklığının düşük olması, diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından daha yüksek verim sağlar. Hidrojenin alev hızının yüksek olması, buji kıvılcımından sonra karışımın başka noktalardan tutuşma (detenasyon) ihtimalini azaltır. Bu durum sıkıştırma oranının artırılmasını sağlayacağından motorun gücü de artar .

Fakat tüm bu avantajlara rağmen; benzinli ve dizel motora göre daha verimli olan yakıt hücreleri varken, hidrojenden alevli yanma ile enerji elde etmek pek ekonomik olmamaktadır. Dolayısı ile bugün için motorlara göre çok pahalı olan yakıt hücrelerinin geliştirilmesi, daha mantıklı bir yol olarak görünmektedir.

Hidrojen içten yanmalı motorlarda direk ya da mevcut yakıtın zenginleştirilmesinde kullanılmasının dezavantajları, onun benzin motoru ile rekabet etme şansını azaltmaktadır. Fakat gerçekleştirilen çalışmalar ile bu problemler çözümlenerek, hidrojenin motor verimine ve hava kirliliğinin azaltılmasına olan katkıları görülmüştür. Hidrojenin sıkıştırma oranı yüksek olan motorlarda kullanılması ile sebep olduğu güç kaybı azaltılabilir. Ayrıca aşırı doldurma uygulanarak ilave güç

sağlanabilir. Sıkıştırma oranının arttırılması ve fakir karışım ile hidrojen motorunun ısıl veriminde, benzinli motora göre artış sağlanabilir. Fakir karışım ile alev tepmesi önemli miktarda azaltılır.

4.7.2. Hidrojenin Motorlarda Yakılması ile İlgili İşletim Problemleri

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma açısından ortaya çıkan en önemli iki sorun, geri tutuşma ve erken ateşleme olaylarıdır. Yanma odasına gönderilen yakıt hava karışımının silindire girmeden önce tutuşması sonucunda motorun emme manifoldun içinde geriye doğru alevin ilerlemesi geri tutuşma olarak tanımlanmaktadır. Bu olay emme sistemi elemanlarını tahrip etmekte ve emniyet açısından sorun oluşturmaktadır. Yanma odasına gönderilen karışımın bujide kıvılcım çakmadan önce sıcak bölgeler tarafından tutuşturularak yanmayı istenilenden önce başlatması ise erken tutuşma olarak tanımlanmaktadır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması bu iki sorunu ortaya çıkarmaktadır. Geri tutuşmanın sebeplerinden biri benzin ile kıyaslandığında hidrojenin tutuşturulabilmesi için daha düşük iyonlaşma enerjisine ihtiyaç duymasındır [43]. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı motorlarda buji kıvılcımından sonra ateşleme sisteminde kalan artık enerji miktarı daha fazla olur. Egzoz zamanı genişleme periyodundan sonra silindir içi basıncının atmosfer basıncına yakın olduğu durumlarda, sistemdeki artık enerji bujide kıvılcım oluşmasına sebep olur. Kıvılcımın oluştuğu nokta çevrimden çevrime farklılık gösterir. Eğer buji kıvılcımını emme zamanında oluşursa geri tutuşmaya sebep olur. Artık enerji oluşumunu önlemek için ateşleme sistemi modifiye edilmelidir.

Yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeni ile yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir. Bu amaçla yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için; karışımın bir miktar fakirleştirilmesi, egzoz

gazları resirkülasyonu (EGR), yanma odasına su püskürtülmesi, sübap bindirmesi süresinin azaltılması, giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışıma EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları artıracak ve motorun düzenli çalışmasını önleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınçta düşecektir [43].

Benzin motoruna hidrojen takviyesi ile yanmamış hidrokarbon emisyonları azaltılarak ısı verim iyileştirilir. Hidrojen takviyesi yapılan Otto motorlarında küçük bir ön yanma odası mevcuttur. Yanma odası bujinin yerine yerleştirilmiştir. Bu ön yanma odası içinde hidrojen enjektörü ile buji vardır. Esas yakıt ise (benzin, metanol, propan vs.) emme portlarındaki enjektörlerden püskürtülerek silindirlere gönderilir. Hidrojen takviyesi ile esas yanma odası içinde yakılan hidrokarbon esaslı yakıtların çok fakir karışım oranlarında düzgün bir şekilde yakılması sağlanır. Böylece ısı verim artırılarak, azot oksit emisyonları önemli derecede azaltılır [44].

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasında karşılaşılan bir diğer problem ise hidrojenin difüzyonudur. Hidrojen çok küçük molekül yapısına sahip olduğundan motor cidarlarından sızma yapabilir. Bu sızma hem verimde düşüş hemde alev tepmesi gibi sorunları tetikleyebilir. Hidrojenin moleküller çok küçük olduğundan için motor malzemesinde kullanılan alaşımların içine difüze olur. Bu işlem sonucu alaşımlar gevrekleşir ve kırılabilir bir hale gelir. Bu olaya hidrojen gevrekliği denir.

5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışmalardan elde edilen genel sonuçlara göre yakma sisteminde hidrojen; ısı verimi artırmakta, yakıt tüketimini, karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonunu azaltmaktadır. Ancak bununla birlikte karışımın uygun bir şekilde ayarlanmamasının NO_x emisyonunu artırması, hidrojenin üretim ve depolama aşamalarındaki zorluklar, hızlı yayılım sonucu gerçekleşen geri yanma, erken alev alma aşılması gereken zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Saravanan ve Nagarajan (2008), sabit bir dizel motor sisteminde havayı hidrojenle zenginleştirmenin motor performansına ve emisyonlara etkisini incelemişlerdir [45].

Gupta vd. (2009), hidrojen ilavesinin metan-hava karışımının yanmasına etkisini laboratuvar ölçekli, 5,81 kW gücündeki bir yanma hücresinde sınırlı koşullarda bir dizi deneyle irdelemiştir [46].

Schefer vd. (2002), zayıf yanma koşulları altında hidrojen ile zenginleştiren metana hidrojenin etkilerini belirlemek için ön karışımli, girdap-stabilize alevli yanmanın özelliklerini incelemiştir. Alev kararlılığı ve patlama haritaları çeşitli yakıt-hava akış hızlarında elde edilmiş ve değerlendirilmiştir [47].

Benedetto vd. (2008), stokiyometrik şartlarda hidrojenle zenginleştirilmiş metan / hava (yakıt olarak hidrojen molar içeriğin %10'unu oluşturmaktadır.) ve saf metan / hava karışımlarının patlama davranışlarını karşılaştıran deneysel bir çalışma sunmuştur [48].

Fanhua vd. (2007), deneysel çalışmalarında kıvılcım ateşlemeli bir doğal gaz motorunda değişken bileşimli hidrojen/sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) karışımlarının termik verime ve emisyonuna etkisini analiz etmiştir. Hidrojenle zenginleştirmenin yakma yeteneğini arttırdığı yani ateşlenme süresini düşürdüğü, motorun yanma verimliliğini yükselttiği öne sürülmüştür [49].

Fanhua vd. (2010), çeşitli hidrojen oranlarında bir turbo sarjlı, kıvılcım ateşlemeli doğalgaz motorunun gaz keleşbeği tamamen açıkken, performans ve emisyon karakteristiklerine yakıt karışım oranlarının etkisini araştırmıştır [50].

Fanhua vd. (2010), bir turbo doğalgaz motorunun performans ve emisyon karakteristiklerini hacimsel olarak % 55 oranında hidrojen ilave şartlarında araştırmıştır. Deneysel veriler, farklı kıvılcım zamanlaması, hava fazlalık oranı ve manifold basıncı dahil olmak üzere çeşitli koşulların varyasyonları şeklinde elde edilmiştir. Yüksek oranlarda hidrojen ilavesinin hissedilir bir şekilde yanma limitlerini ve motorun yanma kabiliyetini yükselttiği; yanma zamanını düşürürken termal verimliliği arttırdığı görölmüştür. Yüksek hidrojen oranlarında CO, CH₄ emisyonu azaldığı ve ateşleme zamanını optimize edildiğinde NO_x emisyonlarının da kabul edilebilir seviyelerde olduğunu belirtilmiştir [51].

Ji ve Wang (2009), yaptığı çalışmada hidrojen ilavesinin benzinli motor performansını arttırdığını öne sürmüştür [52].

Miao vd. (2009), doğalgaz içine hidrojen eklendiğinde artan NO_x emisyonuna karşın yalın yanma kapasitesinin genişletilmesini, düşük yükte motor performansının artırılmasını, ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının azaltılmasını araştırmıştır. Araştırmalar sonucunda yanma ve alev hızının, zenginleştirilen yakıt oranı arttıkaça azaldığı (hidrojen oranının %80 olduğu durum hariç), hidrojen oranı arttıkaça arttığı bulgusuna ulaşılmıştır [53].

Usta (2010), hidrojen ve hidrojen-metan (Hythane) karışımının içten yanmalı motorlarda kullanılmasını araştırmış, maksimum motor gücünü, molce % 100 hidrojen oranında 7,24 kW ve molce %20 hidrojen - %80 metan karışımında ise 7,87 kW olarak öne sürmüştür. Yalın olarak kullanılan hidrojenden elde edilen maksimum gücün, hidrojen-metan karışımından %8 daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bütün yükleme değerlerinde %20 hidrojen - %80 metan karışımının saf hidrojenden daha fazla güç ürettiği öne sürölmüştür. Bunun sebebi olarak metanın yüksek ısı verimi ve hidrojen metanın iyi karışım oluşturması gösterilmiştir. Maksimum moment molce % 100 hidrojen oranında 36,38 Nm, molce %20 hidrojen - %80 metan karışımında ise

39.56 Nm olarak ölçülmüştür. Hidrojenden elde edilen maksimum momentin de, hidrojen-metan karışımından elde edilen momentten %8 daha düşük olduğu belirtilmiştir. Atölye tipi emisyon test ünitesinde, hidrojen için CO, CO₂ ve HC değerleri sıfır olarak ölçülmüştür. %100 hidrojen ve %20 hidrojen - %80 metan karışımı için NO_x değerlerinin de günümüz benzinli motorlarından oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Hidrojen-metan karışım yakıtı için emisyon değerlerinin sadece hidrojen yakıtına göre nispeten daha yüksek ancak yine günümüz benzinli motorlarından daha düşük olduğu öne sürülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sadece hidrojen yakıtlı motorların performansındaki düşüşün, talep edilen güce oranla daha büyük güçte; dolayısıyla daha büyük silindir hacminde motor seçerek ve silindir içine direkt püskürtme yöntemiyle yüksek basınçta hidrojen göndererek önlenebileceği belirtilmiştir. [54].

Yılmaz (2006), çalışmasında model bir yakıcıda yakılan hidrojen-metan karışımını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Yakıttaki hidrojen içeriğine bağlı olarak sıcaklığın arttığı, deneylerde elde edilen sıcaklık değerlerinin aynı işletme şartları için sayısal simülasyonda elde edilen sıcaklık değerlerine göre daha düşük seviyelerde olduğu belirtilmiştir. Farklı miktarlarda hidrojen karışımlar için alev bölgesinde farklılıklar belirlenmiştir. Hidrojence zengin yakıtta alev bölgesi daha kısa ve daha geniş olarak elde edilmiş ve bu durum hem deneysel hem de sayısal çalışmanın ortak sonucu olarak sunulmuştur. Kompozit yakıt karışımındaki hidrojen içeriğinin artması ile CO emisyonunun azaldığı ve yüksek alev sıcaklığına bağlı olarak NO_x emisyonunun arttığı belirlenmiştir. Deneylerde ölçüm yerlerinden alev bölgesinin gözlemlenmesi ile daha yüksek hidrojen içeren kompozit yakıtta hızlı ve çabuk yanmaya bağlı olarak alev boyunun kısmen daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Saf hidrojen yanmasında CO emisyonu oluşmadığı, hidrojen-metan karışımlı kompozit yakıtın daha düşük karbon içermesinden dolayı saf metan yanmasına göre daha az CO açığa çıkardığı tespit edilmiştir [55].

Murçak vd. (2006), çalışmalarında dizel motorda hidrojenin ek yakıt olarak kullanımının motor performansına etkisini araştırmış ve tek silindirli, dört zamanlı,

hava soğutmalı bir dizel motor üzerinde motorin ve motorin-hidrojen karışımlarını yakıt olarak kullanmışlardır. Deneyler motorun tam gaz konumunda, farklı devirler için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar her iki yakıt için de değerlendirildiğinde hidrojen ilaveli mazotun düşük devirlerde motor moment ve gücünde artışa yol açtığı yüksek devirlerde ise verimde, motor moment ve gücünde olumsuz sonuçlar oluşturduğu belirtilmiştir. Yapılacak çeşitli modifikasyonlarla yüksek devirlerde karşılaşılan vuru ve verim düşmesinin önüne geçilebileceği öne sürülmüştür [56].

Masood vd. (2007), çalışmalarında farklı oranlarda dizel - hidrojen karışımlarının emisyonlara ve performansa etkisini incelemişlerdir. Hidrojen-dizel oranı %20–80 aralığında değişirken, hidrojen motora iki farklı metotla gönderilmiş ve bu metotlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Birinci metotta hidrojen manifold girişinden verilirken ikinci metotta ise hidrojen bir enjektör vasıtasıyla yüksek basınçta yanma odasına ulaştırılmaktadır. Hidrojeni yanma odasına manifold yoluyla ulaştırmanın termal verimde %19'luk bir kazanç sağladığı ortaya konmuştur. Her iki yöntemde de hidrojen yüzdesinin artmasının yanma hızının artırdığı ve hidrojenin yanma odasına enjektör vasıtası ile ulaşmasının NO_x oluşumunu artırdığı belirtilmiştir [57].

Kumar vd. (2007), tarafından yapılan çalışmada dizel motora hidrojen havayla karıştırılarak verilmiş, yanma aşamaları ve emisyonları değerlendirilmiştir. Deneylerde %30 hidrojen oranında, tutuşma için gereken sürenin azaldığı ve aynı değerlerde basıncın yükseldiği gözlenmiştir [58].

Saravanan vd. (2008), yaptıkları çalışmada dizel bir motorda hidrojen zenginleştirilmiş hava kullanımının performans ve emisyon etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Dizel motorda belli oranlarda hidrojen zenginleştirilmiş hava kullanımının daha az emisyonla sebep olduğu ve daha iyi bir performans sağladığı belirtilmiştir [59].

Mathur vd. (1991), tarafından yapılan bir çalışmada ise geri tutuşma, erken ateşleme, vuru ve yanma esnasında hızlı basınç artışı gibi önceki çalışmalarda da tanımlanmış problemlere çözüm bulmak amacıyla yakıt besleme teknikleri denemiş ve hidrojenin manifolda zamanlı enjeksiyonla verilmesinin bu problemlerin çözümü

için en uygun yakıt besleme yöntemi olduğu ileri sürmüştür. Tasarlanan enjeksiyon sistemi kullanılarak hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorun performans karakteristikleri değerlendirilmiş ve motorun ısı verimi, özgül yakıt tüketimi ve ortalama efektif basıncı gibi performans parametreleri deneysel olarak tespit edilmiştir [60].

Çeper (2009), çalışmasında hidrojen-doğalgaz karışımının içten yanmalı motorlarda yakılmasını incelemiş, sayısal simülasyonda en yüksek sıcaklık değerine hidrojen zengin (%30 H₂ - %70 CH₄) yakıtta ulaşılmıştır. En düşük sıcaklık değeri ise saf metan yanmasında (%100 CH₄) tespit edilmiştir. Yakıttaki hidrojen içeriğine bağlı olarak sıcaklık değerinin arttığı belirlenmiştir. Deneysel çalışmada yapılan gözlemlerde, yüksek miktarda hidrojen içeren yakıtta yanma işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise hidrojenin alev hızının yüksek olması ve yanmayı hızlandırması gösterilmiştir. Doğalgaz hidrojen yakıt karışımındaki hidrojen ilavesinin artması ile CO₂ emisyonunun arttığı ve HC emisyonunun azaldığı belirlenmiştir [61].

Kaplan (2008), hidrojen metan karışımı için emisyon davranışlarını incelemiş, deneysel çalışmada en yüksek sıcaklık değerine hidrojen zengin %30 metan ve %70 hidrojen içeren karışım yakıtla ulaşılmıştır. Yakıttaki hidrojen içeriğine bağlı olarak sıcaklık değerinin değiştiği belirlenmiştir. Deneyler süresince ölçüm bölgelerinden yapılan gözlemlerde farklı miktarlarda hidrojen içeren karışım yakıtlarda alev bölgesinde farklılıkların olduğu, hidrojen zengin yakıtta alev bölgesinin daha kısa ve daha geniş olduğu, yanma işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kompozit yakıt karışımındaki hidrojen içeriğinin artması ile CO emisyonunun azaldığı ve yüksek alev sıcaklığına bağlı olarak NO_x emisyonunun arttığı tespit edilmiştir. Mevcut doğalgaz brülörlerinde hacimsel olarak %30 seviyelerinde hidrojen içeren karışım gaz yakıt kullanımının brülörde herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan kullanımının mümkün olduğu tespit edilmiştir [62].

Gül (2006), yaptığı deneysel çalışmada, içten yanmalı motorların yapılacak bazı modifikasyonlarla hidrojenle çalıştırılabileceğini öne sürmüştür. Fakat hidrojenin

yaygın olarak kullanılabilmesi için, öncelikle hidrojen üretim maliyetleri düşürülmesi gerektiğine, araç üzerinde depolama ve güvenlik önlemleri gibi konularda çalışmaların günümüz için yetersiz olduğuna dikkat çekmiştir [63].

Gökçek (2008), çalışmasında metan ve metan-hidrojen karışımı yakıtların kullanıldığı gaz türbinlerinde yanmanın ve NO oluşumunun modellenmesini gerçekleştirmiştir. Sayısal simülasyonda maksimum NO emisyonu, %30 H₂ içeren karışım yakıtının kullanıldığı, 973 K türbin giriş sıcaklığı şartlarında belirlenmiştir. Gaz türbininde kullanılan yakıt ve yakıt karışımları için, tüm türbin giriş sıcaklığı şartlarında yapılan simülasyonda, NO oluşumunun sıcaklığa bağlı olduğu ve türbin giriş sıcaklığının artışıyla, NO emisyonunun arttığı belirlenmiştir. Saf metana eklenen hidrojen miktarındaki artışla, belirlenen NO emisyonu seviyelerinde dikkate değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir [64].

Özen (2006), yoğunlaşmalı kombilerde hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz kullanımının enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda alt ısı değerine göre verim %143 bulunmuştur. Bu verim, normal bir kombiye göre sisteme saatte 0,408 TL kazandırdığı belirlenmiştir. Sistemin genel verimi ise %97,6 olarak elde edilmiştir. Suyun elektrolizi için harcanan elektrik işi, bu işlem sonucunda elde edilen hidrojenin alt ısı değerinden daha yüksek bir değere sahiptir. Harcanan elektrik isinin maliyeti göz önüne alındığı zaman, sistem normal bir kombiye göre saatte 0,876 TL zarar ettiği, sistemin kendi kendini amorti etmesinin imkansız olduğu belirlenmiştir. Hidrojen takviyeli doğalgazın yoğunlaşmalı kombilerde yakıt olarak kullanılmasının yoğunlaşma suyunun elektrolizi için harcanan elektrik maliyetinin yüksek olması nedeniyle verimli olmadığını, sistemin verimli bir şekilde kullanılmasının elektroliz için harcanan elektrik maliyetini azaltacak teknolojilere bağlı olduğunu, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilecek elektriğin, yoğunlaşma suyunun elektrolizinde kullanılmasının hidrojen üretim maliyetini düşüreceğini öne sürmüştür. Ayrıca hidrojen takviyeli doğalgazın yakıt pilinde yakılması, yanma işlemindeki tersinmezlikleri azaltacağından sistem verimini artıracığı belirtilmiştir [65].

