



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA
TEZİ**

**YENİLENEBİLİR VE
SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROKSİ
GAZ(HHO) VE HİDROJEN (H₂)
ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ
AMONYAK YAKIT KARIŞIMININ
GAZ TÜRBİNLERİNDE DENEYSEL
KULLANIMI**

Raif KENANOĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ARALIK 2021





**YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROKSİ GAZ (HHO) VE
HİDROJEN (H₂) ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ AMONYAK YAKIT
KARIŞIMININ GAZ TÜRBİNLERİNDE DENEYSSEL KULLANIMI**

Raif KENANOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

Raif KENANOĞLU tarafından hazırlanan “YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROKSİ GAZ (HHO) VE HİDROJEN (H₂) ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ AMONYAK YAKIT KARIŞIMININ GAZ TÜRBİNLERİNDE DENEYSEL KULLANIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Kadir AYDIN

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Prof. Dr. Ali KOÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Doç. Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU

Metaller ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Doç. Dr. Hüseyin YAĞLI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 16/12/2021

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

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Raif KENANOĞLU

16/12/2021

YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROKSİ GAZ (HHO) VE HİDROJEN
(H₂) ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ AMONYAK YAKIT KARIŞIMININ GAZ
TÜRBİNLERİNDE DENEYSEL KULLANIMI

(Doktora Tezi)

Raif KENANOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Enerji, günümüzün ve geleceğimizin en önemli ihtiyacıdır ve hidrojen, temiz enerji çözümünün ve hatta temiz geleceğin anahtarıdır. Günümüzde, enerji üretim uygulamalarında (içten yanmalı motorlar ve yakıt hücreleri) hidrojen kullanımının önemli zorlukları, nakliye ve depolama olarak bilinmekte ve bunlar, uygulama güvenliği konusunda büyük bir tereddüt yaratmaktadır. Hidrojen uygulamalarındaki bu problemleri çözmek için en umut verici alternatif olan amonyak, düşük basınçlarda ve yüksek sıcaklıklarda sıvı halde depolama imkanı sağlar. Çalışmada amonyak üretim süreçlerinden detaylı olarak bahsedilmemekle birlikte güneş enerjisi kullanılarak elde edilen hidroksi gazın temiz üretimi anlatılmıştır. Bu çalışma, bir gaz türbininde ana yakıt olarak amonyak kullanmanın dezavantajlarının hidrojen ve hidroksi-gaz zenginleştirilmesi ile nasıl telafi edileceğini araştırmak için yapılmıştır. Deneyler sırasında, gaz türbininin standart çalışma yakıtı olan propan, saf amonyak ve 3 L / dak, 5 L / dak ve 7 L / dak hidroksi gazı ile zenginleştirilmiş sabit 10 L / dak amonyak yakıtı ve 3 L / dak, 5 L / dak ve 7 L / dak H₂ kullanıldı.

Deneylerde kullanılan gaz türbininde propan ile yapılan çalışmalarda elde edilen performans çıktıları H₂ ve HHO ile zenginleştirilmiş amonyak çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sırasında hacimce yakıt zenginleştirmeleri kategorilere ayrılmış ve daha sonra her yakıt zenginleştirme türü için ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Sonuçlar, hidroksi gas zenginleştirmelerinin performans verilerinde ve herhangi bir karbon emisyonunun olmaması nedeniyle emisyon değerlerinde iyileştirmelere neden olduğunu göstermektedir. Performans ve karbon emisyonlarındaki iyileştirmelerin yanı sıra önemli olan konu NO_x emisyonlarının kontrol altında tutulması gerektiğidir. Filtre kullanılmamasına rağmen literatürde bu NO_x ve yanmamış NH₃ emisyonlarının Seçici Katalizör İndirgeme (SCR) kullanılarak önlenebileceği bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Amonyak, HHO, Gaz türbin, Performans, Hidrojen

Sayfa Adedi : 91

Danışman : Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

EXPERIMENTAL USE OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE
HYDROXY GAS (HHO) AND HYDROGEN (H₂) ENHANCED
AMMONIA FUEL MIXTURE IN GAS TURBINES

(Ph. D. Thesis)

Raif KENANOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

December 2021

ABSTRACT

Energy is the most crucial need of our present and future, and hydrogen is the key to clean energy solution and even to the clean future. Today, the important challenges of utilization hydrogen in power-producing applications (internal combustion engines and fuel cells) are known as transportation and storage and these create a big hesitation regarding application safety. Ammonia, which is the most promising alternative to solve those problems of hydrogen applications, provides the possibility of storage in liquid form at low pressures and high temperatures. Although the ammonia production processes were not mentioned in detail in the study, the clean production of the hydroxy gas obtained by using solar energy was explained. This study was carried out to investigate how to compensate the drawbacks of using ammonia as the main fuel in a gas turbine by hydrogen and hydroxy-gas enrichment. During the experiments, propane that is standard working fuel of the gas turbine, neat ammonia, as well as a constant 10 L/min ammonia fuel enriched with 3 L/min, 5 L/min, and 7 L/min hydroxy gas and 3 L/min, 5 L/min, and 7 L/min H₂ were utilized.

The performance outputs obtained in the studies with propane in the gas turbine used in the experiments were compared with the ammonia outputs enriched with H₂ and HHO. During these comparisons, fuel enrichments by volume were categorized and then separate comparisons were made for each fuel enrichment type.

The results show that hydroxy gas enrichments lead to improvements in performance data and emission values due to the absence of any carbon emissions. Besides the improvements in performance and carbon emissions, the important issue is that NO_x emissions should be kept under control. Although no filter is used, it has been reported in the literature that these NO_x and unburned NH₃ emissions can be prevented by using Selective Catalyst Reduction (SCR).

Anahtar Kelimeler : Ammonia, HHO, Gas turbine, Performance, Hydrogen

Sayfa Adedi : 91

Danışman : Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında, büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle yanımda olan ve gerçekleştirilen çalışmalarda başta bilimsel olmak üzere maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, tez çalışmamın temelini oluşturan deney cihazlarının alınmasında önemli rolü olan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU'na en derin saygılarımla teşekkür ederim. Aynı zamanda bu tez konusunun belirlenmesinde önemli ve yenilikçi fikirleriyle yolumuzu aydınlatan, tecrübesine çalışkanlığına ve dinamikliğine her zaman saygı duyduğum, bilimsel, maddi ve manevi her ihtiyacımda yanımda olan Prof. Dr. Kadir AYDIN'a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince engin bilgi ve tecrübeleriyle çalışma boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda bana yardımcı olan, her tez izleme komitesinde çalışmada bulunan eksikleri görmemde bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Ali KOÇ'a çalışmamın temelini oluşturan ekipmanların temininde, çalışmalarımın planlanmasında ve sonuçlandırılmasında bilimsel desteklerini esirgemeyerek değerli zamanını tez çalışmamın sorunsuz devam etmesi için harcayan, paylaştığı kıymetli bilgiler ile yoluma devam etmemi sağlayan Doç. Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU'na ve tez savunma jürimde yer alan bütün hocalarıma,

Çalışmam boyunca gerek iş hayatımda gerekse kişisel yaşamımda doğrudan veya dolaylı olarak manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan hocalarım ve Makine Mühendisliği Bölümü mesai arkadaşlarıma,

Bu tez çalışmasının ana ögesi olan, deneyler süresince ana yakıt olarak kullanılan amonyak tedarikinde bana destek olan, deneysel çıktılar ile yakından alakadar olan AMON KİMYA A.Ş. Yönetim Kurulu Başkan yardımcısı Necmettin ÖZSÜREN'e

Hayatımın her aşamasında bana destek olan, evlatları olmaktan gurur duyduğum kıymetli anne ve babam, Yasemin KENANOĞLU ve Mehmet R. KENANOĞLU'na,