Saravanan vd. (2007), gerçekleştirdikleri bir çalışmada direk püskürtmeli bir dizel motorda hidrojeni tutuşturucu olarak emme manifolduna, dizel yakıtı ise direk olarak silindir içine püskürtmüşlerdir. Elde edilen veriler ışığında, dizel motorlara hidrojen ilavesinin termal verimi artırdığı ve emisyon değerlerini düşürdüğü ortaya konmuştur [66].

Erman (2007), tez çalışmasında dizel motorda hidrojenin ek yakıt olarak kullanımını incelemiştir. Çalışmada dizel motorun ürettiği enerjiden faydalanılarak, elektroliz yöntemiyle hidrojen üretilmesi, üretilen bu hidrojenin yanma odasına gönderilmesiyle motorun güç, tork, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının duman, NO_x , HC ve CO parametrelerinin değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Farklı miktarlardaki hidrojenin motorun performans ve emisyon değerlerine olan etkilerini ve bu sistemin taşıt üzerinde kullanılabilirliğinin uygun olup olmadığını değerlendirmiştir [67].

Tunçer (2009), yaptığı çalışmada hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtının alev hızlarının ve emisyon değerlerinin kimyasal ve kinetik analizini gerçekleştirmiştir. Hidrojen zenginleştirmenin beklenildiği gibi alev hızlarını arttırdığı saptanmıştır. Alev hızlarının kolay hesaplanabilmesi için ampirik bir korelasyon geliştirilmiş, hidrojen oranının ve basıncın alev hızlarına ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. Artan basıncın alev hızlarını düşürdüğü, buna karşılık ise emisyonları arttırdığı belirtilmiştir. Artan hidrojen oranı ile emisyonların ve alev hızının arttığı ifade edilmiştir [68].

Şahin (2009), tez çalışmasında biyodizel ile çalışan bir motora hidrojen ilave edilmesinin motor performansına ve emisyonlara etkisini incelemiştir. Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli biyodizel/hidrojen çift yakıtı ile çalışacak şekilde düzenlenmiş dizel bir motorda sabit devirde hidrojen oranının performans ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda, soya biyodizeline hidrojen eklenmesinin; hidrokarbon, karbonmonoksit, karbondioksit emisyonlarında önemli ölçüde azalmalar meydana getirdiği, fren termik

verimini artırdığı ve özgül yakıt tüketimini düşürdüğü, buna karşın azotoksit emisyonlarında bir miktar artışa sebep olduğu belirlenmiştir [69].

Literatürdeki çalışmaların sonuçlarına göre, hidrojen zenginleştirme uygulamasının yakma sisteminin ısı verimini artırdığı ve yakıt tüketimini azalttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu süreç karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarını azaltabilir. Ancak yanlış karışım oranlarında ve yüksek sıcaklıkla artan NO_x emisyonları, yüksek maliyetli hidrojen üretim ve depolama uygulamaları, geri yanma ve erken ateşleme gibi üstesinden gelinmesi gereken problemler hidrojenli gelecekte aşılması gereken sorunlar olarak karşımıza çıkmaktadır [73;74;49]. Bununla birlikte hidrojen ile metan yanması üzerine çalışmaların sonucu olarak hidrojenin metan yanma hızını artırdığı sonucuna varılmıştır [50; 51].

Seramik sektörü tüketilen enerjinin miktarı göz önüne alındığında, enerji tasarruf potansiyeli yüksek olan bir sektördür. Hidrojenle zenginleştirme bu sektörde hem üretim hem de tüketim teknolojileri dışa bağımlı olan doğalgazın kullanımında tasarruf sağlayacaktır. Ayrıca diğer enerji yoğun sektörlerde hidrojenle zenginleştirilen metanın kullanılması için bir başlangıç olabilir.

Yaptığı çalışmada Apak (2007), doğal gaz kullanan bir seramik fabrikasında farklı prosesler için enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Seramik firmı için enerji verimi 43%, ekserji verimi ise %11 olarak bulmuştur [70].

Utlu vd. (2011), bir endüstriyel kurutma fırın için termodinamik analizi ortaya koymuş, enerji verimini %35 ve ekserji verimini %16 olarak bulmuştur [71].

6. TEZİN AMACI, ÖNEMİ, KAPSAMI

Hızla artan nüfus ve ilerleyen teknolojiye paralel olarak artan enerji talebi karşısında yerkürenin fosil yakıtlarına dayalı enerji kaynaklarının bir bölümünün yaklaşık bir insan ömrüne eşdeğer bir süre içinde tükenecek olması günümüz bilim insanlarını yeni arayışlar içine sokmaktadır.

Yaklaşık 30 yıl sonra fosil yakıt tüketiminin ikiye katlanacağı buna paralel olarak önümüzdeki 50 yıl içinde petrol rezervlerinin, takip eden 40-50 yıl içinde de doğalgaz rezervlerinin tükeneceği, daha bol bulunan kömür rezervlerinin ise en fazla bir kaç yüzyıl daha dayanacağı öngörülmektedir.

Yapılan tüm bilimsel çalışmalar doğal çevreye zarar vermeyecek, teknolojik gelişmelere bağlı olarak tüm uygulama alanlarındaki maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek olan, önceki enerji kaynaklarının doğaya verdiği kalıcı zararları ortadan kaldırmaya yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağı zorunluluğu konusunda birleşmektedir. Bu özellikleri taşıyan enerji kaynaklarından biri de hidrojenidir. Hidrojen evrendeki maddenin %90'dan fazlasını oluşturmaktadır. Suda ve organik maddenin tümünde bulunmakta olup kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif elementtir.

Hidrojenle zenginleştirilmiş yakma sistemleri yanma verimini artırarak harcanan yakıt miktarının azalmasını sağlamaktadır. Hidrojenle zenginleştirme metanın alevlenme hızını ve yayılımını artırmaktadır. Bu artış, karışımdaki hidrojen miktarına bağlıdır. Hidrojenle zenginleştirme, ileride saf hidrojen ekonomisine geçişte bir basamak olarak görülmekte olup; son yıllarda hidrojenin kömür gazı, metan ya da doğalgaz gibi yakıtları zenginleştirilmesi konularında yapılan araştırmalar hızla artmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak tek başına ya da farklı yakıtları zenginleştirerek kullanımına yönelik bu araştırmaların çoğu içten yanmalı motorlarda kullanımına yöneliktir.

Bu çalışmada, doğalgazla çalışan bir seramik fırınının yakıt sistemine elektrolizle elde edilmiş, günümüzde yakıt olarak kullanımı sürekli olarak artan enerji

taşıyıcısı hidrojenin farklı SKM; 25x40 DK ve 40x40 YK üretiminde, farklı oranlarda ve farklı enjeksiyon şartlarında; çoklu noktadan (her yanma hücresine ayrı ayrı) ve tek noktadan (ana doğalgaz hattına doğrudan) ilavesinin verime ve doğalgaz tüketimine etkisinin deneysel sonuçları ile değerlendirilmesi, termodinamik ve ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Seramik sektöründe hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz kullanan fırınların termodinamik ve ekonomik analizi üzerinde herhangi bir çalışma ulaşılabilen literatürde bulunamamıştır. Bu durum bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük motivasyon kaynağı olmuştur.

Çalışmada, Uşak ilinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında bulunan 102 brülör içeren tek katlı bir seramik fırınında hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz yanma deneyleri gerçekleştirilmiş, birinci ve ikinci yasayı kapsayan enerji ve ekserji analizi ortaya konmuş, “NPV” yöntemi izlenerek sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Bu tezin kapsamı, seramik üretiminin pişirme prosesi ile sınırlandırılmış olup, hammadde hazırlama, sır hazırlama, presle şekillendirme, kurutma gibi diğer prosesler kapsam dışı tutulmuştur. Çalışmada hidrojen ilavesinin enerji ve ekserji verimleri üzerine etkileri incelenmiş olup, ana hat ve çoklu nokta enjeksiyon uygulamaları ve 40x40 YK ve 25x40 DK üretimi incelemeleri ile sınırlandırılmıştır.

7. KURAMSAL ANALİZ

Enerji sistemlerindeki verimliliği ortaya çıkarmak ve süreci anlamak için termodinamik analiz gerçekleştirilirken termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını beraber incelemek çok önemlidir. Bu bölümde enerji ve ekserji analizi ile ilgili kuramsal bağıntılar ile ekonomik analize yönelik NPV yöntemi, hidrojenle zenginleştirme sistemini kullanan bir seramik fırınının termodinamik performansını belirlemek için sunulmaktadır.

7.1. Enerji Analizi

Fırın içine giren ve çıkan malzemeler için enerji oranı " \dot{m} " kütleli debi, C_p özgül ısı ve ΔT zaman olarak alındığında şöyle tanımlanır [72];

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (7.1)$$

" R_u " universal gaz sabiti olup değeri $8,314 \text{ kJ/kmolK}$ 'dir. Herhangi bir malzeme için gaz sabiti ise " R_x " (kJ/kgK) olarak ele alındığında;

$$R_x = R_u/M \quad (7.2)$$

Burada M mol ağırlığı olup $M = \text{kg/kmol}$ 'dür.

Seramik malzemeler için entropi ve entalpi farkı; " T_0 " atmosfer sıcaklığı, " T_1 " ısı transferi kaynak sıcaklığı olarak alındığında sırasıyla aşağıda verilen denklemlerle hesaplanabilir.

$$\Delta S = \dot{m} C_p \ln (T_1 - T_0) \quad (7.3)$$

$$\Delta h = \dot{m} C_p (T_1 - T_0) \quad (7.4)$$

7.2 Ekserji Analizi

Günümüzde birçok tersinmez sanayi proseslerinin enerji verimlerinin hesaplanmasında termodinamik analizin kullanımı büyük oranda arttırılmıştır. Bu gelişme; araştırmacıları kullanılabilirlik, ikinci yasa (ekserji) analizi gibi kavramlara yöneltmiştir.

Günümüzde enerjinin miktarı yanında, kalitesinin de önem kazandığı, başka bir deyişle, ekserjinin de enerji kadar önemsendiği proses analizleri ön plana çıkmaktadır. Ekserji; referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem, madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktardaki iş olarak tanımlanır. Enerjiden farklı olarak, ekserji; ideal veya tersinir prosesler dışında korunum yasasına uymaz. Ekserji daha çok, gerçek proseslerdeki tersinmezlikler nedeniyle tüketilir. Bir proses boyunca ekserji tüketimi, prosesle ilişkili tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropi ile orantılıdır.

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin niceliğiyle ilgilidir. Bu kanun, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabı için kullanılır. Termodinamiğin ikinci kanunu ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir. Bir hal değişimi sırasında enerjinin mevcut niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma imkanının değerlendirilememesi bu yasanın kapsamına girer dolayısıyla termodinamiğin ikinci kanunu, sistemlerin optimizasyonu için daha detaylı sonuçlar ortaya koymaktadır.

Kullanılabilirlik, bir sistemin sahip olduğu enerjisiyle iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilmektedir. Bir sistemden mümkün olan en yüksek işi elde edebilmek için, sistemin sabit olan ilk halinden, hal değişimi sonunda, sistemin ölü hale gelmesi gereklidir. Ölü hal, sistemin çevresiyle termodinamik açıdan denge durumunu ifade eder ve sistemden bu halde elde edilebilecek iş sıfırdır. Dolayısıyla, bir sistem, çevre ile tersinir bir hal değişimi sonucu termodinamik dengeye (ölü hale) getirildiğinde elde edilebilecek iş miktarı, o sistem için ekserji değerine karşılık gelmektedir. Bu tanım, sistemin termodinamik yasalara karşı

gelmeden yapabileceği maksimum isi belirler. Dolayısıyla ikinci yasa verimi, sürecin, tersinir hal değişimine ne kadar yakın olduğunu belirleyen bir kriterdir.

Ekserji analizi sayesinde enerji kaynakları kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesi sağlanmış olur. Enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına yönelik gerçekleştirilen ekserji analizleri ile kayıpların nerelerden kaynaklandığı, ne tür kayıplar olduğu ve büyüklükleri ortaya çıkarılır. Bu sayede mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltmanın, daha verimli enerji sistemleri tasarlamının mümkün olup olmadığı ortaya çıkarılmış olur.

Bu bölümde hidrojenle zenginleştirme sisteminin termodinamiğin ikinci yasasına göre analizinin kuramsal temelleri sunulmuştur.

7.2.1. Fiziksel Ekserji Analizi

Seramik fırınına giren maddeler için spesifik fiziksel ekserji " e_{ph} " ile ifade edilmiş olup, aşağıda verilen formüllerle hesaplanabilir [70; 75; 76].

Spesifik fiziksel ekserji;

Farklı sıcaklık ve sabit basınç altında bir katı, sıvı ve gaz için ;

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (7.5)$$

Farklı sıcaklık ve farklı basınç altında gazlar için ;

$$e_{ph} = (h - h_0) - T (s - s_0) + m T_0 R_x \ln(P/P_0) \quad (7.6)$$

Farklı sıcaklık ve basınç altındaki katı ve sıvılar için ;

$$e_{ph} = ((h - h_0) - T_0 (s - s_0)) + (mV (P - P_0)) \quad (7.7)$$

Sabit sıcaklık ve farklı basınç altındaki gazlar için ;

$$e_{ph} = m T_0 R_x \ln(P/P_0) \quad (7.8)$$

Sabit sıcaklık ve farklı basınç altındaki katı ve sıvılar için ;

$$e_{ph} = mV (P - P_0) \quad (7.9)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Buradaki h entalpi, s entropi, Vözümlü hacim (m^3/kg), T_0 çevre sıcaklığı (K), P (bar) ve P_0 (bar) sırasıyla sistem ve çevre basınçlarıdır.

Isı transferi ile gerçekleşen ekserji " \dot{E}_x " ise şöyle ifade edilmektedir:

$$\dot{E}_x = \dot{Q} (1 - (T/T_0)) \quad (7.10)$$

" T_0 " atmosfer sıcaklığını, " T_1 " ise ısı transferi kaynak sıcaklığını göstermektedir

7.2.2. Kimyasal Ekserji Analizi

Referans madde türü r , prosese " T_0 " standart sıcaklığında ve " P_0 " standart basıncında girer, izotermal olarak genişler ve prosesden " T_0 " standart sıcaklığında ve referans çevre modelindeki " $x_{or}P_0$ " kısmi basıncı ile çıkar. Bu proseste kimyasal ekserji [76;77];

$$e_{ch}^0 = -R T_0 \ln (x_{or}) \quad (7.11)$$

Referans madde türlerinden oluşan bir gaz karışımının kimyasal ekserji hesabı, yine aynı temelde yapılır. Karışımındaki " r " gazı prosese " T_0 " standart sıcaklıkta ve karışımındaki " $x_r P_0$ " kısmi basıncında girer ve " T_0 " standart sıcaklıkta ve referans çevre modelindeki " $x_{or} P_0$ " kısmi basıncında çıkar. Bu durumda, referans madde türü olan gazlardan oluşan gaz karışımının kimyasal ekserji değeri, gazların kimyasal ekserji değerlerinin toplamı olur ve ;

$$e_{ch} = \sum x_r e_{chr}^0 + R T_0 \sum x_r \ln x_r \quad (7.12)$$

şeklinde verilir.

Katı maddeler için spesifik kimyasal ekserji ise ;

$$e_{ch}^0 = -R T_0 \ln x_{or} \quad (7.13)$$

olarak tanımlanır. Buradaki x_{or} ise referans maddenin mol kesridir.

7.2.3. Diğer Ekserjetik Parametreler

Sistemlerde tersinmezlik diğer bir deyişle ekserji yıkımı aşağıdaki gibi tarif edilebilir [72]:

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (7.14)$$

Termal bir sistemin entropi üretimi ise ;

$$\dot{S}_{gen} = \dot{E}x_{dest}/T_0 \quad (7.15)$$

şeklinde verilebilir.

Enerji ve ekserji verimleri ise sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır:

$$\eta_I = (\dot{Q}_{out}/\dot{Q}_{in}) \quad (7.16)$$

$$\eta_{II} = (\dot{E}x_{out}/\dot{E}x_{in}) \quad (7.17)$$

7.3. Ekonomik Analiz

NPV, mühendislik sistemlerinin ekonomik analizi için geliştirilen yöntemlerden biridir. NPV metodu ile herhangi bir projenin ömrü boyunca malolduğu tüm yıllık sermaye harcamaları ve tasarruflarının bugünkü değerini hesaplamak mümkündür.

NPV sistem için tüm güncel değerlerin toplamıdır. Maliyetler negatif ve tasarruflar pozitif olarak gösterilir; eğer sistem, beklenen tarihler arasında pozitifte geçiyorsa uygulamaya geçirilebilir, negatifse ise terk edilir.

NPV; " a " NPV faktörü, " B " kazanç, p periyot, C maliyet, i indirim oranı olarak alındığında aşağıdaki formüllere göre hesaplanır.

$$NPV = \sum_{i=1}^n (B - C)_i a_i \quad (7.18)$$

$$a = \frac{1}{(1+i)^p} \quad (7.19)$$

8. SİSTEM TANITIMI ve DENEY TASARIMI

Bu çalışmada, doğalgaz kullanan bir seramik fırınında üretilen farklı SKM için farklı oranlarda ve farklı enjeksiyon koşullarında (tek noktadan ana hatta, çok noktadan yani her brülöre ayrı ayrı) doğalgaza hidrojen ilavesinin sonuçlarının deneysel olarak değerlendirilmesi, termodinamik ve ekonomik analizi gerçekleştirmek amaçlanmıştır.

Çalışmada, Uşak ilinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında bulunan 102 brülör içeren bir seramik fırınında hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz yanma deneyleri gerçekleştirilmiş, birinci ve ikinci yasayı kapsayan enerji ve ekserji analizi ortaya konmuştur. Bu amaçla, çok noktalı enjeksiyon sisteminde yeni bir boru hattı döşenerek hidrojenin tüm brülörlere ulaşması sağlanmıştır. Her brülörde bulunan servo motorların altından hidrojenin doğalgazla buluşması sağlanmıştır. Ana hat sisteminde ise hidrojen doğrudan doğalgaz hattına verilmiştir.

Çalışmaların gerçekleştirildiği, 1972 yılında yurt dışında çalışan işçilerin iştiraki ile halka açık şirket statüsünde Uşak Elektro Porselen A.Ş. adıyla kurulan ve 1978 yılında üretime giren Uşak Seramik, 02.09.1986 tarihinde Şirket unvanını “Uşak Seramik Sanayi A.Ş” olarak değiştirmiştir. 31 Aralık 2011 tarihi itibarıyla 2011 yılında % 97.74 kapasite ile çalışan şirket, üretim faaliyetlerine 2012 yılının ilk 3 ayı; 31 Mart 2012 tarihi itibarıyla % 100 kapasiteyle, şirket merkezinin de bulunduğu Uşak-Banaz Karayolu 26. Km. Banaz-UŞAK adresinde 53.441 m² si kapalı olmak üzere toplam 216.947 m² alanda sürdürmektedir. Şirket, inşaat sektörünün SKM alt sektöründe düz renkli, beyaz ve desenli olmak üzere ; 20x25, 20x40 25x33, 25x40 33x50 ebatlarında duvar seramiği ile, 10x10, 10x20, 20x20, 33x33 30x60 40x40, 45x45 ebatlarında YK, 33x33 ile 45x45 ebatlarında sırlı granit, 33x33, 40x40, 60x60 ebatlarında teknik granit, değişik cins ve ebatlarda bordür dekor üretimi yapmaktadır.

Bu çalışmada 54 farklı hidrojen enjeksiyon oranında doğalgaz tüketimi, \pm 0.2% hata oranıyla ölçüm yapabilen Elster Instromet Quantometer mekanik sayacıyla hesaplanmıştır. Şekil 8.1'de hidrojen üretim ünitesi "Hydrobor" görülmektedir.



Şekil 8.1 Hidrojen üretim ünitesi "Hydrobor"

“Armada” şirketi tarafından geliştirilen "Hydrobor" ünitesi elektrolizle hidrojen üretimi ve hidrojen oranlarını kontrol etmek için kullanılmıştır. Sistem hidrojen üretimini kontrol eden bir elektronik karta sahiptir. Şekil 8.2'de çoklu nokta hidrojen enjeksiyon sistemi entegre edilmiş bir seramik fırını görülmektedir.



Şekil 8.2 Seramik fırını ve hidrojen zenginleştirme sistemi

Şekil 8.2(a)'da Fırın brülörleri, Şekil 8.2(b)'de Tek nokta (ana hat) enjeksiyon uygulaması, Şekil 8.2(c)'de Çoklu nokta enjeksiyon uygulaması görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8.2 (a) Fırın brülörleri, (b) Tek nokta uygulaması, (c) Çoklu nokta uygulaması

Sistemdeki hidrojen üretimi bilindiği üzere uygulanan elektrik akımı ve voltaj miktarına bağlıdır. Fırın sıcaklığını ölçmekte kullanılan Elimko TC-01 termocouple'ları ise $\pm\% 0.1$ 'lik bir ölçüm hatası ile maksimum 1600 derece sıcaklık ölçme yeteneğine sahiptir. Seramik fırınına giren ve çıkan maddelerin sıcaklığı ise, -60 °C ile +1000 °C aralığında çalışabilen, el tipi ScanTemp 440 Type K temassız ölçüm terminaliyle $\pm\% 2$ hata ve $\% 0.1$ hassasiyetle ölçülmüştür.

Hidrojen depolanmasında yüksek basınç içeren tüpler kullanılması hem pahalı, hem de yeterince güvenli değildir. Teze konu olan sistem sadece ihtiyaç kadar hidrojeni üretmesi ve depolamaya ihtiyaç duymaması bakımından öne çıkmaktadır. Bu sayede potansiyel kaza riski en aza indirilirken yanma işlemi eş zamanlı olarak devam etmektedir.

9. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, 40x40 YK ve 25x40 DK için elde edilen veriler değerlendirilmiş, doğalgaz ve hidrojen yoğunluğu sırasıyla $0,717 \text{ kg/m}^3$ ve $0,084 \text{ kg/m}^3$ olarak kabul edilmiştir.

Sistemin termodinamik bakımdan incelenmesi için her şeyden önce kütle denge analizi gerçekleştirilmiştir. Hidrojenle zenginleştirilmiş yakma sistemi içeren fırın için çoklu nokta enjeksiyonu optimum hidrojen oranında kütle dengeleri 40x40 YK üretimi için Çizelge 9.1'de; 25x40 DK üretimi içinse Çizelge 9.2'de verilmektedir.

Çizelge 9.1 40x40 YK üretimi için çoklu nokta enjeksiyonunda kütle dengesi

No :	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Sırlı Karo (YK)	298,15	10817	30,31
2	Doğalgaz (CH ₄)	298,15	447,41	1,25
3	Yakma Havası	298,15	10570,01	29,62
4	Soğutma Havası	298,15	10181,81	28,53
5	Hidrojen (H ₂)	298,15	1,0752	0,003
6	Sızıntı Hava	298,15	3668,30	10,28
	Toplam :		35686	100,00
No :	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Seramik (YK)	443,15	10664	29,88
2	Su Buharı Baca Gazı	548,15	619,16	1,74
3	Yanma Baca Gazı	548,15	11012,27	30,86
4	Diğer Baca Gazları	548,15	13390,65	37,52
	Toplam :		35686	100,00

Çizelge 9.2 25x40 DK üretimi için çoklu nokta enjeksiyonunda kütle dengesi

No :	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Sırlı Karo (DK)	298,15	9258	29,87
2	Doğalgaz (CH ₄)	298,15	349,90	1,13
3	Yakma Havası	298,15	9257,90	29,87
4	Soğutma Havası	298,15	8917,89	28,77
5	Hidrojen (H ₂)	298,15	0,756	0,002
6	Sızıntı Hava	298,15	3212,94	10,37
Toplam :			30997,38	100,00

No :	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Seramik (DK)	388,15	9041	29,21
2	Su Buharı Baca Gazı	548,15	542,30	1,75
3	Yanma Baca Gazı	548,15	9645,26	31,16
4	Diğer Baca Gazları	548,15	11728,40	37,89
Toplam :			30956,97	100,00

Hidrojenle zenginleştirilmiş yakma sistemi içeren fırın için tek nokta enjeksiyonu optimum hidrojen oranında kütle dengeleri 40x40 YK üretimi için Çizelge 9.3'te; 25x40 DK üretimi içinse Çizelge 9.4' de verilmektedir.

Çizelge 9.3 40x40 YK üretimi için tek nokta enjeksiyonunda kütle dengesi

No :	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Sırlı Karo (YK)	298,15	10817	30,31
2	Doğalgaz (CH ₄)	298,15	453,14	1,27
3	Yakma Havası	298,15	10570,01	29,61
4	Soğutma Havası	298,15	10181,81	28,53
5	Hidrojen (H ₂)	298,15	1,1592	0,003
6	Sızıntı Hava	298,15	3668,30	10,28
Toplam :			35691	100,00

No :	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Seramik (YK)	443,15	10664	29,88
2	Su Buharı Baca Gazı	548,15	619,16	1,74
3	Yanma Baca Gazı	548,15	11012,27	30,86
4	Diğer Baca Gazları	548,15	13390,65	37,52
Toplam :			35686	100,00

Çizelge 9.4 25x40 DK üretimi için tek nokta enjeksiyonunda kütle dengesi

No :	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Sırlı Karo (DK)	298,15	9258	29,85
2	Doğalgaz (CH ₄)	298,15	364,24	1,17
3	Yakma Havası	298,15	9257,90	29,85
4	Soğutma Havası	298,15	8917,89	28,76
5	Hidrojen (H ₂)	298,15	0,9576	0,003
6	Sızıntı Hava	298,15	3212,94	10,36
		Toplam :	31011,93	100,00
No :	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Seramik (DK)	388,15	9041	29,21
2	Su Buharı Baca Gazı	548,15	542,30	1,75
3	Yanma Baca Gazı	548,15	9645,26	31,16
4	Diğer Baca Gazları	548,15	11728,40	37,89
		Toplam :	30956,97	100,00

İki üretim için de fırın içine giren maddeler sırlı karo, doğalgaz, yakma havası, soğutma havası, hidrojen ve sızıntı hava iken; yanma prosesi sonucu açığa çıkan maddeler seramik, su buharı (sırlı karo ve sırdan çıkan su buharı), yanma baca gazı ve diğer baca gazlarıdır.

H₂ ilavesi çok düşük oranlarda gerçekleştiği ve proste elde edilen maksimum sıcaklık değişmediği için yakıt olarak sadece doğalgaz kullanıldığında gerçekleşen baca gazı emisyonları esas alınmış ve NO_x oluşumunda hidrojen enjeksiyonundan kaynaklanan bir artış olmadığı varsayılmıştır.

Sisteme giren ve çıkan maddelerin enerji analizleri 40x40 YK imalatında, çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen akışı olan 1,0752 kg/h hidrojen ilavesinde, gerçekleştirilmiş olup, ilgili sıcaklık, ısıl kapasite, kütle akışı, ve toplam enerji değerleri giren maddeler için Çizelge 9.5' de, çıkan maddeler için Çizelge 9.6' da verilmiştir.

Çizelge 9.5 40x40 YK üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No:	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Yer Karosu (YK)	298,15	0,749	10817	2415591
2	Doğalgaz Yanma Isısı	298,15			16390568
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	298,15	2,285	447,41	304807
4	Hidrojen Yanma Isısı	298,15			129024
5	Hidrojen Duyulur Isısı	298,15	14,89	1,0752	4773
6	Yakma Havası	298,15	1,006	10570,014	3170358
7	Soğutucu Hava	298,15	1,005	10181,808	3050885
8	Sızıntı Hava	298,15	1,006	3668,301	1100266
9	Isıya Dön. Elek. Enerjisi				1292400

Çizelge 9.6 40x40 YK üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No:	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Yer Karosu (YK)	443,15	0,771	10664	3643554,484
2	Baca Yanma Gazları	548,15	1,064	11012,27	6422706,185
3	Diğer Baca Gazları	548,15	1,025	13390,65	7523586,917
4	Isı Kayıpları				10268825

Sisteme giren ve çıkan maddelerin enerji analizleri 40x40 YK imalatında, tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen akışı olan 1,1592 kg/h hidrojen ilavesinde

gerçekleştirilmiş olup, ilgili sıcaklık, ısı kapasite, kütle akışı, ve toplam enerji değerleri giren maddeler için Çizelge 9.7' de, çıkan maddeler için Çizelge 9.8' da verilmiştir.

Çizelge 9.7 40x40 YK üretimi tek nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütlesel Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Yer Karosu (YK)	298,15	0,749	10817	2415591
2	Doğalgaz Yanma Isısı	298,15			16600557
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	298,15	2,285	453,14	308712
4	Hidrojen Yanma Isısı	298,15			139104
5	Hidrojen Duyulur Isısı	298,15	14,89	1,1592	5146
6	Yakma Havası	298,15	1,006	10570,014	3170358
7	Soğutucu Hava	298,15	1,005	10181,808	3050885
8	Sızıntı Hava	298,15	1,006	3668,301	1100266
9	Isıya Dön. Elek. Enerjisi				1292400

Çizelge 9.8 40x40 YK üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütlesel Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Yer Karosu (YK)	443,15	0,771	10664	3643554,484
2	Baca Yanma Gazları	548,15	1,064	11012,27	6422706,185
3	Diğer Baca Gazları	548,15	1,025	13390,65	7523586,917
4	Isı Kayıpları				10493172

Aynı şekilde giren ve çıkan maddelerin enerji analizleri 25x40 DK imalatında çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen akışı olan 0,756 kg/h hidrojen ilavesinde gerçekleştirilmiş olup ilgili sıcaklık, ısı kapasite, kütle akışı, ve toplam enerji değerleri giren maddeler için Çizelge 9.9' de ve çıkan maddeler için Çizelge 9.10'de verilmiştir.

Çizelge 9.9 25x40 DK üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısı kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	C _p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	Q _h (kJ/h)
1	Duvar Karosu	298,15	0,749	9258	2067444
2	Doğalgaz Yanma Isısı	298,15			12818265
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	298,15	2,285	349,90	238375
4	Hidrojen Yanma Isısı	298,15			90720
5	Hidrojen Duyulur Isısı	298,15	14,89	0,756	3356
6	Yakma Havası	298,15	1,006	9257,904	2776806
7	Soğutucu Hava	298,15	1,005	8917,888	2672163
8	Sızıntı Hava	298,15	1,006	3212,936	963684
9	Isıya Dön. Elek. Enerjisi				1292400

Çizelge 9.10 25x40 DK üretimi çoklu nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısıl kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	C _p (kJ/kgK)	Kütlesel Debi (kg/h)	Q _h (kJ/h)
1	Duvar Karosu	388,15	0,771	9041	2705642,66
2	Baca Yanma Gazları	548,15	1,064	9645,26	5625422,755
3	Diğer Baca Gazları	548,15	1,025	11728,4	6589645,522
4	Isı Kayıpları				8002502

Giren ve çıkan maddelerin enerji analizleri 25x40 DK imalatında, tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen akışı olan 0,9576 kg/h hidrojen ilavesinde gerçekleştirilmiş olup, ilgili sıcaklık, ısıl kapasite, kütle akışı, ve toplam enerji değerleri giren maddeler için Çizelge 9.11' de, çıkan maddeler için Çizelge 9.12' de verilmiştir.

Çizelge 9.11 25x40 DK üretimi tek nokta enjeksiyonunda giren maddeler için ısıl kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	C _p (kJ/kgK)	Kütlesel Debi (kg/h)	Q _h (kJ/h)
1	Duvar Karosu	298,15	0,749	9258	2067444
2	Doğalgaz Yanma Isısı	298,15			13343750
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	298,15	2,285	364,24	248147
4	Hidrojen Yanma Isısı	298,15			114912
5	Hidrojen Duyulur Isısı	298,15	14,89	0,9576	4251
6	Yakma Havası	298,15	1,006	9257,904	2776806
7	Soğutucu Hava	298,15	1,005	8917,888	2672163
8	Sızıntı Hava	298,15	1,006	3212,936	963684
9	Isıya Dön. Elek. Enerjisi				1292400

Çizelge 9.12 25x40 DK üretimi tek nokta enjeksiyonunda çıkan maddeler için ısıl kapasite, kütle akışı, toplam enerji değerleri

No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Duvar Karosu	388,15	0,771	9041	2705642,66
2	Baca Yanma Gazları	548,15	1,064	9645,26	5625422,755
3	Diğer Baca Gazları	548,15	1,025	11728,4	6589645,522
4	Isı Kayıpları				8562846

Teze konu olan fırın, elektroliz sisteminden bağımsız olarak 359 kW/h elektrik tüketmektedir. Bu değer ısıya dönüşen elektrik enerjisi olarak ele alınmıştır.

Enerji ve ekserji analizlerinde doğalgazın tamamen metan gazı olduğu varsayılmıştır. Bu oran işletmede aylara göre değişmekte olup yaklaşık olarak %96'dır.

Baca gazı içindeki katı parçacıklar ihmal edilebilir oranlarda olmaları nedeniyle yapılan analizlerde dikkate alınmamıştır.

H₂ ilavesi çok düşük oranlarda gerçekleştiği ve proste elde edilen maksimum sıcaklık değişmediği için yakıt olarak sadece doğalgaz kullanıldığında gerçekleşen baca gazı emisyonları esas alınmış ve NO_x oluşumunda hidrojen enjeksiyonundan kaynaklanan bir artış olmadığı varsayılmıştır.

Analizlerde sistem sürekli akış halinde kapalı bir sistem olarak ele alınmış olup; $T_0=298,15$ K ve $P_0=1$ bar olarak kabul edilmiştir.

40x40 YK üretimi için optimum hidrojen debisinde sisteme giren ve sistemden çıkan enerjiler sırasıyla çoklu nokta enjeksiyonlu üretimi için 27858673 kJ/h ve 17589848 kJ/h, tek nokta enjeksiyonlu üretim için sırasıyla 28083169 kJ/h ve 17589848 kJ/h'dir. 25x40 DK üretimi için optimum hidrojen debisinde sisteme giren ve sistemden çıkan enerjiler sırasıyla çoklu nokta enjeksiyonlu üretimi için

22923213 kJ/h ve 14920710 kJ/h, tek nokta enjeksiyonlu üretim için 23483408 kJ/h ve 14920710 kJ/h olarak belirlenmiştir.

Hidrojenle zenginleştirilmiş sistemde 40x40 YK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,0752 kg/h için giren ve çıkan ekserji analizi sırayla Çizelge 9.13 ve Çizelge 9.14' te, tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,1592 kg/h için giren ve çıkan ekserji analizi Çizelge 9.15 ve Çizelge 9.16' da verilmiştir

Çizelge 9.13 40x40 YK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,0752 kg/h için giren ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln(T/T ₀)	ln(P/P ₀)	DP (bar)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Yer Karosu	0,749									10817						4509097,097
	Al ₂ O ₃	0,77	0,1019	15	298,15	298,15	----	----	----	0,0815898	1934,0796	0	0	0	284702,5908	284702,59	
	SiO ₂	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	7598,9425	0	0	0	1038522,142	1038522,1	
	Na ₂ O	1,49	0,0629	296,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1321781	585,1997	0	0	0	2755741,672	2755741,7	
	Fe ₂ O ₃	0,65	0,1596	12,4	298,15	298,15	----	----	----	0,0520927	60,5752	0	0	0	4706,34386	4706,3439	
	CaO	0,75	0,056	110,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1484643	65,9837	0	0	0	129846,4954	129846,5	
	MgO	0,92	0,0403	59,1	298,15	298,15	----	----	----	0,2063027	67,0654	0	0	0	98351,49231	98351,492	
	H ₂ O (Kız.Kayıp.)	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	327,7551	0	0	0	172981,8583	172981,86	
Diğer Mad.	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	177,3988	0	0	0	24244,50267	24244,503		
2	Doğalgaz Yanma Isısı										447,41						827358,3082
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	2,285									447,41						11636707,25
	C	0,72	0,012	413,16	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	0,6928333	335,556	3829,3651	12,513995	3702,7087	8679850,262	8683553	
	H ₄	6,98	0,004	418,44	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	2,0785	111,852	12374,522	40,438745	3922,102	2949232,179	2953154,3	
4	Yakma Havası	1,006									10570,014						422322,9501
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	8178,0198	134806,48	440,53456	3461,0989	304237,4594	307698,56	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	2194,3349	31997,792	104,56569	821,52967	112841,0867	113662,62	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	3,1710042	43,223958	0,1412517	1,1097567	0,985369114	2,0951258	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	97,244129	816,8993	2,6695481	20,973542	529,303246	550,27679	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	1,0570014	70,029514	0,2288497	1,7979779	0,189853698	1,9878316	
	Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	96,187127	808,01996	2,6405313	20,745568	386,6700644	407,41563	
5	Soğutma Havası	1,005									10181,808						402643,9234
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	7877,6648	0	0	0	293063,6987	293063,7	
	O ₂	0,918	0,032	3,97	298,15	298,15	----	----	----	0,2598125	2113,7433	0	0	0	108696,7604	108696,76	
	CO ₂	0,844	0,044	19,87	298,15	298,15	----	----	----	0,1889545	3,0545424	0	0	0	0,949179361	0,9491794	
	Ar	0,52	0,0399	11,69	298,15	298,15	----	----	----	0,2083709	93,672634	0	0	0	509,8634708	509,86347	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	1,0181808	0	0	0	0,182880922	0,1828809	
Diğer	0,48	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	92,654453	0	0	0	372,4687928	372,46879		
6	Sızıntı Hava	1,006									3668,301						146566,2865
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	2838,1645	46784,303	152,88659	1201,1671	105584,9667	106786,13	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	761,53929	11104,766	36,289303	285,11013	39161,26045	39446,371	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	1,1004903	15,000783	0,0490211	0,3851387	0,341970267	0,727109	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	33,748369	283,50318	0,926461	7,2788233	183,6935719	190,9724	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	0,3668301	24,303595	0,0794218	0,6239844	0,065888324	0,6898728	
Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	33,381539	280,42162	0,9163908	7,1997056	134,1930279	141,39273		
7	Hidrojen Yanma Isısı										1,0752						4187,051761
8	Hidrojen Duyulur Isısı	14,89									1,08						2,672936496
	H ₂	14,89	0,00100794	9,49	298,15	308,15	0,03299	----	----	8,2485069	1,0752	160,09728	0,5281603	2,6262819	0,046654644	2,6729365	
																Toplam	17948885,54