Son olarak hayatımın her anında hem kardeş hem de dost olan sevgili ablam Melike S. KÖSE ve kardeşim Mustafa E. KENANOĞLU'na, ayrıca her sabah güler yüzleriyle beni motive eden yeğenlerim Defne ve Eylül'e ve çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen Selin AKIN'a; sonsuz teşekkürlerimi sunar ve bu çalışmamı kendilerine ithaf etmekten onur ve gurur duyduğumu belirtirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	9
2.1. Alternatif Enerji Kaynakları	9
2.2. Hidroksi (HHO) Gaz Üretimi ve Kullanımı	14
2.3. Amonyak Üretimi ve Kullanımı	20
2.4. Gaz Türbinleri	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	31
3.1. Güneş Enerjisi Fotovoltaik (PV) Güç Üretimi	31
3.2. Hidroksi (HHO) gaz jeneratörü	39
3.3. Gaz Türbini	42
3.3.1. Kompresör	45
3.3.2. Yanma Odası	46
3.3.3. Türbin	48
3.3.4. Kontrol ve ateşleme ünitesi	49
3.3.5. Elektrik jeneratörü	49
3.3.6. Termodinamik Analiz	51
3.4. Yakıtlar ve Yakıt karışımları	52
3.4.1. Propan	52
3.4.2. Amonyak	53
3.4.3. Hidrojen (H ₂) ve Hidroksi Gaz (HHO)	55
3.4.4. Yakıt Karışımları	56
3.5. Gaz Analizörü	56
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	59
4.1. NH ₃ +3HHO ve NH ₃ +3H ₂ Kıyaslaması	60
4.2. NH ₃ +5HHO ve NH ₃ +5H ₂ Kıyaslaması	64
4.3. NH ₃ +7HHO ve NH ₃ +7H ₂ Kıyaslaması	67
4.4. NH ₃ +H ₂ Kıyaslaması	72
4.5. NH ₃ +HHO Yakıt Karışımları Karşılaştırmaları	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	84

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Güneş Paneli Özellikleri.....	39
Çizelge 3.2. HHO gaz üretim sistemi elemanları ve teknik özellikleri	41
Çizelge 3.3. Gaz türbini elemanları ve yardımcı cihazların teknik özellikleri.....	44
Çizelge 3.4. Gaz Türbinleri avantajları ve Dezavantajları.....	50
Çizelge 3.5. Propan Fiziksel Özellikleri.....	53
Çizelge 3.6. Amonyak fiziksel özellikleri	54
Çizelge 3.7. Hidrojenin fiziksel özellikleri	55
Çizelge 3.8. Yakıt karışım oranları	56
Çizelge 3.9. Gaz analizörünün teknik özellikleri.....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dünya genelinde 1990-2018 yılları arasında kaynaklara göre elektrik üretimi .	2
Şekil 1.2. 2000-2019 ve 2019-2040 yılları arasında belirtilen teknoloji ve senaryoya göre küresel elektrik üretimindeki değişim	3
Şekil 1.3. Üretim kaynağına göre hidrojen üretim maliyetleri	5
Şekil 3.1. Güneş enerjisi fotovoltaik (PV) panel güç üretim ve dağıtım şeması	32
Şekil 3.2. Fotovoltaik güç potansiyelinin uzun vadeli ortalaması	33
Şekil 3.3. Fotovoltaik güç potansiyelinin uzun vadeli ortalaması	34
Şekil 3.4. Fotovoltaik Güneş enerjisi panelleri.....	38
Şekil 3.4. Fotovoltaik Güneş enerjisi panelleri ve akü bağlantı şeması.....	39
Şekil 3.5. Elektrolitlere göre Hidroksi (HHO) gaz üretimi	40
Şekil 3.6. Hidroksi (HHO) gaz üretim ve bağlantı şeması.....	41
Şekil 3.7. Gaz tübini test düzeneği.....	43
Şekil 3.8. Açık gaz türbini çevrimi şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.9. Testo 350 Gaz analizörü ve probu	57
Şekil 4.1. NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 Devir Hızı- Güç grafiği	61
Şekil 4.2. NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 Devir Hızı- Termal verimlilik grafiği	62
Şekil 4.3. NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği.....	63
Şekil 4.4. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Devir Hızı-Güç grafiği	65
Şekil 4.5. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Devir Hızı- Termal Verimlilik grafiği.....	66
Şekil 4.6. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği.....	67
Şekil 4.7. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Devir Hızı- Güç grafiği	69
Şekil 4.8. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Devir Hızı- Termal Verimlilik grafiği.....	70
Şekil 4.9. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği.....	71
Şekil 4.10. NH_3+H_2 Yakıt Karışımları Devir Hızı- Güç grafiği	72
Şekil 4.11. NH_3+H_2 Yakıt Karışımları Devir Hızı – Termal Verimlilik	73
Şekil 4.12. NH_3+H_2 Yakıt Karışımları Devir Hızı- NO_x grafiği.....	74
Şekil 4.13. NH_3+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – Güç grafiği	76
Şekil 4.14. NH_3+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği.....	77
Şekil 4.15. NH_3+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – NO_x grafiği.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler**Açıklamalar**

\dot{Q}	Isı Miktarı
\dot{W}	İş Miktarı
\dot{m}	Birim zamanda kütle akışı
A	Amper
C	Karbon
cc	Kübik santimetre
CH ₄	Metan
Cl	Klor
cm ²	Santimetrekaire
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
c _p	Özgül Isı
CuCl	Bakır Klorür
d/d	Devir Dakika
dak	Dakika
E	Potansiyel Fark
Fe	Demir
FeMo	Ferro Molibden
G _{on}	Güneş Işınımı
gr	Gram
GWh	Gigavat-saat
h	Entalpi
H ₀	Aylık Ortalama Atmosfer Dışı Işınım Miktarı
H ₂	Hidrojen
HC	Hidrokarbon
HHO	Hidroksi Gaz
HNO	Nitroksil

Simgeler	Açıklamalar
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogram
km	Kilometre
KOH	Potasyum hidroksit
k _T	Işın demeti Şiddeti Oranı
kton	kilo-ton
kW	Kilovat
kWh	Kilovat-saat
kWp	Kilovat-pik
L	Litre
m	Metre
mA	Mili amper
MJ	Mega-joule
MW	Megavat
NaOH	Sodyum hidroksit
NH ₂	Amin
NH ₃	Amonyak
NO	Azotmonooksit
NO _x	Azotoksit
Ø	Enlem Açısı
O ₂	Oksijen
°C	Santigrat derece
OH	Hidroksil
ohm	Direnç
P	Basınç
s	Saniye
sL	Standart Litre
T	Sıcaklık
TWh	Teravat-saat
V	Volt
W	Vat

Simgeler**Açıklamalar**

β	Eğim Açısı
γ	Yüzey Azimut Açısı
δ	Deklinasyon Açısı
θ	Zenit Açısı
ω	Saat Açısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
AIST	İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji
BTE	Fren Termal Verimlilik
CI	Sıkıştırılmalı Ateşlemeli
CNG	Sıkıştırılmış Doğalgaz
DC	Doğru akım
ECU	Motor kontrol ünitesi
EGR	Egzoz Gazı Devridaimi
EMCS	Enerji Yönetimi ve Kontrol Sistemi
EPT	Enerji Geri Ödeme Süresi
ESMAP	Enerji Sektörü Yönetim Yardımı Programı
FRM	Bulanık regresyon Modeli
FSCPP	Yüzer Güneş Bacası Santrali
GT	Gaz Türbini
HEG	Hibrit Enerji Şebekeleri
HRSG	Isı Geri Kazanımlı Buhar Jeneratörü
HTE	Yüksek Sıcaklık Elektrolizörü
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
MARR	Minimum Cazip Getiri Oranı
MGT	Mikro Gaz Türbini
NMC	Nikel Manganez Kobalt Oksit
ODE	Birinci Derece Diferansiyel Denklem
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı
PEM	Polimer Elektrolit Membran

Kısaltmalar**Açıklamalar**

PEMFC	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik-termal
RFC	Rejeneratif Yakıt Hücresi
RTE	Gidiş-Dönüş Verimliliği
SGT	Solar Gaz Türbini
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücresi
TIT	Türbin Giriş Sıcaklığı
VIKOR	Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü
VLS-PV	Çok büyük ölçekli Fotovoltaik