Çizelge 9.14 40x40 YK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,0752 kg/h için çıkan ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Yer Karosu	0,771							10664						4639618,756
	Al ₂ O ₃	0,792	0,1019	15	298,15	443,15	0,3963116	0,0815898	1966,3022	225810,1395	617,18053	41797,764	289445,8521	331243,616	
	SiO ₂	0,761	0,06	8,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1385667	7725,544	852475,1508	2329,971	157794,31	1055824,344	1213618,654	
	Na ₂ O	1,53	0,0629	296,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1321781	594,94937	131989,5168	360,75156	24431,439	2801653,452	2826084,891	
	Fe ₂ O ₃	0,69	0,1596	12,4	298,15	443,15	0,3963116	0,0520927	61,584408	6161,519975	16,840564	1140,5057	4784,753469	5925,259195	
	CaO	0,83	0,056	110,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1484643	67,083015	8073,440899	22,066195	1494,4049	132009,791	133504,1958	
	MgO	0,97	0,0403	59,1	298,15	443,15	0,3963116	0,2063027	68,182737	9589,901949	26,210961	1775,1039	99990,0683	101765,1722	
	Diğer Mad.	0,761	0,06	8,2	298,15	423,15	0,35013	0,1385667	180,35434	17156,20625	48,055221	2828,542	24648,42597	27476,96796	
2	Karo Su Buharı	1,953							619,16					409541,5857	
	H ₂ O		0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889		302306,82	736,36169	82760,586	326781		
3	Yanma Baca Gazı	1,064							11012,274					1222241,668	
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	171,79147	42776,07713	104,19435	11710,53	1832,992412		13543,52266
	CO	1,059	0,028	275,1	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	0,5506137	145,7749771	0,35508	39,907874	0,279133875		40,18700747
	NO	1,021	0,03	88,9	298,15	548,15	0,6089523	0,2771333	2,2024548	562,1765877	1,3693548	153,90345	1,111767616		155,0152197
	NO ₂	0,934	0,046	55,6	298,15	548,15	0,6089523	0,1807391	0,2202455	51,42731958	0,1252671	14,078925	0,009295218		14,08822022
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	1932,6541	465769,635	1134,5259	127510,74	87813,86844		215324,612
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	343,58295	167754,3748	408,61762	45925,031	10774,80003		56699,83132
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	8561,2722	2253754,9	5489,7165	616995,92	319468,4946		936464,4117
4	Sızıntı Hava	1,025							13390,65					1468914,176	
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	10360,346	2727361,059	6643,3307	746652,02	385424,0246		1132076,04
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	2779,8989	669955,6445	1631,884	183409,43	142953,0271		326362,4552
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	4,017195	1000,281555	2,4364948	273,84062	1,248317451		275,0889358
	Ar	0,59	0,0399	11,69	298,15	548,15	0,6089523	0,2083709	123,19398	18171,11205	44,261359	4974,5879	670,5492075		5645,137147
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	1,339065	653,7984863	1,5925283	178,98619	0,240516656		179,2267039
	Diğer	0,466	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	121,85492	14196,0976	34,578983	3886,3739	489,8539867		4376,227903
Toplam														7740316,186	

Çizelge 9.15 40x40 YK üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,1592 kg/h için giren ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	ln (P/P ₀)	DP (bar)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Yer Karosu	0,749									10817						4509097,097
	Al ₂ O ₃	0,77	0,1019	15	298,15	298,15	----	----	----	0,0815898	1934,0796	0	0	0	284702,5908	284702,59	
	SiO ₂	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	7598,9425	0	0	0	1038522,142	1038522,1	
	Na ₂ O	1,49	0,0629	296,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1321781	585,1997	0	0	0	2755741,672	2755741,7	
	Fe ₂ O ₃	0,65	0,1596	12,4	298,15	298,15	----	----	----	0,0520927	60,5752	0	0	0	4706,34386	4706,3439	
	CaO	0,75	0,056	110,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1484643	65,9837	0	0	0	129846,4954	129846,5	
	MgO	0,92	0,0403	59,1	298,15	298,15	----	----	----	0,2063027	67,0654	0	0	0	98351,49231	98351,492	
	H ₂ O (Kız.Kayıp.)	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	327,7551	0	0	0	172981,8583	172981,86	
Diğer Mad.	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	177,3988	0	0	0	24244,50267	24244,503		
2	Doğalgaz Yanma Isısı										453,14						837965,4659
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	2,285									453,14						11785895,81
	C	0,72	0,012	413,16	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	0,6928333	339,858	3878,4595	12,674431	3750,1793	8791130,393	8794880,6	
	H ₄	6,98	0,004	418,44	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	2,0785	113,286	12533,17	40,95719	3972,3853	2987042,848	2991015,2	
4	Yakma Havası	1,006									10570,014						422322,9501
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	8178,0198	134806,48	440,53456	3461,0989	304237,4594	307698,56	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	2194,3349	31997,792	104,56569	821,52967	112841,0867	113662,62	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	3,1710042	43,223958	0,1412517	1,1097567	0,985369114	2,0951258	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	97,244129	816,8993	2,6695481	20,973542	529,303246	550,27679	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	1,0570014	70,029514	0,2288497	1,7979779	0,189853698	1,9878316	
	Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	96,187127	808,01996	2,6405313	20,745568	386,6700644	407,41563	
5	Soğutma Havası	1,005									10181,808						402643,9234
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	7877,6648	0	0	0	293063,6987	293063,7	
	O ₂	0,918	0,032	3,97	298,15	298,15	----	----	----	0,2598125	2113,7433	0	0	0	108696,7604	108696,76	
	CO ₂	0,844	0,044	19,87	298,15	298,15	----	----	----	0,1889545	3,0545424	0	0	0	0,949179361	0,9491794	
	Ar	0,52	0,0399	11,69	298,15	298,15	----	----	----	0,2083709	93,672634	0	0	0	509,8634708	509,86347	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	1,0181808	0	0	0	0,182880922	0,1828809	
	Diğer	0,48	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	92,654453	0	0	0	372,4687928	372,46879	
6	Sızıntı Hava	1,006									3668,301						146566,2865
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	2838,1645	46784,303	152,88659	1201,1671	105584,9667	106786,13	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	761,53929	11104,766	36,289303	285,11013	39161,26045	39446,371	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	1,1004903	15,000783	0,0490211	0,3851387	0,341970267	0,727109	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	33,748369	283,50318	0,926461	7,2788233	183,6935719	190,9724	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	0,3668301	24,303595	0,0794218	0,6239844	0,065888324	0,6898728	
	Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	33,381539	280,42162	0,9163908	7,1997056	134,1930279	141,39273	
7	Hidrojen Yanma Isısı										1,1592						4514,165179
8	Hidrojen Duyulur Isısı	14,89									1,16						2,881759659
	H ₂	14,89	0,00100794	9,49	298,15	308,15	0,03299	----	----	8,2485069	1,1592	172,60488	0,5694228	2,8314601	0,050299538	2,8817597	
																Toplam	18109008,57

Çizelge 9.16 40x40 YK üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 1,1592 kg/h için çıkan ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Yer Karosu	0,771							10664						4639618,756
	Al ₂ O ₃	0,792	0,1019	15	298,15	443,15	0,3963116	0,0815898	1966,3022	225810,1395	617,18053	41797,764	289445,8521	331243,616	
	SiO ₂	0,761	0,06	8,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1385667	7725,544	852475,1508	2329,971	157794,31	1055824,344	1213618,654	
	Na ₂ O	1,53	0,0629	296,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1321781	594,94937	131989,5168	360,75156	24431,439	2801653,452	2826084,891	
	Fe ₂ O ₃	0,69	0,1596	12,4	298,15	443,15	0,3963116	0,0520927	61,584408	6161,519975	16,840564	1140,5057	4784,753469	5925,259195	
	CaO	0,83	0,056	110,2	298,15	443,15	0,3963116	0,1484643	67,083015	8073,440899	22,066195	1494,4049	132009,791	133504,1958	
	MgO	0,97	0,0403	59,1	298,15	443,15	0,3963116	0,2063027	68,182737	9589,901949	26,210961	1775,1039	99990,0683	101765,1722	
Diger Mad.	0,761	0,06	8,2	298,15	423,15	0,35013	0,1385667	180,35434	17156,20625	48,055221	2828,542	24648,42597	27476,96796		
2	Karo Su Buharı	1,953							619,16						409541,5857
	H ₂ O		0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889		302306,82	736,36169	82760,586	326781	409541,5857	
3	Yanma Baca Gazı	1,064							11012,274						1222241,668
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	171,79147	42776,07713	104,19435	11710,53	1832,992412	13543,52266	
	CO	1,059	0,028	275,1	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	0,5506137	145,7749771	0,35508	39,907874	0,279133875	40,18700747	
	NO	1,021	0,03	88,9	298,15	548,15	0,6089523	0,2771333	2,2024548	562,1765877	1,3693548	153,90345	1,111767616	155,0152197	
	NO ₂	0,934	0,046	55,6	298,15	548,15	0,6089523	0,1807391	0,2202455	51,42731958	0,1252671	14,078925	0,009295218	14,08822022	
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	1932,6541	465769,635	1134,5259	127510,74	87813,86844	215324,612	
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	343,58295	167754,3748	408,61762	45925,031	10774,80003	56699,83132	
N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	8561,2722	2253754,9	5489,7165	616995,92	319468,4946	936464,4117		
4	Sızıntı Hava	1,025							13390,65						1468914,176
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	10360,346	2727361,059	6643,3307	746652,02	385424,0246	1132076,04	
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	2779,8989	669955,6445	1631,884	183409,43	142953,0271	326362,4552	
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	4,017195	1000,281555	2,4364948	273,84062	1,248317451	275,0889358	
	Ar	0,59	0,0399	11,69	298,15	548,15	0,6089523	0,2083709	123,19398	18171,11205	44,261359	4974,5879	670,5492075	5645,137147	
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	1,339065	653,7984863	1,5925283	178,98619	0,240516656	179,2267039	
	Diger	0,466	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	121,85492	14196,0976	34,578983	3886,3739	489,8539867	4376,227903	
Toplam														7740316,186	

25x40 DK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,756 kg/h için giren ve çıkan ekserji analizi sırasıyla Çizelge 9.17 ve Çizelge 9.18' de; tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,9576 kg/h için giren ve çıkan ekserji analizi sırasıyla Çizelge 9.19 ve Çizelge 9.20'de verilmektedir.

Çizelge 9.17 25x40 DK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,756 kg/h için giren ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	ln (P/P ₀)	DP (bar)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Duvar Karosu	0,749									9258						3231729,042
	Al ₂ O ₃	0,77	0,1019	15	298,15	298,15	----	----	----	0,0815898	1516,4604	0	0	0	223227,7331	223227,73	
	SiO ₂	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	5597,3868	0	0	0	764976,196	764976,2	
	Na ₂ O	1,49	0,0629	296,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1321781	102,7638	0	0	0	483921,1059	483921,11	
	Fe ₂ O ₃	0,65	0,1596	12,4	298,15	298,15	----	----	----	0,0520927	205,5276	0	0	0	15968,30977	15968,31	
	CaO	0,75	0,056	110,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1484643	574,9218	0	0	0	1131363,971	1131364	
	MgO	0,92	0,0403	59,1	298,15	298,15	----	----	----	0,2063027	55,548	0	0	0	81461,21092	81461,2111	
	H ₂ O (Kız.Kayıp.)	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	935,9838	0	0	0	493991,45	493991,45	
	Diger Mad.	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	269,4078	0	0	0	36819,066	36819,066	
2	Doğalgaz Yanma Isısı										349,90						647036,6256
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	2,285									349,90						9100501,824
	C	0,72	0,012	413,16	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	0,6928333	262,422	2994,7599	9,7865862	2895,7081	6788088,025	6790983,7	
	H ₄	6,98	0,004	418,44	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	2,0785	87,474	9677,511	31,625172	3067,2849	2306450,806	2309518,1	
4	Yakma Havası	1,006									9257,904						369897,8382
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	7162,8403	118072,26	385,84875	3031,455	266470,9046	269502,36	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	1921,9409	28025,742	91,585419	719,54898	98833,54439	99553,093	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	2,7773712	37,858347	0,1237174	0,9719969	0,863050197	1,8350471	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	85,172717	715,49341	2,3381634	18,369988	463,5981218	481,96811	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	0,9257904	61,336391	0,2004414	1,5747857	0,166286186	1,7410719	
	Diger	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	84,246926	707,71631	2,3127486	18,170315	338,6707279	356,84104	
5	Soğutma Havası	1,005									8917,888						352661,67
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	6899,7699	0	0	0	256684,2001	256684,2	
	O ₂	0,918	0,032	3,97	298,15	298,15	----	----	----	0,2598125	1851,3535	0	0	0	95203,67456	95203,675	
	CO ₂	0,844	0,044	19,87	298,15	298,15	----	----	----	0,1889545	2,6753664	0	0	0	0,831352863	0,8313529	
	Ar	0,52	0,0399	11,69	298,15	298,15	----	----	----	0,2083709	82,04457	0	0	0	446,5715056	446,57151	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	0,8917888	0	0	0	0,160178976	0,160179	
	Diger	0,48	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	81,152781	0	0	0	326,232333	326,23233	
6	Sızıntı Hava	1,006									3212,936						128372,2623
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	2485,8486	40976,728	133,90799	1052,06	92478,16378	93530,224	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	667,00551	9726,2744	31,784526	249,71795	34299,97252	34549,69	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	0,9638808	13,138659	0,0429359	0,3373295	0,299519745	0,6368492	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	29,559011	248,31047	0,8114547	6,3752656	160,8907475	167,26601	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	0,3212936	21,286665	0,0695628	0,5465261	0,057709269	0,6042353	
	Diger	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	29,237718	245,61145	0,8026345	6,3059693	117,5349597	123,84093	
7	Hidrojen Yanma Isısı										0,7560						2944,020769
8	Hidrojen Duyulur Isısı	14,89									0,76						1,879408474
	H ₂	14,89	0,00100794	9,49	298,15	308,15	0,03299	----	----	8,2485069	0,756	112,5684	0,3713627	1,8466044	0,032804047	1,8794085	
																Toplam	13833145,16

Çizelge 9.18 25x40 DK üretiminde çoklu nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,756 kg/h için çıkan ekserji analizi

No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Duvar Karosu	0,771							9041						3056425,639
	Al ₂ O ₃	0,792	0,1019	15	298,15	388,15	0,2637951	0,0815898	1647,4756	117432,0594	344,20008	14808,805	242513,5792	257322,3841	
	SiO ₂	0,761	0,06	8,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1385667	6080,2988	416439,6632	1220,6085	52515,248	830974,1661	883489,414	
	Na ₂ O	1,53	0,0629	296,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1321781	111,64212	15373,11967	45,059493	1938,6318	525729,6565	527668,2883	
	Fe ₂ O ₃	0,69	0,1596	12,4	298,15	388,15	0,2637951	0,0520927	223,28424	13865,95107	40,641896	1748,5699	17347,89806	19096,46795	
	CaO	0,83	0,056	110,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1484643	624,59239	46657,05159	136,75449	5883,7014	1229108,597	1234992,299	
	MgO	0,97	0,0403	59,1	298,15	388,15	0,2637951	0,2063027	60,347091	5268,301035	15,441692	664,36067	88499,08366	89163,44433	
	Diğer Mad.	0,761	0,06	8,2	298,15	423,15	0,35013	0,1385667	293,35981	27905,85157	78,165409	4600,8349	40092,50686	44693,34179	
2	Karo Su Buharı	1,953							542,30					358703,0901	
	H ₂ O		0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889		264779,93	644,95334	72487,09	286216		358703,0901
3	Yanma Baca Gazı	1,064							9645,264					1070518,547	
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	150,46612	37466,06348	91,260176	10256,842	1605,453672		11862,2958
	CO	1,059	0,028	275,1	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	0,4822632	127,6791822	0,3110021	34,953905	0,244483557		35,19838831
	NO	1,021	0,03	88,9	298,15	548,15	0,6089523	0,2771333	1,9290528	492,3907272	1,1993698	134,79863	0,973758205		135,7723862
	NO ₂	0,934	0,046	55,6	298,15	548,15	0,6089523	0,1807391	0,1929053	45,04338288	0,1097171	12,331236	0,008141355		12,33937725
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	1692,7438	407951,2635	993,69137	111682,18	76913,08298		188595,2646
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	300,93224	146930,1646	357,89382	40224,122	9437,26889		49661,39072
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	7498,5176	1973984,756	4808,2499	540405,05	279811,2333		820216,2857
4	Sızıntı Hava	1,025							11728,4					1286570,332	
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	9074,2631	2388799,756	5818,66	653966,27	337579,3654		991545,6402
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	2434,8158	586790,6174	1429,3099	160641,88	125207,5353		285849,4113
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	3,51852	876,11148	2,1340403	239,84738	1,093357409		240,9407366
	Ar	0,59	0,0399	11,69	298,15	548,15	0,6089523	0,2083709	107,90128	15915,4388	38,766969	4357,0668	587,3104984		4944,377346
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	1,17284	572,63913	1,3948396	156,76771	0,210660091		156,9783748
	Diğer	0,466	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	106,72844	12433,86326	30,286516	3403,9384	429,0459012		3832,984309
Toplam														5772217,609	

Çizelge 9.19 25x40 DK üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,9576 kg/h için giren ekserji analizi