1. GİRİŞ

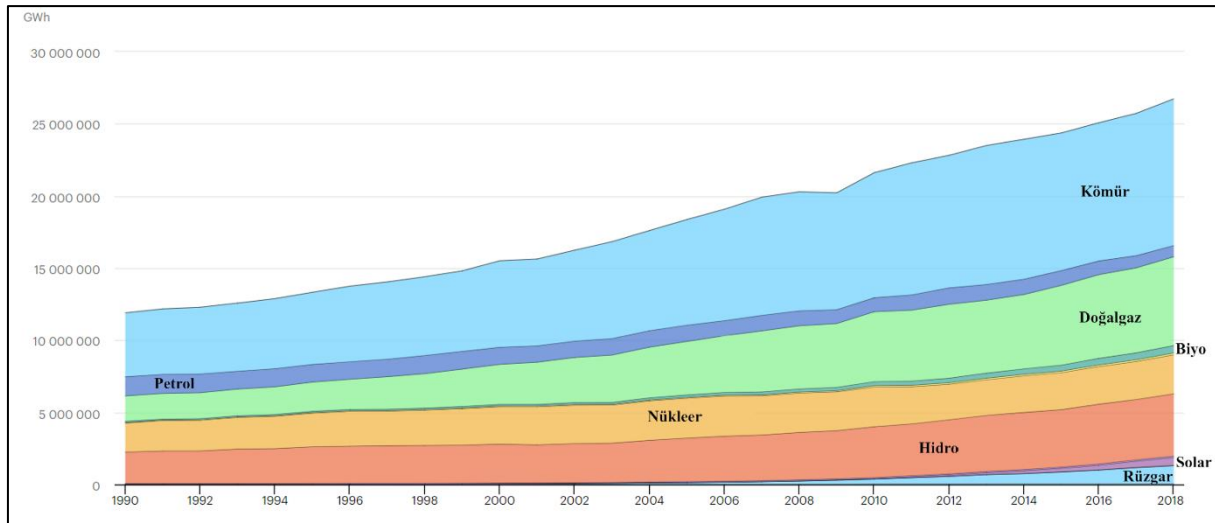
Artan dünya nüfusu ve gün geçtikçe hızlanan teknolojik gelişmeler ile birlikte günümüzde enerji tüketimi süratle artmaya devam etmektedir. Enerji talebindeki bu artış genellikle fosil yakıt temelli güç üretim sistemlerinden karşılanmaya çalışılmaktadır. Bu durum azalan fosil yakıt rezervlerinin daha fazla değerlendirilmesi ve fosil yakıt fiyatlarının artmasında sebep olmaktadır. Fosil yakıt kullanımının en önemli sorunlarının başında emisyonlar gelmektedir. Enerji elde edilmesinde fosil yakıtların yoğun kullanımı çevreye ve insan sağlığına önemli ölçüde zarar verir. Bunlar başta küresel ısınma ve iklim değişikliği olmak üzere hava kirliliği, deniz suyu sıcaklığının yükselmesi, asit yağmurları ve solunum yolu hastalıklarıdır.

Enerji, içinde bulunduğumuz teknoloji çağında doğrudan bir para birimi olarak adlandırılabilir. Özellikle bir bölgenin 24 saat elektriği kesildiğinde yaşanılacak kaos göz önünde bulundurulduğunda, hayatımızı kolaylaştıran cihazları kullanmamıza yarayan elektrik enerjisinin önemini rahatlıkla kavramak mümkün olacaktır (Dincer I, 2000). Bu sebeple ülkelerin kalkınmasında en kilit rolü enerji kaynakları oynamaktadır. Yeraltı enerji kaynaklarına sahip olan ülkelerin refah seviyeleri yüksek, enerjiyi ithal eden ve enerji kaynakları bulunmayan ülkelerin refah seviyelerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat son yıllarda bu durum yeni bir enerji kaynağı sayesinde değişmeye başlamıştır. Yeraltı fosil yakıt kaynaklarının yaşadığımız dünyayı son derece olumsuz etkilemesi göz önünde bulundurulduğunda, çevreci ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynakları kritik önem kazanmaya başlamıştır (Bilgen S.ve diğ, 2008).

Alternatif enerji kaynakları, çevreyi olumsuz etkileyen ve insan sağlığına zarar veren fosil yakıtlar dışında kullanılacak yenilenebilir enerji kaynakları olarak bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal olarak yenilenen fakat enerji akışı kesintili olan kaynaklardan gelen enerji çeşididir. Yani bu kaynaklar tükenmeyen kaynaklar olmasına karşın, enerji sağlayabildikleri zaman başına mevcut olan enerji ile sınırlıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgâr, güneş, biyoenerji, jeotermal ve hidro-enerji olmak üzere 5 (beş) ana başlıkta toplanmaktadır (Jenniches, S., 2018).

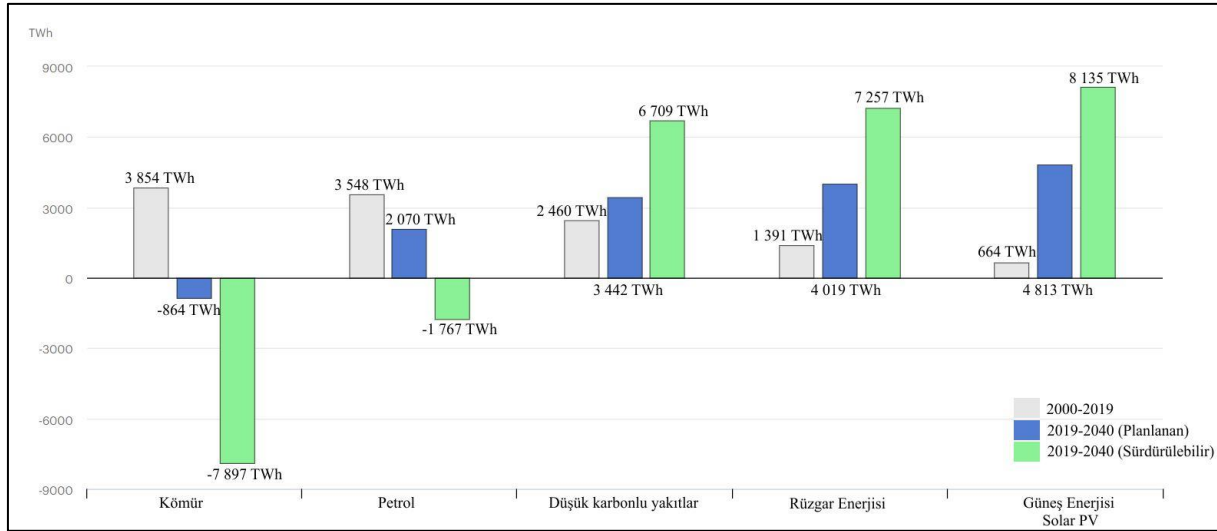
Bütün dünyada artan enerji arzını karşılayan geleneksel enerji üretimi yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda özellikle fosil yakıtlara kıyasla 2006 yılından sonra alternatif

enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payı oldukça artmıştır. Uluslararası Enerji Ajansının yayınladığı son verilere göre 1990 yılında toplam enerji üretiminin 11 897 198 GWh iken 2018 yılında toplam enerji üretiminin 26 730 065 GWh olduğu raporlanmıştır. Şekil 1’de görüldüğü üzere, düşük karbonlu doğalgaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimi içindeki payı son yıllarda artış göstermekte ve fosil yakıt bazlı üretimin yüzdesel olarak gün geçtikçe gerilediği görülmektedir (IEA, 2019).



Şekil 1.1. Dünya genelinde 1990-2018 yılları arasında kaynaklara göre elektrik üretimi (IEA, 2019)

Bu gelişmeler ile birlikte ülkelerin ortaklaşa hazırladıkları yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş stratejileri ve senaryoları bulunmaktadır. Dünya genelinde üretilen elektrik enerjisi kaynaklar göz önünde bulundurulduğunda 2000-2019 gerçekleşen ve 2019-2040 yılları arasında öngörülen kaynak tüketim miktarları değişimleri raporlanmaktadır. Bu rapora göre enerji kullanımında kömür ve gaz yakıtların tüketiminin azaltılması ve yerine düşük karbonlu yakıtların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması planlanmaktadır. Şekil 1.2’de Uluslararası Enerji Ajansının günümüzde elektrik üretimi teknolojileri ve senaryolarına göre küresel elektrik üretimindeki değişimi yer almaktadır (IEA, 2020).