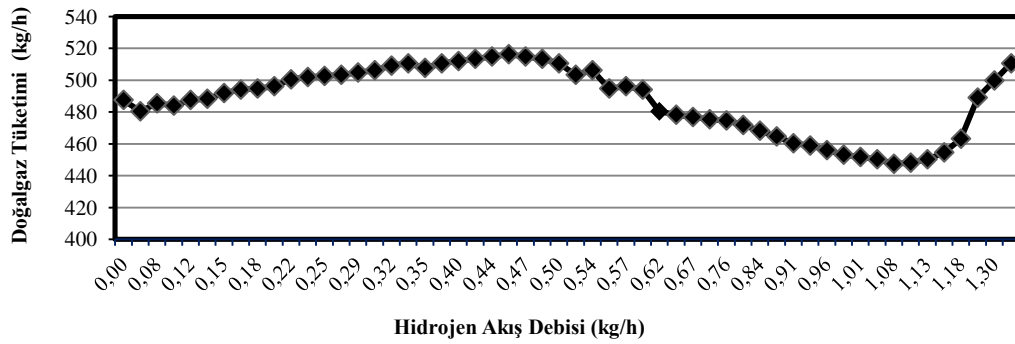
No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	ln (P/P ₀)	DP (bar)	R _s (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Duvar Karosu	0,749									9258						3231729,042
	Al ₂ O ₃	0,77	0,1019	15	298,15	298,15	----	----	----	0,0815898	1516,4604	0	0	0	223227,7331	223227,73	
	SiO ₂	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	5597,3868	0	0	0	764976,196	764976,2	
	Na ₂ O	1,49	0,0629	296,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1321781	102,7638	0	0	0	483921,1059	483921,11	
	Fe ₂ O ₃	0,65	0,1596	12,4	298,15	298,15	----	----	----	0,0520927	205,5276	0	0	0	15968,30977	15968,31	
	CaO	0,75	0,056	110,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1484643	574,9218	0	0	0	1131363,971	1131364	
	MgO	0,92	0,0403	59,1	298,15	298,15	----	----	----	0,2063027	55,548	0	0	0	81461,21092	81461,211	
	H ₂ O (Kız.Kayıp.)	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	935,9838	0	0	0	493991,45	493991,45	
	Diğer Mad.	0,74	0,06	8,2	298,15	298,15	----	----	----	0,1385667	269,4078	0	0	0	36819,066	36819,066	
2	Doğalgaz Yanma Isısı										364,24						673554,5201
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	2,285									364,24						9473473,211
	C	0,72	0,012	413,16	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	0,6928333	273,177	3117,4959	10,187676	3014,3846	7066288,354	7069302,7	
	H ₄	6,98	0,004	418,44	298,15	314	0,0517963	0,052	0,02	2,0785	91,059	10074,13	32,921286	3192,9933	2400977,479	2404170,5	
4	Yakma Havası	1,006									9257,904						369897,8382
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	7162,8403	118072,26	385,84875	3031,455	266470,9046	269502,36	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	1921,9409	28025,742	91,585419	719,54898	98833,54439	99553,093	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	2,7773712	37,858347	0,1237174	0,9719969	0,863050197	1,8350471	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	85,172717	715,49341	2,3381634	18,369988	463,5981218	481,96811	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	9,257904	61,336391	0,2004414	1,5747857	0,166286186	1,7410719	
	Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	84,246926	707,71631	2,3127486	18,170315	338,6707279	356,84104	
5	Soğutma Havası	1,005									8917,888						352661,67
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	6899,7699	0	0	0	256684,2001	256684,2	
	O ₂	0,918	0,032	3,97	298,15	298,15	----	----	----	0,2598125	1851,3535	0	0	0	95203,67456	95203,675	
	CO ₂	0,844	0,044	19,87	298,15	298,15	----	----	----	0,1889545	2,6753664	0	0	0	0,831352863	0,8313529	
	Ar	0,52	0,0399	11,69	298,15	298,15	----	----	----	0,2083709	82,04457	0	0	0	446,5715056	446,57151	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	298,15	----	----	----	0,4618889	0,8917888	0	0	0	0,160178976	0,160179	
	Diğer	0,48	0,028	0,72	298,15	298,15	----	----	----	0,2969286	81,152781	0	0	0	326,232333	326,23233	
6	Sızıntı Hava	1,006									3212,936						128372,2623
	N ₂	1,04	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	2485,8486	40976,728	133,90799	1052,06	92478,16378	93530,224	
	O ₂	0,92	0,032	3,97	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2598125	667,00551	9726,2744	31,784526	249,71795	34299,97252	34549,69	
	CO ₂	0,86	0,044	19,87	298,15	314	0,0517963	----	----	0,1889545	0,9638808	13,138659	0,0429359	0,3373295	0,299519745	0,6368492	
	Ar	0,53	0,0399	11,69	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2083709	29,559011	248,31047	0,8114547	6,3752656	160,8907475	167,26601	
	H ₂ O	4,18	0,018	9,5	298,15	314	0,0517963	----	----	0,4618889	0,3212936	21,286665	0,0695628	0,5465261	0,057709269	0,6042353	
	Diğer	0,53	0,028	0,72	298,15	314	0,0517963	----	----	0,2969286	29,237718	245,61145	0,8026345	6,3059693	117,5349597	123,84093	
7	Hidrojen Yanma Isısı										0,9576						3729,092974
8	Hidrojen Duyulur Isısı	14,89									0,96						2,380584066
	H ₂	14,89	0,00100794	9,49	298,15	308,15	0,03299	----	----	8,2485069	0,9576	142,58664	0,4703928	2,3390323	0,041551792	2,3805841	
																Toplam	14233420,02

Çizelge 9.20 25x40 DK üretiminde tek nokta enjeksiyonu için optimum hidrojen oranı olan 0,9576 kg/h için çıkan ekserji analizi

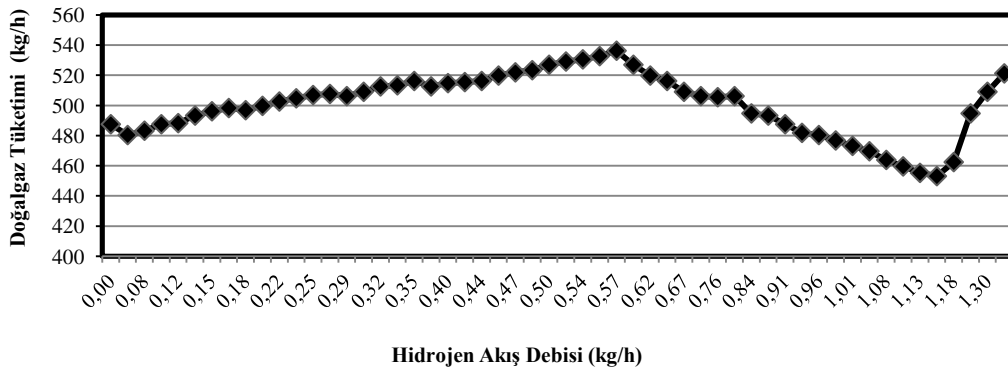
No	Madde Adı	C _p (kJ/kgK)	M (kg/mol)	e (kJ/mol)	T ₀ (K)	T (K)	ln (T/T ₀)	R _x (kJ/kgK)	m (kg/h)	Entalpi (kJ/h)	Entropi (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ekserji (kJ/h)	Toplam Ekserji (kJ/h)	Genel Toplam Ekserji (kJ/h)
1	Duvar Karosu	0,771							9041						3056425,639
	Al ₂ O ₃	0,792	0,1019	15	298,15	388,15	0,2637951	0,0815898	1647,4756	117432,0594	344,20008	14808,805	242513,5792	257322,3841	
	SiO ₂	0,761	0,06	8,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1385667	6080,2988	416439,6632	1220,6085	52515,248	830974,1661	883489,414	
	Na ₂ O	1,53	0,0629	296,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1321781	111,64212	15373,11967	45,059493	1938,6318	525729,6565	527668,2883	
	Fe ₂ O ₃	0,69	0,1596	12,4	298,15	388,15	0,2637951	0,0520927	223,28424	13865,95107	40,641896	1748,5699	17347,89806	19096,46795	
	CaO	0,83	0,056	110,2	298,15	388,15	0,2637951	0,1484643	624,59239	46657,05159	136,75449	5883,7014	1229108,597	1234992,299	
	MgO	0,97	0,0403	59,1	298,15	388,15	0,2637951	0,2063027	60,347091	5268,301035	15,441692	664,36067	88499,08366	89163,44433	
Diğer Mad.	0,761	0,06	8,2	298,15	423,15	0,35013	0,1385667	293,35981	27905,85157	78,165409	4600,8349	40092,50686	44693,34179		
2	Karo Su Buharı	1,953							542,30					358703,0901	
	H ₂ O		0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889		264779,93	644,95334	72487,09	286216		358703,0901
3	Yanma Baca Gazı	1,064							9645,264					1070518,547	
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	150,46612	37466,06348	91,260176	10256,842	1605,453672		11862,2958
	CO	1,059	0,028	275,1	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	0,4822632	127,6791822	0,3110021	34,953905	0,244483557		35,19838831
	NO	1,021	0,03	88,9	298,15	548,15	0,6089523	0,2771333	1,9290528	492,3907272	1,1993698	134,79863	0,973758205		135,7723862
	NO ₂	0,934	0,046	55,6	298,15	548,15	0,6089523	0,1807391	0,1929053	45,04338288	0,1097171	12,331236	0,008141355		12,33937725
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	1692,7438	407951,2635	993,69137	111682,18	76913,08298		188595,2646
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	300,93224	146930,1646	357,89382	40224,122	9437,26889		49661,39072
N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	7498,5176	1973984,756	4808,2499	540405,05	279811,2333	820216,2857		
4	Sızıntı Hava	1,025							11728,4					1286570,332	
	N ₂	1,053	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	9074,2631	2388799,756	5818,66	653966,27	337579,3654		991545,6402
	O ₂	0,964	0,032	3,97	298,15	548,15	0,6089523	0,2598125	2434,8158	586790,6174	1429,3099	160641,88	125207,5353		285849,4113
	CO ₂	0,996	0,044	19,87	298,15	548,15	0,6089523	0,1889545	3,51852	876,11148	2,1340403	239,84738	1,093357409		240,9407366
	Ar	0,59	0,0399	11,69	298,15	548,15	0,6089523	0,2083709	107,90128	15915,4388	38,766969	4357,0668	587,3104984		4944,377346
	H ₂ O	1,953	0,018	9,5	298,15	548,15	0,6089523	0,4618889	1,17284	572,63913	1,3948396	156,76771	0,210660091		156,9783748
Diğer	0,466	0,028	0,72	298,15	548,15	0,6089523	0,2969286	106,72844	12433,86326	30,286516	3403,9384	429,0459012	3832,984309		
														Toplam	5772217,609

Sisteme giren ve çıkan ekserji 40x40 YK üretimi çoklu nokta enjeksiyonu için sırasıyla 17948885,54 kJ/h ve 7740316,186 kJ/h, ve tek nokta enjeksiyonu için sırasıyla 18109008,57 kJ/h ve 7739881,11 kJ/h'tır. 25x40 DK üretiminde ise çoklu nokta enjeksiyonu için giren ve çıkan ekserjiler sırasıyla 13833145,16 kJ/h ve 5772217,60 kJ/h, tek nokta enjeksiyonu içinse giren ve çıkan ekserjiler sırasıyla 14233420,02 kJ/h ve 5772217,60 kJ/h olarak hesaplanmıştır.

Çoklu nokta ve tek nokta enjeksiyon uygulamalarında enjekte edilen hidrojen oranı ile doğalgaz tüketimi değişimi 40x40 YK üretimi için sırasıyla Şekil 9.1 ve Şekil 9.2' de verilmiştir.



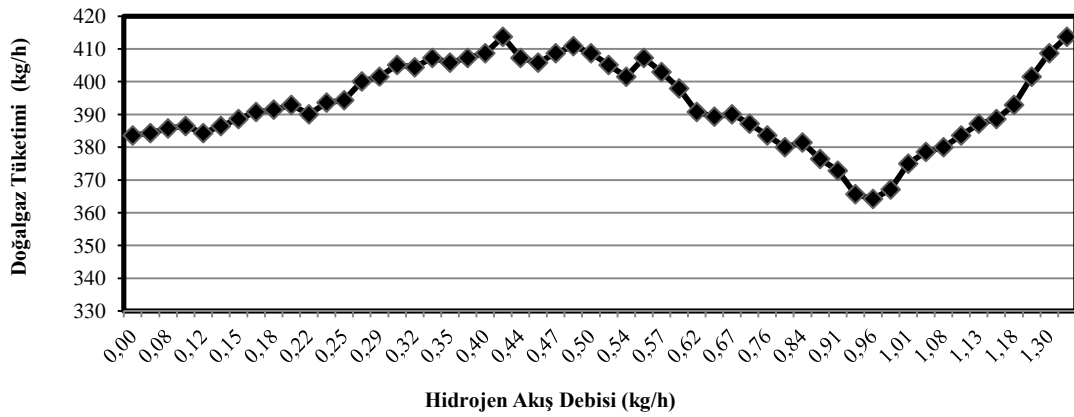
Şekil 9.1 40x40 YK çoklu nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi



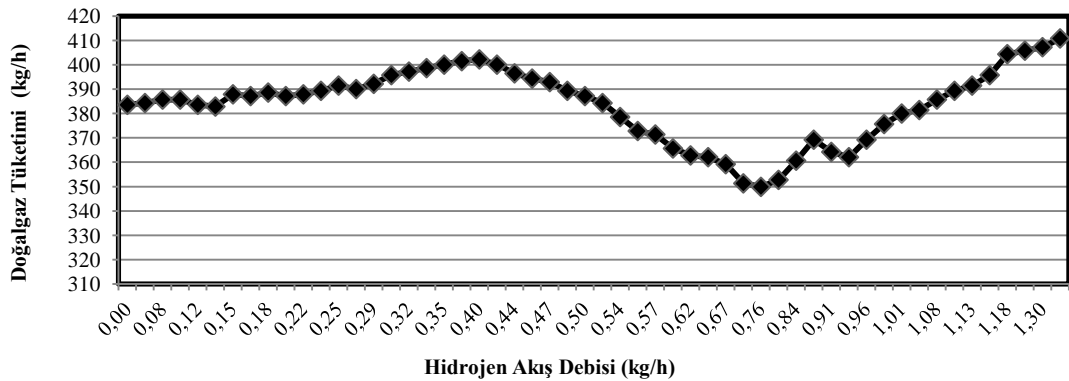
Şekil 9.2 40x40 YK tek nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi

Doğalgaz tüketimi, doğalgazın hidrojenle kombinasyonunda hidrojenin belirli bir oranı için minimum bir değere sahiptir. Bu oran 40x40 YK üretiminde çok noktalı enjeksiyon sistemi kullanıldığında 447,41 kg/h doğalgaz tüketimi için 1,0752 kg/h hidrojen ve çok noktalı enjeksiyon sistemi kullanıldığında 453,14 kg /h doğalgaz tüketimi için 1,1592 kg/h tir.

Çoklu nokta ve tek nokta enjeksiyon uygulamalarında enjekte edilen hidrojen oranı ile doğalgaz tüketimi değişimi 25x40 DK üretimi için sırasıyla Şekil 9.3 ve Şekil 9.4' te verilmiştir.



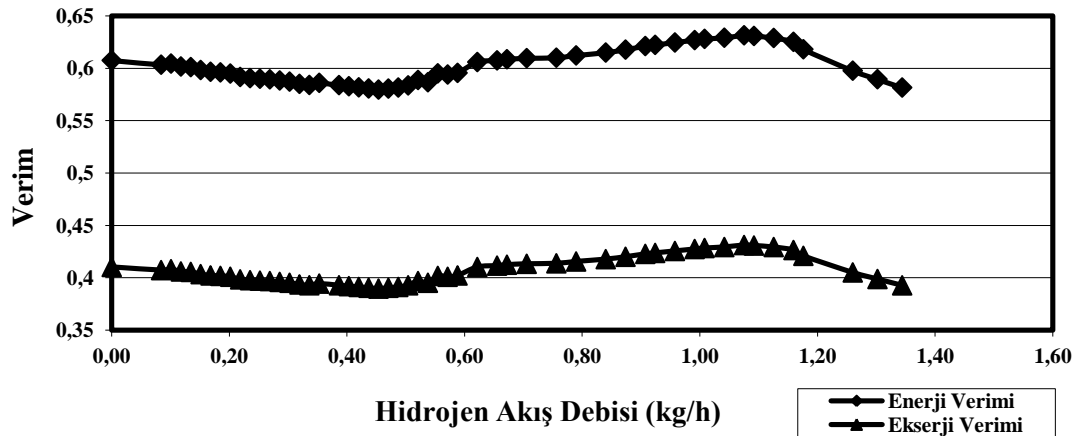
Şekil 9.3 25x40 DK çoklu nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi



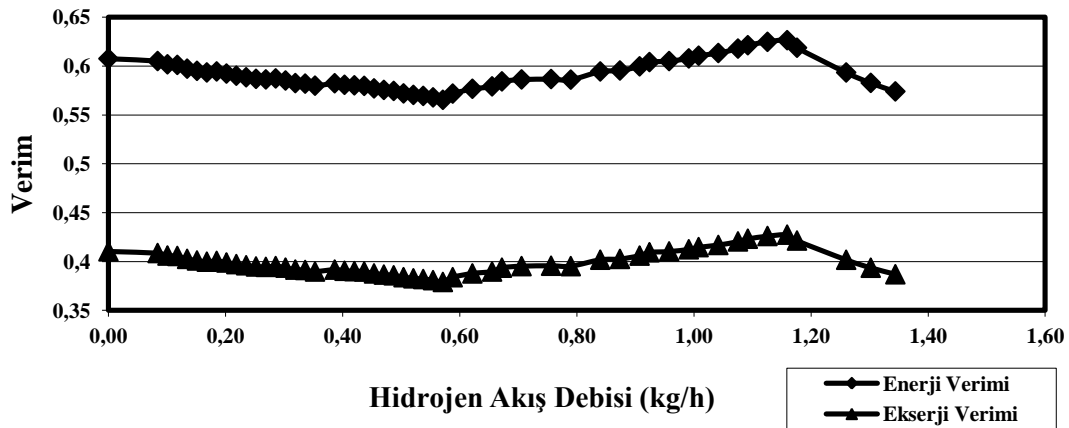
Şekil 9.4 25x40 DK tek nokta hidrojen enjeksiyonunda hidrojen ve doğalgaz tüketimi

25x40 DK üretiminde ise çoklu nokta enjeksiyon sistemi kullanıldığında 349,896 kg/h doğalgaz tüketimi için 0,756 kg/h hidrojen ve tek nokta enjeksiyon sistemi kullanıldığında 364,236 kg/h doğalgaz tüketimi için 0,9576 kg/h' dir.

Enerji ve ekserji verimleri 298,15 K referans (ölu hal) sıcaklığında değerlendirilmiş olup, Şekil 9.5' te 40x40 YK için çoklu nokta ve Şekil 9.6' da tek nokta enjeksiyon sistemindeki hidrojen oranına bağılı olarak değişen enerji ve ekserji verimleri verilmiştir.