Şekil 1.2. 2000-2019 ve 2019-2040 yılları arasında belirtilen teknoloji ve senaryoya göre küresel elektrik üretimindeki değişim (IEA, 2020)

Yenilenebilir enerji kaynakları geçmiş dönemlerde yüksek maliyete sahip oldukları için büyük hacimli tesisler kurularak yatırım maliyetinin geri dönüş süresi kısaltılmaya çalışılmıştır. Fakat son yıllarda gelişen teknoloji ve rekabete sebep olan üretim hacminin artışı ile birlikte ilk yatırım fiyatları dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi maliyetleri düşmekte ve küçük ölçekli enerji üretimi yaygınlaşmaktadır. Günümüzde özellikle Kyoto protokolü ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği çerçeve antlaşması gibi sözleşmeler göz önünde bulundurularak, güneş ve rüzgâr enerjisine bağlı elektrik üretiminin arttığı görülmektedir. Bu durum karbon emisyonlarını azaltmaya sebep olurken iklim değişikliği üzerinde olumlu sonuçlara sebep olurken, karşımıza yeni bir problem çıkarmaktadır, enerji depolama.

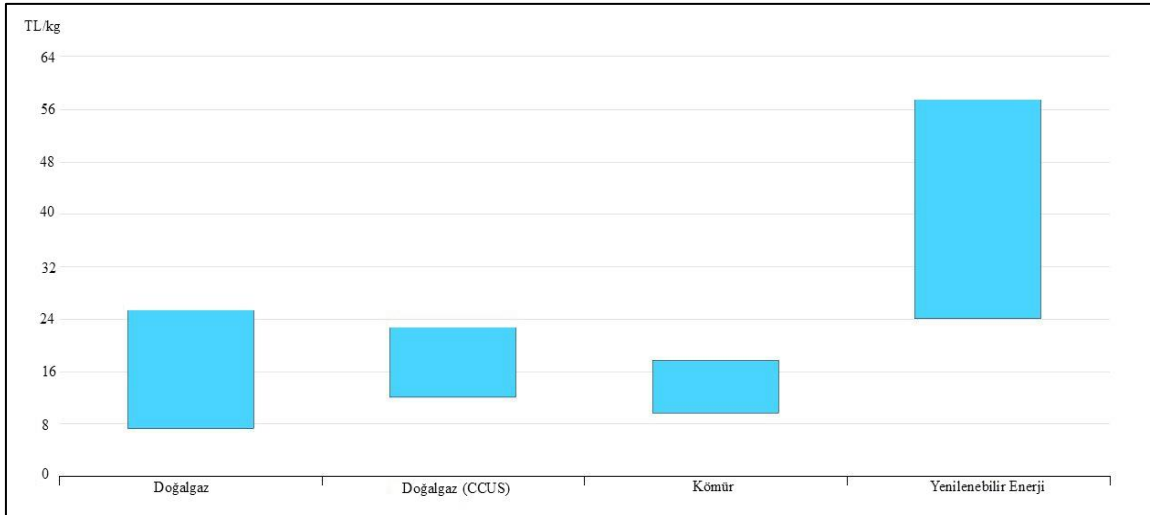
Enerji yapısı itibariyle tamamıyla depolanamayan ve depolanma sırasında son derece önemli kayıplara uğrayan olan bir niceliktir. Büyük güç santrallerinde belirli zaman aralıklarında kullanılmayan enerji ya depolanır ya da şebekeye doğrudan gönderilerek iletimi sağlanır. Bu iletim sırasında da kayıplara uğramaktadır. Bu durumun ortadan kaldırılması ve üretilen enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi için farklı bir forma dönüştürülerek depolanmasının daha verimli olduğu yapılan araştırmalar sonucu açıkça görülmektedir (Zhang, W., 2018).

Dünya genelinde elektrik enerjisi üretiminde gaz türbinlerinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Küresel endüstriyel gaz türbini pazar büyüklüğü 2019 yılında 10,45 milyar dolar olarak hesaplanmış ve 2027 yılına kadar 10,70 milyar dolar yatırıma ulaşacağı

tahmin edilmektedir. Gaz türbinlerinin havacılık ve elektrik santralleri olmak üzere iki temel kullanım alanı vardır. Elektrik üretimi sırasında kullanılan gaz türbinlerinin yaklaşık %75'inde doğal gaz kullanılmaktadır. Kullanılan yakıtlar fosil kaynaklı olması egzoz emisyonları ile ilgili endişe uyandırmakta ve küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi geleceğimizi önemli ölçüde tehdit eden problemlerin hızlanmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple tüm içten yanmalı motorlarda olduğu gibi gaz türbinlerinde de alternatif yakıtlara yönelim artmıştır.

Alternatif yakıtlar arasında en umut verici yakıt olarak bilinen hidrojen, son yıllarda gaz türbinlerinde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Hidrojen doğada bileşik halinde bulunan en yaygın element olma özelliği ve diğer alternatif yakıtlara kıyasla bir takım üstün özellikleri göz önünde bulundurulduğunda geleceğin yakıtı olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok araştırmacı hidrojen eldesinin çeşitli yöntemleri üzerinde çalışırken, bir diğer grup araştırmacılar da günlük hayata hidrojen enerjisinin entegrasyonu ve enerji üretim yöntemleri üzerine çalışmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı fosil yakıtların sera gazı etkilerini azaltmak ve temiz enerji elde etmek olarak görülmektedir.

Hidrojen, kullanılabilir enerjii depolamak için veya iletmek için kullanılabilir. Ancak doğada tek başına mevcut olmadığı için, bileşiminde hidrojen içeren çeşitli yerel kaynaklar kullanılarak üretilmelidir. Şu anda hidrojenin çoğu fosil yakıtlardan, özellikle de doğal gazdan üretilmektedir. Doğrudan şebekeden veya biyokütle, jeotermal, güneş veya rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan gelen elektrik de hidrojen üretmek için kullanılmaktadır. Fakat, uzun vadede, güneş enerjisi ve biyokütle gibi yeni teknolojilerle birlikte alternatif üretim yöntemleri maliyet açısından hidrojen üretimini rekabetçi hale getirdiğinden, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretmek doğrudan tercih edilen bir üretim yöntemi olacaktır. Şekil 1.3'te Uluslararası Enerji Ajansının yayınladığı rapora göre farklı yöntemlerle ve farklı kaynaklardan elde edilen hidrojenin kilogram başına üretim maliyeti gösterilmektedir (IEA, 2018).



Şekil 1.3. Üretim kaynağına göre hidrojen üretim maliyetleri (IEA, 2018)

Hidrojen günümüzün en önemli taşıyıcısı olmakla birlikte, ikincil bir enerji kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Enerji taşıyıcıları, herhangi bir kaynaktan elde edilen enerjiyi kolayca kullanılmak üzere taşıma, depolama ve iletme imkânı sunarlar. Günümüzün ve geleceğin en önemli enerji taşıyıcısı da hidrojen ve hidrojen temelli bileşiklerdir. Elektroliz işlemi ile hidrojen üretimi yüksek enerji tüketimi ve kullanılan elektrik enerjisini üretmek için kullanılan kaynaklar nedeniyle oldukça pahalıdır. Son yıllarda güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da yararlanılabilmesine rağmen elektroliz işlemi sırasında elde edilen enerji petrol, doğal gaz veya kömür gibi fosil yakıt kaynakları kullanılarak üretilmektedir.

Hidrojen gazı her ne kadar temiz ve yüksek enerjiye sahip bir enerji taşıyıcısı olsa da moleküler halde bazı dezavantajlara sahiptir. En önemli dezavantajlarından biri depolamadır. Hidrojen gazı bilinen en küçük element olması sebebi ile tutulması zor ve sızdırmazlığının tamamen sağlanması neredeyse imkânsızdır. Bununla birlikte çok düşük sıcaklık ve yüksek basınçlarda sıvı halde depolanabilmektedir. Fakat bu tankların üretimi ve tekrar kullanımının maliyeti de oldukça yüksektir. Bir diğer önemli dezavantajlarından biri de güvenlidir. Hidrojen renksiz ve kokusuz olduğu için uygun sensörler olmadan tespit edilmesi zordur ve yüksek yayılım hızına sahip olması sebebi ile kullanımı sırasında son derece dikkatli olmak gerekir. Ayrıca enerji yoğunluğu düşüklüğünden dolayı hidrojenin taşınması verimsizdir. Boru hatları, hidrojenin borularda kullanılan metalle etkileşiminin yanı sıra taşınma esnasında karşılaşılabilecek farklı moleküllerle reaksiyona girme eğiliminden dolayı etkisiz kalmaktadır ve genellikle taşıma sonunda hedefe ulaştığında ise hidrojen saflığının son derece düşmesi ile sonuçlanır.

Bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda özellikle büyük ölçekli enerji üretimi için hidrojen kullanımının en verimli iki yolu vardır. Bunlardan birincisi elektroliz yolu ile elde edilen hidroksi (HHO) gazıdır. Elektroliz yolu ile elde edilen HHO gazının şebeke elektriği kullanarak üretilmesi karbon emisyonlarını tamamen yok etmeyi amaçlayan hidrojen enerjisi kullanımını az da olsa olumsuz etkilemektedir. Çünkü şebekelerden kullandığımız elektrik enerjisinin çoğu hidrokarbon yakıtı ile çalışan santrallerden elde edilmektedir. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ön planda tutulmalıdır. Güneş ve rüzgar enerjisi hidroksi gaz üretimi için ideal sürdürülebilir enerji kaynakları olarak görülmektedir. Böylelikle karbon içermeyen enerji döngüsü tamamlanmış olacaktır. Elektroliz yolu ile saf suyun içinde çeşitli elektrolitlerin belirli bir oranda çözünmesi sonucu oluşan karışıma yüksek akım verilerek elde edilen hidroksi gazının kullanılmasının çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanmıştır (Baltacıoğlu, M. K., Kenanoğlu, R. ve Aydın, K. 2019);

- Kolay kurulum ve pahalı bakım gerektirmez,
- Daha verimli yanma sağlayan % 33 oksijen içeriğine sahiptir,
- Hidroksi gazı depolamaya gerek kalmadan kullanılabilen teknik olarak kanıtlanmıştır,
- Yakıtların yanma verimini artırarak egzoz emisyonlarını azaltır ve performans oranlarını iyileştirir.

Hidrojen kullanımının depolanması ve özellikle iletimi konusunda bir başka temiz ve efektif çözüm de amonyaktır. Amonyak hidrojen gibi hidrokarbon bileşiklerden, organik atıklardan ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilir. Amonyak özellikle büyük ölçekli enerji üretimi göz önünde bulundurulduğunda oldukça avantajlı bir konumdadır. Hidrojenin çok yüksek basınçlarda çok düşük sıcaklıklarda saklanması için gereken maliyet, amonyak depolaması ile kıyaslandığında yaklaşık on kat daha fazladır. Bu durum hem enerji üretim maliyeti hem de enerji güvenliği bakımından oldukça önemlidir. Bununla birlikte ülkelerin kalkınmasında önemli rol oynayan enerji ihracatında da geleceğin en önemli ve en kilit enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir.

Amonyak (NH_3) hidrojeni bünyesinde bileşik halinde bulundurmasına rağmen, enerji yoğunluğu saf hidrojenin hem sıvı hem de gaz fazında sahip olduğu yoğunluktan fazladır. Bu da bir metreküp (m^3) NH_3 ün aynı hacimdeki hidrojeninden daha fazla enerjiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Aynı zamanda depolama ve enerji yoğunluğu birlikte ele

alındığında saf hidrojene kıyasla büyük ölçekli enerji üretiminde kullanılması bakımından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Nitekim 20 °C ve 8,6 barda 1 m³ sıvı amonyak içerisinde 108 kg H₂ depolanmaktadır (Nozari ve Karabeyoğlu, 2015). NH₃'ün hidrojen yoğunluğu, hidrojen taşıyıcı olarak bilinen en gelişmiş metal hidritlerin içerdiği hidrojen yoğunluğundan 4 kat daha fazladır (Schlapbach ve Züttel, 2011). Ayrıca amonyağın depolanan enerji hacminin maliyeti, sıvı hidrojenden yaklaşık üç kat daha ucuzdur.

Genel olarak içten yanmalı motorlar için amonyak kullanılması yeni bir kavram değildir. Fakat fosil yakıtların kullanım kolaylığı ve ülkeler arası ekonomi savaşları hidrojen taşıyıcısı olan bu yakıt ile ilgili araştırmaları geri plana atmıştır. Bunun sonucunda fosil yakıtların kullanımının artması günümüzde karşılaştığımız yüksek hava kirliliği, küresel ısınma ve ozon tabakasının delinmesi gibi dünyamız için büyük tehlike arz eden tahribatlara yol açmıştır. Amonyak yakıt olarak kullanıldığında birçok avantaja sahip olmasının yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu avantajlardan en önemli olanları şüphesiz depolama ve iletim olmakla birlikte enerji yoğunluğu da kritik öneme sahiptir. Örneğin amonyak 350 bar basınçta depolandığında 11,52 MJ/L enerji yoğunluğuna sahipken, 700 bar kadar yüksek bir basınçta depolanan hidrojenin depolama maliyeti ile birlikte 4,46 MJ/L enerji yoğunluğuna sahip olması amonyak kullanımını büyük ölçekli tesislerde daha uygun hale getirmektedir (Ayaz S. K., 2019).

Amonyak ayrıca hali hazırda yaygın bir şekilde üretilmektedir ve bu sebeple üretim maliyeti zaten düşüktür. Ek olarak üretim esnasında ortaya çıkan karbon emisyonu çok düşüktür. Bir başka avantajlarından biri ise depolama ve taşınma esnasında NH₃'ün tutuşma sıcaklığı yüksek olduğu için alev alma riski çok düşüktür.

Amonyak kullanımının dezavantajları avantajlarına göre nispeten azdır. Fakat amonyak yakıt olarak kullanıldığında önemli bir kullanım zorluğu ortaya çıkmaktadır. Amonyak hidrokarbon yakıtların ve hidrojen yakıtının aksine çok düşük yanma hızına sahiptir. Bu sebeple tekil yakıt olarak kullanıldığında veya yakıt karışımı olarak kullanıldığında yanma hızını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca amonyak her ne kadar yanma sonu ürünü olarak herhangi bir karbon bileşiğine sahip emisyon ortaya çıkarmasa da oldukça yüksek NO_x emisyonuna sebep olmaktadır. Bunun yanında amonyak kullanımı sırasında oluşacak herhangi bir sızıntı insan hayatını ciddi şekilde etkileyebilir. Yüksek NH₃

konsantrasyonuna maruz kalan ciğerler tahribata uğrayabilir (Karabeyoglu ve Evans, 2012).

Bu tez çalışmasında basit gaz türbini çevrimi kullanılmaktadır. Bunun sebebi kompleks sistemlerin maliyetinin yüksek olması ve farklı yakıtların herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Tez çalışmasının temel amacı, küçük ölçekli gaz türbinleri başta olmak üzere büyük ölçekli gaz türbinlerine kadar enerji üretmek için amonyak kullanımının mümkün olduğunu kanıtlamaktır. Aynı zamanda yakıt zenginleştirilmesi için kullanılacak hidroksi gazının güneş enerjisi kullanılarak güneş panellerden elde edilen güçle üretilmesi, elektrik üretilirken yenilenebilir enerji kaynaklarının maksimum kullanımı ve fosil yakıt temelli enerji üretiminin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Bunun yanında hidroksi gaz zenginleştirmesinin amonyak yakıtının yanma performansı üzerinde olumlu etkileri ve de kullanılan yakıt karışımının karbon ihtiva etmemesi sebebi ile standart çalışma yakıtı olan propan gazının sebep olduğu karbon emisyonlarının elemine edilmesi araştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan gaz türbini, türbinde kullanılan yakıtlar ve gaz türbininde elektrik üretim yöntemleri ile ilgili çalışmalar ayrı ayrı başlıklar altında verilecektir. Literatürde şebeke enerjisi ve alternatif enerji kaynakları kullanılarak hidroksi gaz üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar, gaz türbinlerinde fosil yakıtlarla enerji üretimi yapılan çalışmalar, gaz türbinlerinde alternatif yakıtlarla enerji üretimi yapılan çalışmalar incelenerek çalışmalarda elde edilen verilerin varsa istatistiksel analizleri ve hata payları sunulacaktır.