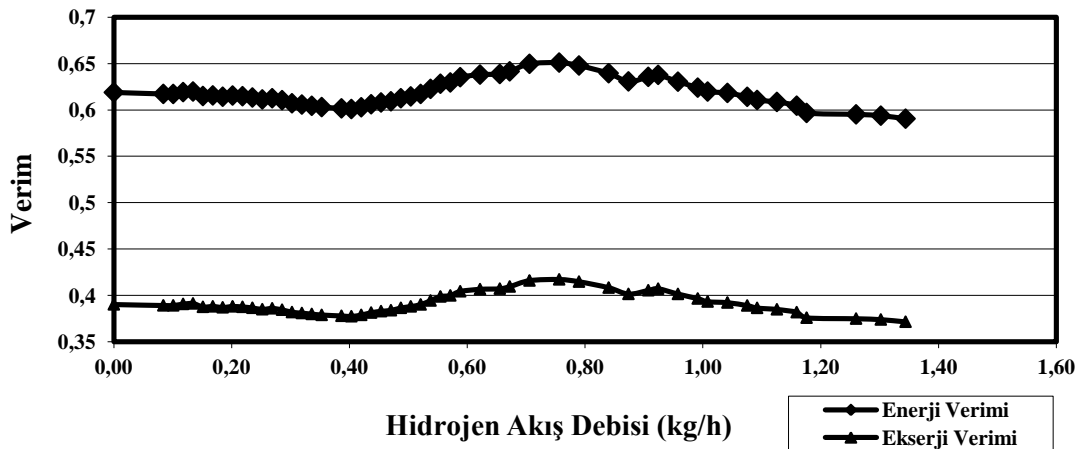
Şekil 9.5 40x40 YK çoklu nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri



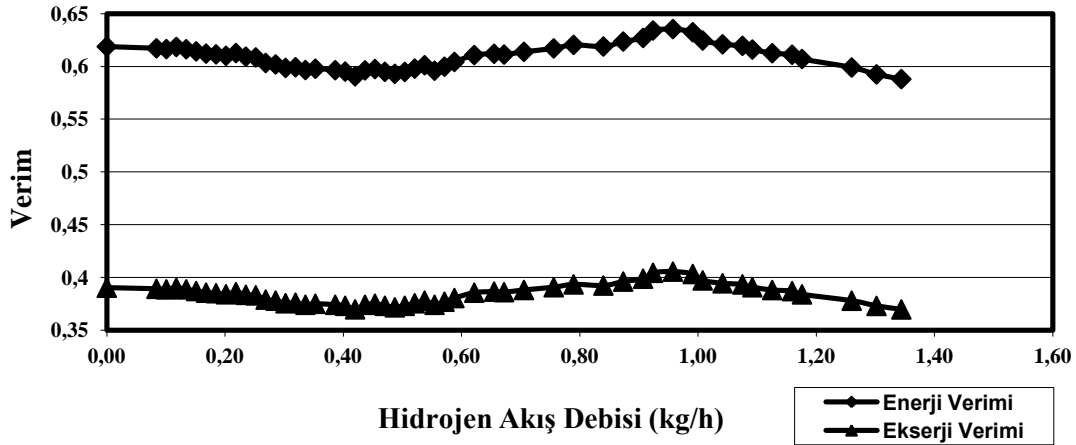
Şekil 9.6 40x40 YK tek nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri

40x40 YK üretiminde minimum doğalgaz debisinin sağlandığı optimum hidrojen debisinde enerji verimliliği çoklu nokta ve tek nokta enjeksiyonu için sırasıyla %63,13 ve %62,63 ve ekserji verimliliği sırasıyla %43,12 ve %42,74 olarak bulunmuştur.

Aynı şekilde enerji ve ekserji verimleri 298,15 K referans (ölü hal) sıcaklığında, Şekil 9.7' de 25x40 DK için çoklu nokta ve Şekil 9.8' de tek nokta enjeksiyon sistemindeki hidrojen oranına bağlı olarak değişen enerji ve ekserji verimleri verilmiştir.



Şekil 9.7 25x40 DK çoklu nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri



Şekil 9.8 25x40 DK tek nokta enjeksiyonu için enerji ve ekserji verimleri

25x40 DK üretiminde minimum doğalgaz debisinin sağlandığı optimum hidrojen debisinde enerji verimliliği çoklu nokta ve tek nokta enjeksiyonu için sırasıyla %65,08 ve %63,53 ve ekserji verimliliği %41,72 ve %40,55 olarak bulunmuştur.

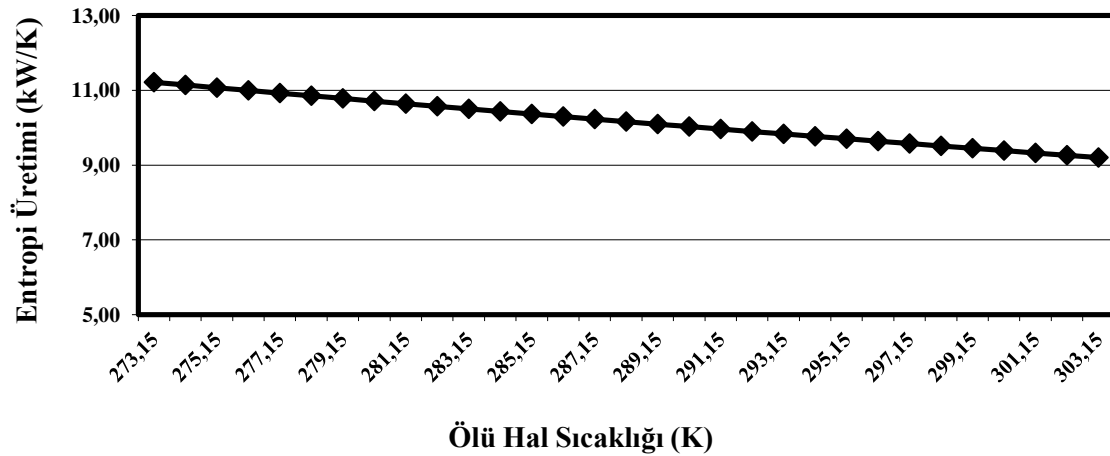
Deneylerde, hidrojen-doğalgazın 54 farklı karışım oranı enerji ve ekserji analizleri için test edilmiş ve incelenmiştir. Maksimum enerji ve ekserji verim değerleri minimum doğal gaz tüketiminde, diğer bir deyişle, optimum hidrojen oranında elde edilmiştir. Bu optimum hidrojen oranları çoklu nokta ve tek nokta enjeksiyon uygulamaları için sırasıyla 40x40 YK üretiminde 1,0752 kg / h ve 1,1592 kg /h; 25x40 DK üretiminde 0,756 kg/h ve 0,9576 kg/h olarak belirlenmiştir.

Çoklu nokta enjeksiyon uygulaması tek nokta uygulaması ile karşılaştırıldığında her iki üretimde de enerji ve ekserji verimliliği açısından biraz daha yüksek değerler elde edildiği göze çarpmaktadır. Bu açıdan bakıldığında çoklu nokta enjeksiyon yöntemi; ihmal edilebilir tesisat maliyeti karşısında enerji tasarrufu için bir adım öne çıkmaktadır.

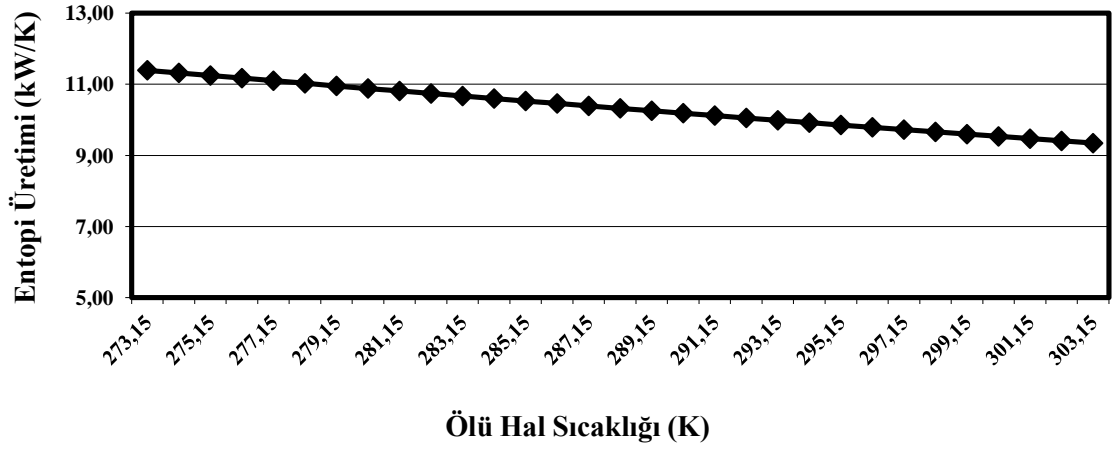
Apak (2007) yaptığı çalışmada seramik fabrikasındaki üretim proseslerini enerji ve ekserji açısından incelemiş ve doğalgazla çalışan geleneksel seramik fırın

için enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %43 ve %11 olarak bulmuştur [13]. Yanı sıra Utlu vd. (2011) doğalgazla çalışan bir seramik fırını için enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %35 ve %16 olarak öne sürmüşlerdir [14]. Bu çalışmaların ışığında hidrojen zenginleştirilmiş doğalgaz kullanan bir seramik fırınının sadece doğalgaz kullanan geleneksel bir seramik fırına göre her iki yasa bakımından da oldukça verimli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada, hidrojen zenginleştirilmiş yanma sistemi için termodinamiğin ikinci kanunu çerçevesinde ekserji verim değerlerinin yüksek oranlarda çıkması dikkat çekicidir. Bu farklılık yanma prosesindeki iyileşmeden kaynaklanmaktadır.

Ekserji her zaman bir referans duruma (yani ölü hale) göre değerlendirilir. “Ölü hal” ise termodinamik sistemin ortamı ile denge halinde oluşudur [78]. Hidrojen zenginleştirme sistemi 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için analiz edildiğinde entropi üretimi 40x40 YK çoklu nokta uygulamasında Şekil 9.9' da, aynı üretim için tek nokta enjeksiyonunda Şekil 9.10' da olduğu gibi karşımıza çıkmaktadır.



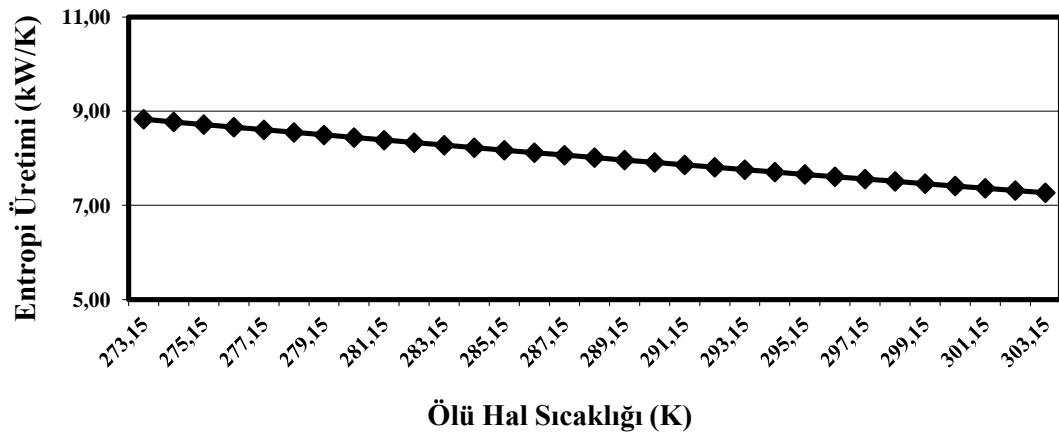
Şekil 9.9 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 40x40 YK çoklu nokta uygulamasında entropi üretimi



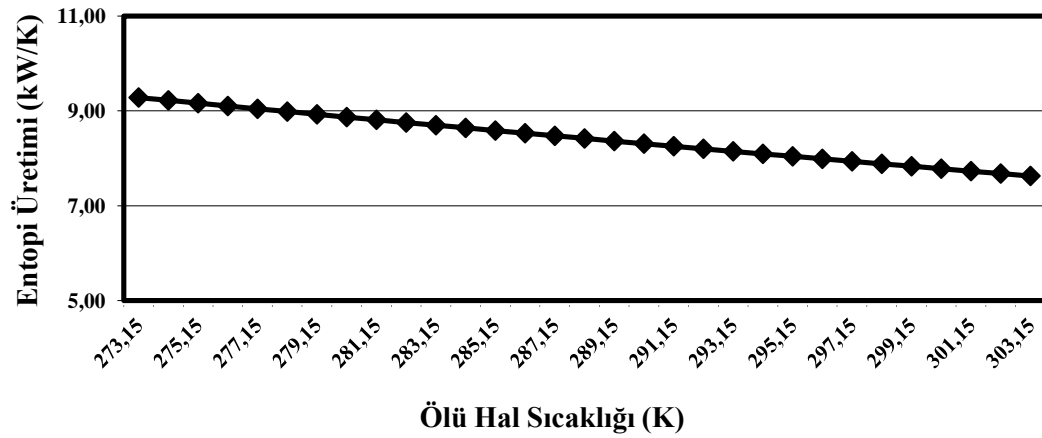
Şekil 9.10 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 40x40 YK tek nokta uygulamasında entropi üretimi

İncelenen farklı ölü hal sıcaklıkları için entropi üretimi 40x40 YK üretiminde çoklu nokta enjeksiyon sitemi için 11,21 kW/K' den 9,20 kW/K'ye ve tek noktali enjeksiyon sistemi için 11,40 kW/K'den 9,34 kW/K'ye kadar değişmektedir.

Aynı şekilde entropi üretimi 25x40 DK çoklu nokta uygulamasında Şekil 9.11' de, tek nokta uygulamasında Şekil 9.12' de olduğu gibi karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 9.11 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 25x40 DK çoklu nokta uygulamasında entropi üretimi



Şekil 9.12 273,15 K' den 303,15 K' ye kadar olan 31 farklı referans (ölü hal) sıcaklıkları için 25x40 DK tek nokta uygulamasında entropi üretimi

İncelenen farklı ölü hal sıcaklıkları için entropi üretimi 25x40 DK üretimi için ele alındığında çoklu nokta enjeksiyon sistemi için 8,82 kW/K' den 7,26 kW/K'ye ve tek nokta enjeksiyon sistemi için 9,28 kW/K' den 7,62 kW/K'ye kadar değişmektedir. Sonuç olarak ise ölü hal sıcaklığı arttıkça entropi üretimi düşmektedir.

Ekonomik analizin sonuçları 40x40 YK çoklu nokta enjeksiyonu için Çizelge 9.21 ve tek nokta enjeksiyonu için Çizelge 9.22' de verilmiştir.

Çizelge 9.21 40x40 YK çoklu nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz

Aylar	0	1	2	3	4	5	6	7
Yatırım Maliyeti	-53200,00	0	0	0	0	0	0	0
Aya Göre Kazanç (Tüm Üretim 40x40 Yer Karosu Olduğu Kabulüyle)	0	23708,16	23708,16	23708,16	23708,16	23708,16	23708,16	23708,16
Bakım Ve Onarım Maliyetleri	0	200	200	200	200	200	200	200
İşçi Maliyeti	500	250	250	250	250	250	250	250
Elektroliz Maliyeti (Potasyum + Elektrik)	126	126	126	126	126	126	126	126
Masraf Akışı	-53826,00	23132	23132	23132	23132	23132	23132	23508
Faiz İndirimi	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327
Faiz İndiriminden Sonra Maliyet	-53826,00	22903,13	22676,37	22451,85	22229,55	22009,46	21791,54	21926,49
NPV		-30922,87	-8246,51	14205,34	36434,89	58444,35	80235,89	102162,37

Çizelge 9.22 40x40 YK tek nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz

Aylar	0	1	2	3	4	5	6	7
Yatırım Maliyeti	-53200,00	0	0	0	0	0	0	0
Aya Göre Kazanç (Tüm Üretim 40x40 Yer Karosu Olduğu Kabulüyle)	0	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28
Bakım Ve Onarım Maliyetleri	0	200	200	200	200	200	200	200
İşçi Maliyeti	500	250	250	250	250	250	250	250
Elektroliz Maliyeti (Potasyum + Elektrik)	126	126	126	126	126	126	126	126
Masraf Akışı	-53826,00	19745	19745	19745	19745	19745	19745	20121
Faiz İndirimi	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327
Faiz İndiriminden Sonra Maliyet	-53826,00	19549,78	19356,22	19164,57	18974,83	18786,96	18600,95	18767,48
NPV		-34276,22	-14920,00	4244,58	23219,40	42006,36	60607,31	79374,79

40x40 YK üretiminde hidrojensiz doğalgaz tüketimi 680 m³/h olup, bu üretim çoklu nokta hidrojen enjeksiyonu ile zenginleştirilen doğalgazla gerçekleştirildiğinde 624 m³/h doğalgaz tüketilmektedir. 56 m³/h'lik tasarruf 12,8 L/h hidrojen ile gerçekleştirilmektedir. Yine aynı şekilde, bu üretim tek nokta hidrojen enjeksiyonu ile zenginleştirilen doğalgazla gerçekleştirildiğinde 632 m³/h doğalgaz tüketilmektedir. 48 m³/h'lik tasarruf 13,8 L/h hidrojen ile gerçekleştirilmektedir.

25x40 DK ekonomik analizi çoklu nokta enjeksiyonu için Çizelge 9.23' te ve tek nokta enjeksiyonu için Çizelge 9.24' te verilmiştir.

Çizelge 9.23 25x40 DK çoklu nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz

Aylar	0	1	2	3	4	5	6	7
Yatırım maliyeti	-53200,00	0	0	0	0	0	0	0
Aya Göre Kazanç (Tüm Üretimin 25x40 Duvar Karosu Olduğu Kabulüyle)	0	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28	20321,28
Bakım Ve Onarım Maliyetleri	0	200	200	200	200	200	200	200
İşçi Maliyeti	500	250	250	250	250	250	250	250
Elektroliz Maliyeti	113	113	113	113	113	113	113	113
Masraf Akışı	-53813,00	19758	19758	19758	19758	19758	19758	20121
Faiz İndirimi	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327
Faiz İndiriminden Sonra Maliyet	-53813,00	19562,65	19368,96	19177,19	18987,32	18799,33	18613,19	18767,48
NPV		-34250,35	-14881,38	4295,81	23283,13	42082,45	60695,65	79463,13

Çizelge 9.24 25x40 DK tek nokta enjeksiyonu için ekonomik analiz

Aylar	0	1	2	3	4	5	6	7
Yatırım Maliyeti	-53200,00	0	0	0	0	0	0	0
Aya Göre Kazanç (Tüm Üretimin 25x40 Duvar Karosu Olduğu Kabulüyle)	0	11854,08	11854,08	11854,08	11854,08	11854,08	11854,08	11854,08
Bakım Ve Onarım Maliyetleri	0	200	200	200	200	200	200	200
İşçi Maliyeti	500	250	250	250	250	250	250	250
Elektroliz Maliyeti (Potasyum + Elektrik)	113	113	113	113	113	113	113	113
Masraf Akışı	-53813,00	11291	11291	11291	11291	11291	11291	11654
Faiz İndirimi	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327
Faiz İndiriminden Sonra Maliyet	-53813,00	11179,29	11068,60	10959,01	10850,51	10743,08	10636,71	10869,97
NPV		-42633,71	-31565,11	-20606,10	-9755,59	987,48	11624,19	22494,16

25x40 DK üretiminde ise hidrojeniz doğal gaz tüketimi $536 \text{ m}^3/\text{h}$ olup, bu üretim çoklu nokta hidrojen enjeksiyonu ile zenginleştirilen doğal gazla gerçekleştirildiğinde $488 \text{ m}^3/\text{h}$ doğal gaz tüketilmektedir. $48 \text{ m}^3/\text{h}$ 'lik tasarruf 9 L/h hidrojen ile sağlanmaktadır. Yine aynı şekilde bu üretim tek nokta enjeksiyonu ile zenginleştirilen doğal gazla gerçekleştirildiğinde $508 \text{ m}^3/\text{h}$ doğal gaz tüketilmektedir. $28 \text{ m}^3/\text{h}$ 'lik tasarruf $11,4 \text{ L/h}$ hidrojen ile sağlanmaktadır.

Sistem her iki üretim ve her iki enjeksiyon koşuluna göre NPV metoduyla değerlendirilmiş olup; hesaplamalarda eşitlik [7.18 ; 7.19] kullanılmıştır.

Piştirme prosesine entegre edilen hidrojenle zenginleştirme sistemi için söz konusu yatırım maliyeti yalnızca ekipman ve kurulum bedelini içermekte olup, bilgi ve fikri ürün bedelini içermemektedir.