2.1. Alternatif Enerji Kaynakları

Modern yaşam standartları kesintisiz ve güvenilir enerji kaynağı gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu sayede günlük konfor, anlık iletişim ve mobil iş yapabilme imkânı sağlanmış olur. Dresselhaus ve Thomas (2001) yapmış oldukları çalışmalarında, önümüzdeki yüzyılda fosil yakıt kaynaklarının daha az erişilebilir, daha pahalı olması ve çevresel endişelerin artması beklendiğinden, enerji tasarrufu ve alternatif enerji kaynaklarına olan bağımlılığın artacağını bildirmişlerdir. Bununla birlikte gezegenimizin en önemli ve en belirgin alternatif enerji kaynağının Güneş olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında güneş doğrudan tepede olduğunda ve gökyüzü açık olduğunda, yatay bir yüzeydeki radyasyonun yaklaşık 1.000 W/m^2 olduğunu söylemişlerdir.

Becquerel'in 1839'daki fotoelektrik deneyleri, çoğu zaman çalışmalarda bahsedilmeyen bir gerçek olsa da katı değil, sıvıyla halde bulunan bir çözelti ile yapmıştır. Metal halojenür tuz içeren solüsyonların aydınlatılmasının, elektrolite batırılmış iki platin elektrot arasında bir akım ürettiği araştırması, fotoğraf filmlerinde kanıtlanmış ve literatüre girmiştir. Bu çalışma, fotoğrafçılık teriminin başlangıcı olarak görülürken, günümüz fotovoltaik güneş panellerinin de temellerini oluşturmaktadır.

Adams ve Day (1877) yaptıkları deneyler esnasında, oluşan akımı ışığın sebep olduğu ısı etkisinden ziyade, ışığın başka özelliklerinden kaynaklandığını doğruladı ve çalışmalar onları bu fenomeni günümüzde fotovoltaik etki olarak bilinen, fotoelektrik etki diye adlandırdıkları çalışmalara yönlendirdi.

Bir fotovoltaik güç üretim sistemi, hücreler, mekanik ve elektrik bağlantıları ve montaj parçaları gibi birden çok bileşenden ve elektrik çıkışını düzenleme ve / veya değiştirme araçlarından oluşur. Bu sistemler en yüksek kilowatt (kWp) cinsinden derecelendirilir; bu, bir sistemin açık bir günde güneşin doğrudan tepesinde olduğunda üretmesi beklenen elektrik gücü miktarıdır. Poponi (2003) yapmış olduğu çalışmada, şebeke bağlantılı sistemlerde elektrik üretimi için fotovoltaik (PV) teknolojisinin yayılma olasılığını değerlendirmiştir. Analizler sonucunda PV sistemlerinin hesaplanan maliyetlerine ulaşmak için gereken kümülatif dünya PV sevkiyatlarının farklı seviyelerini deneyim eğrileri metodolojisi ile, fiyat ve kümülatif sevkiyatlardaki artış arasındaki ilişkide farklı eğilimler varsayarak uygulanabilirliğini ispatlamıştır.

Rehman, Bader ve Al Moallem (2007) yapmış oldukları çalışmalarında, Suudi Arabistan üzerindeki radyasyon ve güneş ışığı süresinin dağılımını incelemek için aylık olarak ortalama günlük küresel güneş radyasyonu ve güneş ışığı süresi verilerini kullanmışlardır. Ayrıca elektrik üretimi için 5 MW kurulu kapasiteli fotovoltaik tabanlı şebekeye bağlı bir elektrik santralinin yenilenebilir enerji üretimi ve ekonomik değerlendirmesini analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kullanımının fosil yakıtlarla kıyaslandığında umut verici olduğunu söylemişlerdir.

Ito, Kato, Sugihara, Kichimi, Song, J ve Kurokawa, K. (2003) çalışmalarında Gobi çölüne kurulacak olan 100 MW'lık çok büyük ölçekli bir fotovoltaik enerji üretimi (VLS-PV) sistemini incelemişlerdir. Kurulacak olan bu sistemin bir çok açıdan potansiyelini ele alan araştırmacılar enerji geri ödeme süresi (EPT), yaşam döngüsü, CO₂ emisyon oranı gibi ekonomik ve çevresel bakış açılarından değerlendirerek sistemin üretim ve işletme maliyetlerini ortaya koymuşlardır.

Zhou, Yang, Wang ve Xiao (2009) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 100 MW'lık bir santralin tüm hizmet süresi boyunca nakit akışlarını analiz ederek yüzen bir güneş bacası santralinden (FSCPP) enerji üretiminin ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar,% 2'lik düşük faiz oranlı krediler ve ücretsiz gelir vergisi dahil olmak üzere mali teşvikler kapsamında minimum cazip getiri oranı (MARR) elde etmek için minimum fiyatin % 8'e yani 0,83 yuan (kWh)⁻¹ 'e ulaştığını göstermişlerdir.

Cunow ve Giesler (2001) önemli bir çalışma yaparak hem sistem teknolojisi hem de kullanılan bileşenler bakımından yenilikçi, operasyonel kontrol ve maliyetler açısından büyük PV tesisi teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil eden, yeni Münih Ticaret Fuarı Merkezindeki yüksek megawatt üreten tesisi anlatmışlardır. Yayınlanan makalede tesisin 1999'un ilk yarısında % 84'lük çok yüksek performans oranına sahip olduğu özellikle vurgulanmıştır.

Muneer, Asif ve Kubie (2003) Dünyanın dört bir yanındaki kurak / yarı kurak yerlerde büyük ölçekli PV üretiminin uzun vadeli beklentilerini ve enerji vektörü olarak hidrojeni kullanarak iletimini araştırdı. Halihazırda kurak / yarı kurak bölgelerden hidrojen tedarikinin 2020 yılı elektrik talebini kısmen karşılamaya yönelik fizibilitesine daha yakından dikkat edilmektedir. OECD-Avrupa için modüler bir yaklaşım önerilmektedir. Tahminler, 9×9 km²'lik bir PV dizisi alanının, 2 m çaplı bir boru hattından 11,5 kg/s'lik bir hidrojen akış hızı sağlamak için yeterli olacağını göstermektedir, bu da yıllık 9 TWh kapasiteye karşılık gelmektedir. Doğalgaza kıyasla hidrojenin düşük yoğunluğu nedeniyle, kademeli pompalama ancak 3000 km'nin üzerindeki bir mesafeden sonra gerekli olacağını bildirmişlerdir.

El-Shatter, Eskandar ve El-Hagry (2001) yaptıkları çalışmalarında hidrojen üretimi için bir elektrolizör kullanan bir hibrit fotovoltaik (PV) yakıt hücresi üretim sistemi tasarlamış ve değişken güneş alma koşulları altında PV dizilerinden maksimum kullanılabilir güneş enerjisini çıkarmak için maksimum güç noktası takibi için bir bulanık regresyon modeli (FRM) uygulamışlardır. Sistem, güneşten sağlanan güce göre sistemin ihtiyacı olan yüke PV dizisi veya yakıt hücresi veya her ikisi aracılığıyla kalıcı güç beslemesi sağlamak için tasarlanmış bir kontrolör içerir. Ayrıca, gün batımından sonra elektrolizör elektrotlarının aşınmasını önlemek için, yani akım sıfıra düştüğünde, elektrik depolama cihazı, elektroliti elektroliz hücresinden izole edecek şekilde tasarlanmıştır.

Maclay, Brouwer ve Samuelsen (2006) fotovoltaikle kullanılacak bir enerji depolama cihazı olarak rejeneratif yakıt hücresi (RFC) kullanmanın uygulanabilirliğini değerlendiren Matlab/Simulink programını kullanarak hem bağımsız hem de şebekeye paralel konfigürasyonda güneş enerjisiyle çalışan bir konut modeli geliştirmişlerdir. Elektrik üretimi ve rejeneratif yakıt hücresi boyutlandırma, pil boyutlandırma, şarj / deşarj oranları ve şarj durumu sınırlamalarının tasarım gereksinimlerini araştırdıkları raporlanmıştır.

Dinamik yük talebinin karşılanması zorluklar içerdiği sonucuna varılmış, rejeneratif yakıt hücresi ile maksimum ve/veya ortalama güç talebini karşılamak için gerekenden önemli ölçüde daha büyük pil boyutlarının gerektiği sonucuna varılmıştır. Hibrit bir konfigürasyonda bataryalara sahip bir rejeneratif yakıt hücresi kullanmak, PV kullanımını ve hem pil verimliliğini hem de güç yoğunluğunu artırmıştır. Şebekeye paralel konfigürasyonların, enerji depolama maliyetleri ve maksimum enerji talebini karşılamayla ilgili birçok zorluğu hafiflettiği bulunmuştur.

Zervas, Serimveis, Palyvos ve Markatos (2008) güneş enerjisini yakıt olan hidrojene dönüştürerek verimli bir şekilde depolayabilen Fotovoltaik Dizi (PV), Elektrolizör, Metal Hidrit Tankları ve Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC) olmak üzere 4 (dört) ana bileşenden oluşan bir hibrit güç üretim sistemi üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak, önerilen model, yenilenebilir enerji kaynağı ve hidrojen teknolojilerini birleştiren hibrit güç üretim sistemlerinde optimal karar verme için çok yararlı bir araç olabileceği söylenmiştir. Ayrıca çalışmada yenilenebilir enerji teknolojileri olgunlaştığı için, böyle bir hibrit sistemin tüm bileşenlerinin gerçek maliyetinin sürekli olarak azaldığından da bahsedilmiştir. Ek olarak, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin yakın gelecekte geleneksel elektrik üretim sistemleriyle rekabet etmesi beklendiği ve bu nedenle operasyonlarının optimizasyonu özellikle önem arz ettiği raporlanmıştır.

Papadopoulos, Desmet, Knockaert ve Develder (2018)'in literatürde bulunan mevcut çalışmalarının ana amacı, elektrik şebekesi kullanmak yerine yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan güç kaynağı sisteminin tasarımından elektrolizörün kullanım faktörünün nasıl etkilendiğini göstermektir. Mevcut fotovoltaik (PV) enerji kaynağı rüzgâr enerjisi ve son teknoloji enerji depolama teknolojileri (Vanadyum Redox Akış veya Lityum NMC) ile birleştirilerek farklı hibrit tasarımlar geliştirilmiştir. Son olarak, tümü 1 MW PEM elektrolizörü içeren dört farklı senaryo incelendiği bildirilmiştir. Bu senaryolar: A) 15 MW PV, B) 15 MW PV, 2 MW Rüzgâr, C) 15 MW PV, 2MW Rüzgâr, Pil, D) 15 MW PV, 15 MW Rüzgâr olarak sıralanmıştır. Kullanım faktörü her bir senaryo için sırasıyla şu şekilde bulunmuştur: A) % 41,5 B) % 65,5 C) % 66,0 - 86,0 D) % 82,0. Ayrıca, analizlerde, özellikle senaryo B ve C ile ilgili ekonomik değerlendirmelerini (yani geri ödeme süresi, birikmiş kâr) içerecek şekilde genişletmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarında, i) Elektrolizör güç kaynağının enerji sağlaması kesintili olduğu durumlarda kullanımı sınırlı olduğu, ii) PV ile karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisi, kullanım faktörünün

artışına daha büyük katkı sağladığı, iii) %100 kullanım ancak bir enerji depolama sistemi bir arada mevcutsa elde edilebildiği iv) %65,5'lik bir kullanım faktörü ile senaryo B, hidrojenin 5 euro/kg'ın üzerinde satıldığı durumlarda, 8 yıldan daha kısa bir sürede geri ödeme süresi sağlayabileceği çıkarımlarına varılmıştır.

Felgenhauer ve Hamacher (2015) gerçekleştirdikleri projede hidrojenin bir otomobil fabrikasında yakıt hücreli araçlar için kullanılması amaçlamışlardır. Çalışma, hidrojenin üretim maliyetinin elektrik maliyetinden ve elektrolizörün kullanım faktöründen önemli ölçüde etkilendiğini açıkça göstermektedir. Sonuçlar, 25 kg/s üzerinde kapasiteye sahip alkali elektrolizörlerin özellikle uygun maliyetli olduğunu ve 4,96–5,78 \$/kg'da H₂ ürettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, H₂ üretim maliyetlerinin dörtte üçünün elektrik maliyetleri ve dolayısıyla değişken maliyetler olduğu için kapasite kullanımının büyük elektrolizörler için yalnızca ikincil bir rol oynadığı da bulunmuştur. Sonuç olarak, sonuçlar, Güney Carolina'daki yakıt hücresi ile çalışan lojistik araç filosunun, elektrolizle 5,1-7,5 \$/kg-H₂ elde edilirken, merkezi bir buhar metan reformasyon tesisinden sağlanan sıvı hidrojenin 5-8 \$/kg-H₂'ye elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışmada yazarlar, H₂ yakıtın üretim maliyetini düşürmek için araştırmacı bilim adamlarının yenilenebilir enerjiye odaklanmaları gerektiğini tavsiye etmektedirler.

Walker, van Lanen, Fowler ve Mukherjee (2016) elektrolizörün farklı boyutları (2 MW, 5 MW ve 30 MW) dikkate alınarak bir yenilenebilir enerji kaynağından elde edilen enerji şebekesinden hidrojen üretim tesisinin ekonomik performansını simüle etmişlerdir. Bir girdi değeri/eşiği (örneğin, 40 US \$/MWh) göz önüne alındığında, saatlik toptan elektrik fiyatı ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Toptan satış fiyatı giriş eşiğinden yüksek olduğunda, elektrolizörün minimum ve düşük olduğunda maksimum güçte çalıştığını rapor etmişlerdir. Tesisin karlılığının büyük ölçüde elektrolizörün kullanım faktörüne ve performansına bağlı olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca, büyük ölçekli sistemlerle ilk yatırım maliyetinin %15 – 21'i aralığında tesisin iç getiri oranlarına ulaşabileceği sonucuna varmışlardır.

Akyüz ve Gül (2020) çalışmalarında, bir PV/T elektrolizör sisteminin elektriksel, elektrokimyasal ve termodinamik performansı incelenmiş ve deneysel sonuçlar sayısal bir model ile doğrulanmıştır. PV/T elektrolizör sisteminden yıllık elektrik ve termal enerji miktarları sırasıyla 556,8 kWh ve 1912 kWh olarak hesaplandığını bildirmişlerdir. Ek olarak, PV/T elektrolizör için hidrojen üretim performansı, bir PV elektrolizör sistemindeki

ile karşılaştırılmıştır. PV sistemi için hidrojen miktarı yıllık 3,96 kg olarak hesaplanırken, PV/T sistemi için bu değer 4,49 kg olarak hesaplandığı söylenmiştir. Ayrıca hidrojen üretim miktarı 65 °C işletme sıcaklığında 4,59 kg olarak hesaplanmıştır. Günlük bazda saatlik olarak elde edilen PV/T sisteminin elektriksel, termal ve toplam enerji verimlilikleri hesaplanmış ve sırasıyla %12-13,8 %36,1-45,2 ve %49,1-58,4 arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte saatlik ekserji analizleri de günlük olarak yapılmış ve sonuçlar, ekserji verimliliklerinin % 13,8 – 14,32 arasında değiştiğini gösterdi. Elektroliz voltajındaki değişim sırasıyla 200–1600 mA/cm² ve 30–65 °C aralığında akım ve sıcaklık değiştirilerek araştırılmıştır. Akım sıcaklığı ve su sıcaklığı sırasıyla 400–2350 mA/cm² ve 28,1–45,8 °C aralığında değişirken, enerji verimliliği ve ekserji verimliliği sırasıyla %57,85–69,45 ve %71,1–79,7 aralığında olduğunu bildirmişlerdir.