1 Dolar = 1,52 TL olarak alınmış olup, 1 m^3 doğal gazın sanayi için maliyeti 0,588 TL, asgari ücret aylık 700 TL ve bir ay 30 gün kabul edilmiştir. Maliyet hesabında Türkiye şartlarında asgari ücret ile çalışan bir işçinin bu iş için günlük mesaisinin iki saatini (dörtte birini) harcadığı düşünülmektedir. Günlük elektroliz maliyeti olaraksa elektrolizde katalizör olarak kullanılan potasyum ve elektroliz için kullanılan elektrik maliyeti yaklaşık olarak 4,2 TL, aylık 126 TL'dir. Sistemin işletmeye aylık bakım maliyetleri ise 200 TL kabul edilmiştir. Faiz oranı %1 olarak alınmıştır.

Sonuç olarak hidrojen zenginleştirme sistemi kurulumunu takip eden üç ay gibi kısa bir sürede işletmeyi kara geçirmektedir. Bu süre üretime ve enjeksiyon sistemine göre değişmektedir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

10.1 Sonuçlar

Bu çalışmada hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz kullanan bir seramik fırınında bu zenginleştirmenin termodinamik ve ekonomik getirileri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları aşağıda listelenmiştir.

a) En yüksek enerji ve ekserji verim değerleri en düşük doğal gaz tüketiminde gerçekleşmiş olup bu tüketimdeki hidrojen debisi; 40x40 YK üretimi için çoklu nokta hidrojen enjeksiyon halinde 1,0752 kg/h, tek nokta hidrojen enjeksiyon halinde 1,1592 kg/h' dir.

b) 25x40 DK üretimleri için bu değer çoklu nokta enjeksiyonu halinde 0,756 kg/h, tek nokta hidrojen enjeksiyonu halinde ise 0,9576 kg/h olarak gerçekleşen optimum hidrojen akış hızlarında elde edilmiştir.

c) Optimum hidrojen debisinde gerçekleşen çoklu nokta hidrojen enjeksiyon halinde 40x40 YK üretimi için enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %63,13 ve %43,12, tek nokta hidrojen enjeksiyon halinde enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %62.63 ve %42,74 olarak bulunmuştur.

d) 25x40 DK üretiminde enerji ve ekserji verimi sırasıyla, çoklu nokta hidrojen enjeksiyon halinde %65,08 ve %41,72 tek nokta hidrojen enjeksiyon halinde %63,53 ve %40,55 şeklinde gerçekleşmiştir.

e) Bu hidrojen zenginleştirilmiş yanma sisteminin NPV yöntemi ile genel olarak tüm üretim yöntemleri ve enjeksiyon şartlarında ortalama üç ay gibi kısa bir geri ödeme süresine sahip olduğu bulunmuştur. Bu süre üretimlere göre değişiklik göstermektedir.

f) Alışlagelmiş doğalgaz yakma sistemlerine göre hidrojenle zenginleştirme sisteminin enerji ve ekserji veriminin yükselmesinde hatırı sayılır bir yere sahip olacağı gösterilmiştir.

g) Hidrojen zenginleştirme uygulaması enerji yoğun bir sektör olan seramik sektöründe kullanılan fırınlarda enerji tasarrufu ve enerji verimliliği için büyük bir potansiyele sahiptir.

h) 273,15 K ile 303,15 K arası değişen ölü hal sıcaklık kabullerinde, 40x40 YK için entropi üretimi çoklu nokta enjeksiyonu için 11,21 kW/K ile 9,20 kW/K ve tek nokta enjeksiyonu için 11,40 kW/K ile 9,34 kW/K arasında değişmektedir. Aynı şekilde 25x40 DK için entropi üretimi çoklu nokta enjeksiyonu için 8,82 kW/K ile 7,26 kW/K ve tek nokta enjeksiyonu için sırasıyla 9,28 kW/K ile 7,62 kW/K arasında değişmektedir.

i) Eğer sistem fabrika üretim planına göre yazılacak bir otomasyon programıyla entegre olursa işçi masrafı ortadan kalkacak ve yanlış oranlarda hidrojen ilavesinden kaynaklanan doğalgaz tüketimindeki artışın önüne geçilebilecektir.

Bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda, çoklu nokta hidrojen enjeksiyonu uygulamasının, tek nokta-ana hat hidrojen enjeksiyonuna göre daha fazla enerji tasarrufu sağladığı söylenebilir. Hidrojenin yayılma hızı doğalgazinkinden daha fazladır. Ana hat, diğer bir deyişle tek nokta hidrojen enjeksiyonu uygulamasında, yayılma hızı farklılığı nedeni ile enerji ve ekserji verim değerlerinin çoklu nokta uygulamasına göre daha düşük bir değerde olduğu bulunmuştur. Çoklu nokta uygulamasında ise istenilen homojen karışım elde edilebilmekte ve enerji-ekserji verimleri artırılabilir.

10.2 Öneriler

Mevcut yanma sistemlerine zenginleştirici olarak hidrojen ilavesi sonuçları göz önüne alındığında enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından dikkat çekicidir. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar dikkate alındığında;

a) Hidrojenle zenginleştirme uygulaması, seramik pişirme fırını kadar enerji tüketen masse hazırlama prosesinde "Spray Dryer" larda, ve yine kurutma prosesinde doğalgazla çalışan yatay ve dikey kurutucularda kullanılabilir ve bu proseslerde gerçekleştirilecek uygulamaların enerji-ekserji ve ekonomik analizleri gerçekleştirilebilir.

b) Doğalgazın zenginleştirilmesinde kullanılan hidrojenin elektroliz yerine yenilenebilir enerji kaynakları ile üretiminin sistem verimi ve maliyete olan etkileri araştırılabilir.

c) Hidrojen ilavesi üretim planı dahilinde çalışan otomasyon sistemiyle gerçekleştirilerek, üretilecek karoya uygun optimum hidrojen ve doğalgaz karışım debileri sağlanıp, buna yönelik termodinamik ve ekonomik incelemeler gerçekleştirilebilir.

d) Yüksek sıcaklıkta literatürde karşılaşılan yüksek oranda NO_x oluşumu [50; 51; 53; 55; 57; 62; 64] baca gazı emisyonları yaparak belirlenebilir. Baca gazı atık ısısının değerlendirildiği işletmede hidrojenle zenginleştirme uygulamasının baca gazı emisyonlarına ve atık ısı geri kazanım sisteminin çalışma verimine etkisinin araştırılması gelecek çalışmalara konu oluşturabilecektir.

e) H_2 ilavesi çok düşük oranlarda gerçekleştiği ve proseste elde edilen maksimum sıcaklık değişmediği için yakıt olarak sadece doğalgaz kullanıldığında gerçekleşen baca gazı emisyonlarının hidrojenle zenginleştirme sistemi için de aynı olduğu kabul edilmiş ve NO_x oluşumunda hidrojen enjeksiyonundan kaynaklanan bir artış olmadığı varsayılmıştır. Gelecek çalışmalarda prosesin yanma kinetiği ayrıca ele alınıp hidrojenle zenginleştirme sisteminin baca gazı emisyonlarına etkisi detaylı olarak incelenebilir.

Hidrojenle zenginleştirme sadece seramik sektöründe değil, diğer enerji yoğun sektörlerde de uygulanabilir. Bu çalışmanın araştırmacılara ve uygulayıcılara kendi sistemlerinin verimliliklerini arttırmada faydalı olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Türkiye Enerji Verimliliği Meclisi, 2010, "Türkiye enerji ve enerji verimliliği çalışma raporu yeşil ekonomiye geçiş", TEVEM.
2. Türkiye Odalar Ve Borsalar Birliği, 2011, "İnşaat malzemeleri sektör görünüm raporu", TOBB.
3. Türkiye Seramik Federasyonu, Türk Seramikleri, "Tarih".
http://www.serfed.com/tr/content.php?content_id=117 Erişim Tarihi: 08.2011
4. Uşak Seramik Sanayi A.Ş. , 2012, Faliyet Raporları, "2012 Faliyet Raporu".
<http://www.usakseramik.com/dosyalar/file/2012%2003%20Faaliyet%20Raporu.pdf> Erişim Tarihi 01.2012
5. Türkiye Seramik Federasyonu, Türk Seramikleri, "Teknoloji".
http://www.serfed.com/tr/content.php?content_id=119 Erişim Tarihi 08.2011
6. Kafalı, M.A., Mayıs 2005, "Sektörel Araştırmalar - Seramik Yer ve Duvar Kaplamaları", *Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş. Araştırma Müdürlüğü, Ankara.*
7. Türkiye Seramik Federasyonu, Türk Seramikleri, "Dünyadaki Konum".
http://www.serfed.com/tr/content.php?content_id=125 Erişim Tarihi 08.2011
8. Türkiye Seramik Federasyonu, Türk Seramikleri, "Katma Değer".
http://www.serfed.com/tr/content.php?content_id=123 Erişim Tarihi 11.2011
9. Pala, A., 2006, Ziraat Yatırım Menkul Değerler A.Ş. Araştırma Bölümü, "Sektör Analizi, Seramik Sektörü".
http://www.ziraatyatirim.com.tr/raporlar/Sektor_Analizleri/SERAMIK_01-12-06.pdf Erişim Tarihi 03.2011
10. Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2007, "Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013)".
http://www.serfed.com/content_files/0fda6_SKM%20DOKUZUNCU%20KALKINMA%20PLANI.pdf Erişim Tarihi 04.2011
11. Türkiye Seramik Federasyonu, Raporlar, "Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü Raporları".
http://www.serfed.com/content_files/35551_2004-2009_DUNYA_SKM_DATA_LARI.xls Erişim Tarihi : 04.2011
12. Dış Ticaret Müsteşarlığı, 2011, "Seramik Sektörü Notu 11.03.2011".
13. Gökalp, İ., Mayıs 2009, "Doğalgaz, Kömür, Temiz Yanma Teknolojileri ve Türkiye", *Günce*, Sayı 19.

14. Halter, F., Chauveau, C., Gökalp, I., 2007, "Characterization of the effects of hydrogen addition in premixed methane/air flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 2585-2592.
15. Yılmaz, B., Özdoğan, S., Gökalp, İ., 2008 "Contribution to the numerical analysis of turbulent lean premixed flames", *10. Uluslararası Yanma Sempozyumu*, Sakarya.
16. Altın, V., Ocak 2002 "Önümüzdeki 20 yıl", *Bilim Teknik Yeni Ufuklara Enerji, Ocak 2002*.
17. Çıracı, S., Özensoy, E., Durgun, E., Ekim 2006, "Hidrojenli gelecek", *Bilim Teknik, Ekim 2006*.
18. Hidrojen
<http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen> Erişim Tarihi : 09.2011
19. Özkar, S., Mayıs 2009, "Sürdürülebilir enerji geleceği ve küresel ısınma", *Günce*, Sayı 19.
20. Türe, İ.E., Mayıs 2009, "Sürdürülebilir kalkınma için hidrojen enerjisi", *Günce*, Sayı 19.
21. Özen, D. N., 2006, "Yoğuşmalı kombilerde hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımı ve ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
22. Aydemir, S., 1998, "Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 10-15.
23. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2008, "2007-2008 Türkiye Enerji Raporu".
24. Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu, "Obitet", Alternatif Yakıt Sistemleri.
http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/yakitlar_yaglar/Hidrojen.htm
Erişim Tarihi : 11.2011
25. Barbir, F., 2003, "Safety issues of hydrogen in vehicles", www.iahe.org
26. Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu, "Obitet", Hidrojen Enerjisi. .
http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/Hidrojen_Enerjisi.htm
Erişim Tarihi : 10.2011

27. Veziroğlu, T.N., 2003, "Hydrogen energy system: a permanent solution to global problems", www.iahe.org
28. Eral, M., 1998, "Enerji teknolojileri politikası çalışma grubu raporu" *Tubitak-TTGV Bilim-Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu*, Ankara.
29. Hidrojen Ekonomisi.
http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_ekonomisi Erişim Tarihi : 03.2011
30. Hidrojen Nasıl Elde Edilir.
<http://www.bilgiustam.com/hidrojen-nasil-elde-edilir/> Erişim Tarihi 04.2010
31. Tekin, A., 1992, Kimya, *Ekin*, Ankara, 1992.
32. Hidrojen Üretimi.
<http://scelik.tr.gg/Hidrojen--Ue-retimi.htm> Erişim Tarihi 02.2011
33. Dincer, I., 2002, "Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 265-285.
34. Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N., Akaryıldız, E., "Hidrojen Enerjisi Kullanımında Temel Kriterler", <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/72/4/>
35. Barbir, F., 2003, "Review of Hydrogen Conversion Technologies" www.iahe.org
36. Hidrojen Depolama.
http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_depolama Erişim Tarihi 06.2011
37. Hidrojen Depolama Teknolojileri, 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 117-143, Ankara.
38. Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N., Akaryıldız, E., 2002, "Hidrojen enerjisinin kullanımında temel kriterler", *Tesisat Mühendisliği*.
39. Hart, D., 1997, "Hydrogen power: the commercial future of the ultimate fuel", *Financial Times Energy Publishing*, London.
40. Amos, A.W., (1998), "Cost Of Storing And Transporting Hydrogen", *National Renewable*.
41. Huston, E.L., 1984, "Liquid and Solid Storage Of Hydrogen", *Proceedings Of The Fifth World Hydrogen Energy Conference, Energy Laboratory, Colorado.*, 15-20.

42. Altın, V., Ocak 2002, "Ve ufkun ötesi", *Bilim Teknik, Yeni Ufuklara - Enerji*, Ocak 2002.
43. Soruşbay, C., ve Arslan, E., 1988, "Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yanma performansı", *Mühendis Ve Makine Dergisi*, (29) , 339 , İstanbul.
44. Bohacik, T., Maria, S. D., Travbridge, C., Saman, W., "Combustion characteristic of electrolytically produced hydrogen-oxygen mixture", *SAE*, 971703.
45. Saravanan, N., Nagarajan, G., 2008, "An experimental investigation of hydrogen enriched air induction in a diesel engine system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 1769 – 1775.
46. Kim, H.S., Vaibhav, K. Arghode, M.B., Linck, A.K., Gupta, 2009, "Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 1054–1062.
47. Schefer R.W., Wicksall, D.M., Agrawal, A.K., 2002, "Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner", *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, 843–851.
48. Cammarota, F., Benedetto, A. Di V., Sarli, D., Salzano, E., Russo, G., 2009, "Combined effects of initial pressure and turbulence on explosions of hydrogen-enriched methane/air mixtures", *Journal of loss prevention in the process industries*, 22, 607–613.
49. Fanhua M., Yu W., Haiquan L., Yong L., Junjun W., Shuli Z., 2007, "Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 5067–5075.
50. Fanhua M., Mingyue W., Long J., Jiao D., Renzhe C., Nashay N., Shuli Z., 2010, "Performance and emission characteristics of a turbocharged spark-ignition hydrogen-enriched compressed natural gas engine under wide open throttle operating conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 12502-12509.
51. Fanhua M., Mingyue W., Long J., Renzhe C., Jiao D., Nashay N., Shuli Z., 2010, "Performance and emission characteristics of a turbo charged CNG engine fueled by hydrogen-enriched compressed natural gas with high hydrogen ratio", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 6438-6447.
52. Changwei J., and Shuofeng W., 2009, "Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 7823 – 7834.

53. Min, J., Haiyan M., Qi, J., Qian, H., and Zuohua H., 2009, "Flame propagation speed of CO₂ diluted hydrogen-enriched natural gas and air mixtures", *Energy Fuels* 2009, 23, 4957–4965.
54. Usta, G., 2010, "Hidrojen ve hidrojen - metan (hythane) karışımının içten yanmalı motorlarda kullanılması", Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
55. Yılmaz, İ., 2006, "Model bir yakıcıda hidrojen metan karışımının yanmasının sayısal ve deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
56. Murçak, A., Batmaz, İ., 2004, "Dizel motorlarda hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının motor performansına etkisinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 7 (2): 119-128.
57. Masood, M., İshat, M, M. and Reddy, A, S., 2007, "Computational combustion and emission analysis of hydrogen–diesel blends with experimental verification", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 2539–2547.
58. Pundir, B, P., and Kumar, R., 2007, "Combustion and smoke emission studies on a hydrogen fuel supplemented diesel engine", *SAE*, 2007-01-0055.
59. Saravanan N., and Nagarajan, G., 2008, "An experimental investigation of hydrogen- enriched air induction in a diesel engine system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (6): 1769-1775.
60. Mathur, H. B., Das, L, M., 1991, "Performance characteristics of hydrogen-fuelled SI engine using timed manifold injection", *International Journal of Hydrogen Energy*, 16 (2): 115-27.
61. Çeper, A.B., 2009, "Hidrojen - doğalgaz karışımlarının içten yanmalı motorlarda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
62. Kaplan, M., 2008, "Hidrojen metan kompozit yakıtlarda emisyon davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
63. Gül, K.E., 2006 "Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performans etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

64. Gökçek, M., 2008, "Metan ve metan - hidrojen karışımı yakıtların kullanıldığı gaz türbinlerinde yanmanın ve azot oksit oluşumunun modellenmesi", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
65. Özen, D.N., 2006, "Yoğuşmalı kombilerde hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımı ve ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
66. Saravanan, N., Dhanasekaran, C. and Kalaiselvan, K. M., 2007, "Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine" *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 32 (16): 4071-4080.
67. Erman, C., 2007, "Hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının dizel motora etkilerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
68. Tunçer, O., 2009, "Hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtının alev hızları ve emisyon değerlerinin kimyasal ve kinetik analizi", *17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sivas.
69. Şahin, Ö., 2009, "Biyodizel ile çalışan bir motora hidrojen ilave edilmesinin motor performansına ve emisyonlara etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
70. Apak, E., 2007, "Bir seramik fırınındaki enerji ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
71. Utlu, Z., Hepbasli, A., Turan, M., 2011, "Bir endüstriyel kurutucu fırının termodinamik analizi", *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 1929-1942.
72. Çengel, Y. A., Boles, A., 2008, "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik", Ali Pınarbaşı, *Güven Bilimsel*, İzmir, 423-486.
73. Bauer, C., Forest, T., 2001, "Effect of hydrogen addition on the performance of methane fueled vehicles. Part I: Effect on engine performance." *International Journal Of Hydrogen Energy*, 26, 55-70.
74. Andrea, T., 2004, "The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled spark ignition engine." *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 1541-1552.
75. Atalay, Ö., 2004, "Jeotermal tesislerin ekserji analizi: Kızıldere örneği", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
76. Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R., 1988, "Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes," Hemisphere, New York.

77. Szargut, J., 2005, "Exergy method technical and ecological applications", *WIT Press*.
78. Moran, M.J., 1982, "Availability analysis: A guide to efficiency energy use", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ.

EK

EK - Kuramsal Analiz Sayısal Çözümlenmeleri

Bu bölümde teze konu olan kuramsal analizlerin, çizelgelerde verilen sayısal sonuçlarına nasıl ulaşıldığı açıklanmıştır. Sistem termodinamiğin 1. ve 2. yasası ışığında değerlendirilmiştir. Örnek hesaplamalar 40x40 yer karosu çoklu nokta optimum hidrojen enjeksiyonu için gerçekleştirilmiş olup, izlenen yöntem diğer karo türü ve tek nokta hidrojen enjeksiyonu için de aynıdır. Ürün bazında değişen parametreler, fırına giren ve çıkan maddelerin kütleleri, debileri, giriş ve çıkış sıcaklıkları iken yakıt bazında değişen parametreler ise yakıtların debileri dolayısıyla karışım oranlarıdır.

Analizlerde kullanılan hidrojen ve doğalgaz debileri, elektrik, katalizör ve sistem maliyeti, sistemi geliştiren Mükerrerem ŞAHİN'den edinilmiştir.

İlk olarak hesaplarda kullanılmak üzere Çizelge 1'de fırına giren ve çıkan maddelerin kütleli analizi gerçekleştirilmiştir.

No :	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Sırlı Karo (YK-DK ya da TG)	298,15	10817	30,31
2	Doğalgaz (CH ₄)	298,15	447,41	1,25
3	Yakma Havası	298,15	10570,01	29,62
4	Soğutma Havası	298,15	10181,81	28,53
5	Hidrojen (H ₂)	298,15	1,0752	0,003
6	Sızıntı Hava	298,15	3668,30	10,28
		Toplam :	35686	100
No :	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Debi (kg/h)	Yüzde (%)
1	Seramik (YK-DK ya da TG)	443,15	10664	29,88
2	Su Buharı Baca Gazı	548,15	619,16	1,74
3	Yanma Baca Gazı	548,15	11012,27	30,86
4	Diğer Baca Gazları	548,15	13390,65	37,52
		Toplam :	35686	100

Çizelge 1 Fırına giren ve çıkan maddelerin kütleli analizi

40x40 yer karosu için 54 farklı hidrojen debisinde gerçekleşen doğalgaz tüketimi Çizelge 2'de verilmiştir.

Ölçüm No :	\dot{m} Doğalgaz (kg/h)	\dot{m} Hidrojen (kg/h)	Ölçüm No :	\dot{m} Doğalgaz (kg/h)	\dot{m} Hidrojen (kg/h)
1	487,56	0	28	503,33	0,5208
2	480,39	0	29	506,20	0,5376
3	485,41	0,084	30	494,73	0,5544
4	483,98	0,1008	31	496,16	0,5712
5	487,56	0,1176	32	494,01	0,588
6	488,28	0,1344	33	480,39	0,6216
7	491,86	0,1512	34	478,24	0,6552
8	494,01	0,168	35	476,81	0,672
9	494,73	0,1848	36	475,37	0,7056
10	496,16	0,2016	37	474,65	0,756
11	500,47	0,2184	38	471,79	0,7896
12	501,90	0,2352	39	468,20	0,84
13	502,62	0,252	40	464,62	0,8736
14	503,33	0,2688	41	460,31	0,9072
15	504,77	0,2856	42	458,88	0,924
16	506,20	0,3024	43	456,01	0,9576
17	509,07	0,3192	44	453,14	0,9912
18	510,50	0,336	45	451,71	1,008
19	507,64	0,3528	46	450,28	1,0416
20	510,50	0,3864	47	447,41	1,0752
21	511,94	0,4032	48	448,13	1,092
22	513,37	0,42	49	450,28	1,1256
23	514,81	0,4368	50	454,58	1,1592
24	516,24	0,4536	51	463,18	1,176
25	514,81	0,4704	52	488,99	1,26
26	513,37	0,4872	53	499,75	1,302
27	510,50	0,504	54	510,50	1,344

Çizelge 2 40x40 Yer karosu üretiminde farklı hidrojen debilerinde gerçekleşen doğalgaz tüketimi

Fırına giren maddelerin elementel ve kütleli analizleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

	Fırına Giren Maddeler	Elementler	Sıcaklık (K)	Dağılım (%)	Kütleli Debi (kg/h)
1	Sırlı Karo	SiO ₂	298,15	70,250	7598,943
		Al ₂ O ₃	298,15	17,880	1934,080
		Fe ₂ O ₃	298,15	0,560	60,575
		TiO ₂	298,15	0,490	53,003
		CaO	298,15	0,610	65,984
		MgO	298,15	0,620	67,065
		Na ₂ O	298,15	5,410	585,200
		K ₂ O	298,15	1,150	124,396
		Kızdırma Kayıpları	298,15	3,030	327,755
				Toplam :	10817,000
2	CH ₄	C	298,15	75	335,556
		H ₄	298,15	25	111,852
				Toplam :	447,408
3	H ₂	H	298,15	100	1,0752
				Toplam :	1,0752
4	Yakma Havası	N ₂	298,15	77,37	8178,020
		O ₂	298,15	20,76	2194,335
		CO ₂	298,15	0,03	3,171
		Ar	298,15	0,92	97,244
		H ₂ O	298,15	0,01	1,057
		Diğer	298,15	0,91	96,187
				Toplam :	10570,014
5	Sızıntı Hava	N ₂	298,15	77,37	2838,164
		O ₂	298,15	20,76	761,539
		CO ₂	298,15	0,03	1,100
		Ar	298,15	0,92	33,748
		H ₂ O	298,15	0,01	0,367
		Diğer	298,15	0,91	33,382
				Toplam :	3668,301
6	Soğutma Hava	N ₂	298,15	77,37	7877,665
		O ₂	298,15	20,76	2113,743
		CO ₂	298,15	0,03	3,055
		Ar	298,15	0,92	93,673
		H ₂ O	298,15	0,01	1,018
		Diğer	298,15	0,91	92,654
				Toplam :	10181,808

Çizelge 3 Fırına giren maddelerin elementel ve kütleli analizi

Fırından çıkan maddelerin elementel ve kütleli analizleri ise Çizelge 4'te sunulmuştur.

	Fırından Çıkan Maddeler	Elementler	Sıcaklık (K)	Dağılım (%)	Kütleli Debi (kg/h)
1	Seramik (YK - DK - Granit)	SiO ₂	443,15	72,445	7725,544
		Al ₂ O ₃	443,15	18,439	1966,302
		Fe ₂ O ₃	443,15	0,577	61,584
		TiO ₂	443,15	0,505	53,886
		CaO	443,15	0,629	67,083
		MgO	443,15	0,639	68,183
		Na ₂ O	443,15	5,579	594,949
		K ₂ O	443,15	1,186	126,468
				Toplam :	10664,000
2	Yanma Baca Gazı	CO ₂	548,15	1,560	171,791
		CO	548,15	0,005	0,551
		NO	548,15	0,020	2,202
		NO ₂	548,15	0,002	0,220
		O ₂	548,15	17,550	1932,654
		H ₂ O	548,15	3,120	343,583
		N ₂	548,15	77,743	8561,272
				Toplam :	11012,274
3	Karo Su Buharı	H ₂ O	548,15	100	619,164
				Toplam :	619,164
4	Diğer Baca Gazları	N ₂	548,15	77,370	10360,346
		O ₂	548,15	20,760	2779,899
		CO ₂	548,15	0,030	4,017
		Ar	548,15	0,920	123,194
		H ₂ O	548,15	0,010	1,339
		Diğer	548,15	0,910	121,855
				Toplam :	13390,650

Çizelge 4 Fırından çıkan maddelerin elementel ve kütleli analizleri

ENERJİ ANALİZİ

Fırın çalışma esnasında 359 kW/h elektrik enerjisi tüketmektedir. Bu değer hesaplamalarda ısıya dönüşen elektrik enerjisi olarak ele alınmıştır.

Fırın içine giren ve çıkan malzemeler için enerji oranı \dot{Q} , " \dot{m} " kütleli debi, " C_p " özgül ısı ve " ΔT " zaman olarak alındığında;

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$$

olarak bulunur.

Sisteme giren ve çıkan enerji arasındaki fark ısıya dönüşen enerji yani ısı kayıpları olarak karşımıza çıkmaktadır. Fırına giren maddelerin enerji değerleri Çizelge 5'te, çıkan maddelerin enerji değerleri ise Çizelge 6'da verilmiştir.

No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Yer Karosu	298,15	0,749	10817	2415591
2	Doğalgaz Yanma Isısı	298,15			16390568
3	Doğalgaz Duyulur Isısı	298,15	2,285	447,41	304807
4	Hidrojen Yanma Isısı	298,15			129024
5	Hidrojen Duyulur Isısı	298,15	14,89	1,0752	4773
6	Yakma Havası	298,15	1,006	10570,014	3170358
7	Soğutucu Hava	298,15	1,005	10181,808	3050885
8	Sızıntı Hava	298,15	1,006	3668,301	1100266
9	Isıya Dönüşen Elektrik Enerjisi				1292400
				Toplam	27858673

Çizelge 5 Fırına giren maddelerin enerji değerleri

No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	C _p (kJ/kgK)	Kütleli Debi (kg/h)	\dot{Q}_h (kJ/h)
1	Granit	443,15	0,771	10664	3643554,484
2	Baca Yanma Gazları	548,15	1,064	11012,27	6422706,185
3	Diğer Baca Gazları	548,15	1,025	13390,65	7523586,917
4	Isı Kayıpları				10268825

Çizelge 6 Fırından çıkan malzemelerin enerji değerleri

Proseste enerji verimi ise aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$\eta_I = (\dot{Q}_{out} / \dot{Q}_{in})$$

Seramik malzemeler için entropi ve entalpi farkı; “T₀” atmosfer sıcaklığı, “T₁” ısı transferi kaynak sıcaklığı olarak alındığında sırasıyla aşağıda verilen denklemlerle hesaplanabilir.

$$\Delta S = \dot{m} C_p \ln (T_1 - T_0)$$

$$\Delta h = \dot{m} C_p (T_1 - T_0)$$

EKSERJİ ANALİZİ

Fiziksel Ekserji

Farklı sıcaklık ve sabit basınç altında bir katı, sıvı ve gaz için;

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$$

Farklı sıcaklık ve farklı basınç altında gazlar için;

$$e_{ph} = (h - h_0) - T (s - s_0) + m T_0 R_x \ln(P/P_0)$$

Farklı sıcaklık ve basınç altındaki katı ve sıvılar için;

$$e_{ph} = ((h - h_0) - T_0(s - s_0)) + (mV (P - P_0))$$

Sabit sıcaklık ve farklı basınç altındaki gazlar için;

$$e_{ph} = mT_0R_x \ln(P/P_0)$$

Sabit sıcaklık ve farklı basınç altındaki katı ve sıvılar için;

$$e_{ph} = mV (P - P_0)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Buradaki h entalpi, s entropi, V , özgül hacim (m^3/kg), T_0 çevre sıcaklığı (K), P (bar) ve P_0 (bar) sırasıyla sistem ve çevre basınçlarıdır.

Isı transferi ile gerçekleşen ekserji " \dot{E}_x " ise şöyle ifade edilmektedir:

$$\dot{E}_x = \dot{Q} (1 - (T_1/T_0))$$

" T_0 " atmosfer sıcaklığını, " T_1 " ise ısı transferi kaynak sıcaklığını göstermektedir.

Kimyasal Ekserji

" R_u " universal gaz sabiti olup değeri 8,314 kJ/kmolK'dir. Herhangi bir malzeme için gaz sabiti ise " R_x " (kJ/kgK) olarak ele alındığında;

$$R_x = R_u/M$$

olarak bulunur. Burada M mol ağırlığı olup birimi kg/ kmol' dür.

Proses için gerçekleştirilmiş baca gazı analizleri ise Çizelge 7'de verilmiştir.

Elementler	Kütlesel Konsantrasyon (mg/m ³)	Mol Kesirleri (kmol/h)	Mol Kesri Dağılımı (%)	Mol Kesri /100	ln (x)
CO ₂		27,43812403	1,55501	0,0155501	4,163687
CO	384,93819	0,083547933	0,00473	0,0000473	9,957955
NO	1.195,72	0,24081463	0,01365	0,0001365	8,899348
NO ₂	320,4	0,041773966	0,00237	0,0000237	10,6511
O ₂		309,7416742	17,55412	0,1755412	1,739881
H ₂ O		55,04334393	3,11949	0,0311949	3,467499
N ₂		1371,906202	77,75062	0,7775062	0,251664
Toplam :		1764,49548	100,00		

Çizelge 7 Proses için baca gazı analizi

Referans madde türü r, prosese " T_0 " standart sıcaklığında ve " P_0 " standart basıncında girer, izotermal olarak genişler ve prosesten " T_0 " standart sıcaklığında ve referans çevre modelindeki $x_{or}P_{or}$ kısmi basıncı ile çıkar. Bu proseste kimyasal ekserji;

$$e_{ch}^0 = -R T_0 \ln (x_{or})$$

Kimyasal Element	Referans Türler				Elementin Standart Kimyasal Ekserjisi (kJ/mol)
	Kimyasal Formül	Kuru Havadaki Mol Kesri	Çevredeki Kısmi Basıncı (kPa)*	Standart Kimyasal Ekserji (kJ/mol)	
Ar	Ar	0,00933	0,906	11,69	11,69
C (Grafit)	CO ₂	0,000345	0,0335	19,87	410,26
D ₂	D ₂ O	-	0,000342	31,23	263,79
H ₂	H ₂ O	-	2,2	9,49	236,09
He	He	0,000005	0,000485	30,37	30,37
Kr	Kr	0,000001	0,000097	34,36	34,36
N ₂	N ₂	0,7803	75,78	0,72	0,72
Ne	Ne	0,000018	0,00177	27,19	27,19
O ₂	O ₂	0,2099	20,39	3,97	3,97
Xe	Xe	0,00000009	0,0000087	40,33	40,33
Atmosferik Azot **		0,7898	76,705	0,69	0,69

Gaz haldeki referans madde türlerinin kısmi basınçları ve kimyasal ekserji değerleri (T = 298,15 K P = 101,325 kPa Szargut vd., 1988)

Referans madde türlerinden oluşan bir gaz karışımının kimyasal ekserji hesabı, yine aynı temelde yapılır. Karışımdaki "r" gazı prosese "T₀" standart sıcaklıkta ve karışımdaki $x_r P_o$ " kısmi basıncında girer ve "T₀" standart sıcaklıkta ve referans çevre modelindeki $x_{or} P_o$ " kısmi basıncında çıkar. Bu durumda, referans madde türü olan gazlardan oluşan gaz karışımının kimyasal ekserji değeri, gazların kimyasal ekserji değerlerinin toplamı olur ve;

$$e_{ch} = \sum x_r e_{chr}^0 + R T_0 \sum x_r \ln x_r$$

denklemlerle elde edilir.

Katı maddeler için spesifik kimyasal ekserji ise ;

$$e_{ch}^0 = -R T_0 \ln x_{or}$$

olarak tanımlanır. Buradaki x_{or} ise referans maddenin mol kesridir.

Kimyasal Element	Litosfer Bileşenleri		Referans Madde Türleri			Elementin Standart Kimyasal Ekserjisi (kJ/mol)
	Formül	Kütle Kesri	Formül	Standart Mol Kesri	Standart Kimyasal Ekserji (kJ/mol)	
Al (k)	Al ₂ O ₃	0,152	Al ₂ SiO ₅	2,00.10 ^{-0,3}	15,4	888,4
Ba	BaO	5,10.10 ^{-0,3}				
Ca	CaO	5,10.10 ^{-0,2}				
Cl	Cl	4,5.10 ^{-0,4}				
Co (k)	Co	4,00.10 ^{-0,5}	Co ₃ O ₄	2,00.10 ^{-0,7}	38,2	265
Cr (k)	Cr ₂ O ₃	5,20.10 ^{-0,4}	Cr ₂ O ₃ (k)	4,00.10 ^{-0,7}	36,5	544,3
Fe (k)	FeO	3,72.10 ^{-0,2}	Fe ₂ O ₃ (k)	1,30.10 ^{-0,3}	16,5	376,4
	Fe ₂ O ₃	3,10.10 ^{-0,2}				
K	K ₂ O	3,11.10 ^{-0,2}				
Mg (k)	MgO	3,45.10 ^{-0,2}	CaCO ₃ , MgCO ₃	2,30.10 ^{-0,3}	15,1	633,8
Mn (k)	MnO	1,18.10 ^{-0,3}	MnO ₂	2,00.10 ^{-0,4}	21,1	482,3
Na	Na ₂ O	3,71.10 ^{-0,2}				
P (k)	P ₂ O ₅	2,85.10 ^{-0,3}	Ca(PO ₄) ₂	4,00.10 ^{-0,4}	19,4	875,8
S	SO ₃	2,60.10 ^{-0,4}				
Sb (k), 111	Sb	1,00.10 ^{-0,6}	Sb ₂ O ₅	7,00.10 ⁻¹⁰	52,3	435,8
Si (k)	SiO ₂	0,591	SiO ₂ (k)	4,72.10 ^{-0,1}	1,9	854,6
Sn (k)	Sn	4,00.10 ^{-0,5}	SnO ₂ (k)	8,00.10 ^{-0,6}	29,1	544,8
Ti (k), 11	TiO ₂	1,03.10 ^{-0,2}	TiO ₂ (k)	1,8.10 ^{-0,4}	21,4	906,9
U (k), 111	U	4,00.10 ^{-0,6}	UO ₃ (k)	2,00.10 ^{-0,8}	43,9	1190,7
V (k)	V ₂ O ₅	2,30.10 ^{-0,4}	V ₂ O ₃	2,00.10 ^{-0,6}	32,5	712,1

Yerkürenin üst yüzeyinde bulunan bileşenler, litosferdeki referans madde türleri ve standart kimyasal ekserji değerleri (Szargut vd., 1988)

Diğer Ekserjetik Parametreler

Sistemlerde tersinmezlik diğer bir deyişle ekserji yıkımı aşağıdaki gibi tarif edilebilir.

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}$$

Termal bir sistemin entropi üretimi ise ;

$$\dot{S}_{gen} = \dot{E}x_{dest}/T_0$$

şeklinde verilebilir.

Ekserji verimleri ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\eta_{II} = (\dot{E}x_{out}/\dot{E}x_{in})$$

EKONOMİK ANALİZ

NPV; " a " NPV faktörü, " B " kazanç, p periyot, C maliyet, i indirim oranı olarak alındığında aşağıdaki formüllere göre hesaplanır.

$$NPV = \sum_{i=1}^n (B - C)_i a_i$$

$$a = \frac{1}{(1+i)^p}$$

Pişirme prosesine entegre edilen hidrojenle zenginleştirme sistemi için söz konusu yatırım maliyeti yaklaşık 35000 dolar olup, 1 dolar 1,52 TL olarak işlem görmektedir. Türk lirası karşılığı 53200 TL yatırım maliyeti, yalnızca ekipman ve kurulum bedelini kapsamakta, bilgi ve fikri ürün bedelini içermemektedir. Bir ayın otuz gün olduğu kabulüyle; elektoliz için kullanılan elektrik ve katalizör bedeli günlük 4.2 TL, aylık 126 TL'dir. Kurulum yapılan ay 2, diğer aylarda bir işçi sistem için günlük mesaisinin 2 saatini sisteme ayırmaktadır. Bunun bedeli ise yaklaşık olarak aylık 250 TL kabul edilmiştir. 40x40 Yer karosu üretiminde optimum hidrojen debisinde saatte 56 m³ doğalgaz tasarrufu sağlanmaktadır. 1 m³ doğalgazın sanayi için maliyeti 0,588 TL olarak alınmıştır..

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYNA, Ozan Murat
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.07.1986 Afyon
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (536) 605 95 82
 Faks :
 e-mail : ozanayna@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Uşak Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	2012
Lisans	Uşak Üniversitesi/ Matematik Bölümü	2009
Lise	Kastamonu Mustafa Kaya Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2010	Makine Mühendisleri Odası Uşak İl Temsilciliği	Makine Mühendisi
2010-	Uşak Seramik Sanayi A.Ş	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce
 Almanca