Corumlu, Ozsoy ve Ozturk (2018) çalışmalarında güneş PV panelleri, güneş enerjisi boru kolektörleri, bir ısı eşanjörü, bir ayırıcı ve bir PEM elektrolizörden oluşan hibrit bir sistem önerdi ve sistemi termodinamik olarak inceledi. Araştırma, daha yüksek bir su kaynağı ile daha yüksek bir PEM elektrolizör sıcaklığı sağlayan güneş kolektörünün, ünitenin enerji ve ekserji verimliliği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Isı borulu güneş kolektörünün verimliliğindeki artışla birlikte ekserji performansı ve hidrojen üretim hızı artmaktadır. Bunun nedeni, ısı borulu güneş kolektörünün verimliliğindeki artışa bağlı olarak güneş kolektörlerinden sisteme giren çalışma akışkanı olan sıcak suyun entalpisinin artmasıdır. Güneş kolektörü ve fotovoltaik panellerle entegre sistemin ekserji verimliliği 0,1845'ten 0,2152'ye ve bu sistemden elektroliz ile elde edilen hidrojen üretiminin de 0,00077 kg/s'den 0,00137 kg/s'ye yükseltildiği bildirilmiştir.

2.2. Hidroksi (HHO) Gaz Üretimi ve Kullanımı

Hidrojen, hidrokarbonların ısı yoluyla ayrışması, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ile çözelti haline gelen suyun alüminyum plakalar üzerinde iyonlarına ayrışarak elektrolizi, ısıtılmış karbon üzerine su buharı beslemesi veya asitlerle metallerin kimyasal tepkimesi ile iyonların yer değiştirmesi ile oluşur (Zohuri, 2018: 9). Çalışmada kullanılan hidroksi (HHO) gazı elde etme yöntemi potasyum hidroksit (KOH) ile hazırlanan çözeltilerden elektroliz yoluyla suyun bileşenlerine ayrıştırılmasıdır. Hidroksi gaz, 1977 yılında Yull Brown tarafından keşfedilmiştir ve literatüre Brown gaz olarak girmiştir

(Brown, 1977). Yull Brown' a göre Brown gaz hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) moleküllerinin birbirinden ayrı bir şekilde karışımından oluşmaktadır.

Bow ve Dewi (2019) HHO gazı üretimini ve bir ıslak hücrenin tükettiği gücü elektrot sayısına, boyutlarına, sağlanan voltaj ve akıma göre hesaplayabilen bir yazılım kullanmışlardır. Çalışmada elektroliz yöntemi kullanılarak HHO gazının nasıl üretileceğine ilişkin araştırmalar, çeşitli yöntem ve parametreler kullanılmıştır. Temel problem, ekipmana uygulanan elektrik akımının verimliliğini etkileyebilecek HHO gazı üretmek için kullanılan hidrojen jeneratörünün koşullandırılması olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada hidrojen jeneratöründe kullanılan anot ve katot yüzeyi dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Yazarlar, Faraday Yasasına göre, elektrot tarafından üretilen parçacık sayısı, elektroliz hücresine uygulanan elektrik akımı miktarı ile orantılı olduğunu rapor etmişlerdir. Yapılan hesaplardan sonra, hidrojen üreticinde kullanılan paslanmaz çelik elektrotun yüzeyi 66 cm^2 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler modellendikten sonra HHO gaz üretimini etkileyen faktörleri daha iyi görmek için elektrolit konsantrasyonlarında ve uygulanan elektrik akımında değişiklikler yapılmış ve modellemenin sonunda, elektroliz yoluyla en yüksek HHO gazı hacmini elde etmek için en iyi parametreler sağlandığını bildirmişlerdir. En iyi parametrelerin, sodyum hidroksilin elektrolit konsantrasyonunun $0,05 \text{ M}$ ve uygulanan akım 15 A olduğunda, hidrojen üreticinin elektrik akımı verimliliği $\%89,13$ ile $0,1028 \text{ L/dak}$ HHO gazı üreterek elde edildiği gösterilmiştir.

Alam ve Pandey (2017) yayınlanan makalede, üretilen hidroksi gaz miktarı üzerindeki mevcut değişim, gerilim, sıcaklık, kimyasal konsantrasyon ve reaksiyon süresinin etkilerinin araştırılması için deneysel olarak çalışma yapılmıştır. Gelişmiş alkali suyun genel elektroliz verimliliği üzerindeki diğer etkileri yazarlar tarafından incelenmiştir. Hidroksi gazı (HHO), alkali suyun 316L kalite paslanmaz çelikten paralel plaka elektrotu ile elektrolizi ile deneysel olarak üretilmiştir. Elektrotun, elektrolite (KOH) göre korozyon direnci ve eylemsizlik esas alınarak seçildiği belirtilmiştir. HHO üretimi için kullanılan süreç, düşük enerji tüketimi, daha az bakım ve düşük kurulum maliyeti nedeniyle diğer üretim süreçlerine kıyasla geleneksel üretim metodu kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan, alkali çözeltinin voltaj, sıcaklık ve elektrolit konsantrasyonundaki artışla birlikte, elektrik enerjisi tüketimindeki azalma ile hidroksi gaz üretiminin yaklaşık $\%30-40$ arttığı gözlenmiştir.

Khalid, Dincer ve Rosen (2017) çalışmalarında, hidrojen üretimi için hidrojen klorürün gaz fazı elektrolizi için bir yüksek sıcaklık elektrolizörü önerilmiş ve değerlendirilmiştir. Önerilen elektrolizör için J (Akım yoğunluğu) - E (Potansiyel Fark) özelliklerini incelemek için ayrıntılı bir elektrokimyasal model geliştirilmiştir (proton ileten bir elektrolite dayalı bir katı oksit elektrolizörü). Geliştirilen model, aktivasyon, konsantrasyon ve direnç (ohm) olmak üzere tüm büyük kayıpları hesaba katmışlardır. Enerji ve ekserji analizleri yapılarak önerilen elektrolizörün enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %41,1 ve %39,0 olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları, $T=1073$ K, $P=100,325$ kPa ve $J =1000$ A / m²'de 1 mol hidrojen üretmek için 1,6 V gerektiğini gösterdiği bildirilmiştir. Bu durumun, aynı koşulda ($T=1073$ K, $P=101,325$ kPa ve $J=1000$ A/m²) çalışan bir yüksek sıcaklık buhar elektrolizörünün (proton ileten bir elektrolite dayalı) gerektirdiği voltajdan yaklaşık 0,3 V daha az olduğu görülmüş ve önerilen elektrolizör, potansiyel olarak düşük elektrik enerjisi gereksinimi ile hidrojen üretimi için yüksek sıcaklıkta elektroliz için yeni bir seçenek sunacağı sonucuna varılmıştır. Önerilen elektrolizör, CuCl veya Cl (klor) döngüleri gibi hidrojen üretimi için termokimyasal döngülere dahil edilebileceği tavsiye edilmiştir.

Shah, Ali, Larik ve Kaimkhani (2018) yaptıkları çalışmalarında, içten yanmalı motorlar için önemli bir rekabetçi yakıt olarak kullanılacak HHO gazının üretimi için kuru hücre ve ıslak hücre karşılaştırmasına dayanan bir kıyas yapmışlardır. Her iki hücre için fiziksel ve operasyonel parametreler karşılaştırılmış ve eleştirel olarak tartışılmıştır. Elektroliz işlemi sırasında ısı üretiminin hem hücre üzerindeki etkisi hem de bu hücrelerle ilgili güvenlik konuları özel olarak ele alındığını bildirmişlerdir. Her iki hücrenin deneysel olarak HHO üretimi karşılaştırılmıştır. Yazarlar tarafından, aynı giriş koşulları için ıslak hücreye kıyasla daha fazla HHO gazı ürettiği için kuru hücrenin ıslak hücreden çok daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Kuru hücrenin, çalışma ve bakım şartları, ıslak hücreye göre daha güvenilir ve uygun olduğu görülmüştür. Kuru hücrelerin kullanımı güvenlik özellikleri, ıslak pilden daha ümit verici olduğu sonucuna varılmıştır.

Amalia, Nurisma ve Efendi (2020) yaptıkları çalışmada, 1 litrelik saf su başına 100, 120, 140, 160 ve 180 gram KOH katalizörlerinin varyasyonu ile 6 hücreden oluşan 316L paslanmaz çelik elektrot malzemeli oksihidrojen kuru hücreli jeneratörler kullanılmıştır. Oksihidrojen jeneratörü performans testinin özellikleri, güç tüketimi, oksihidrojen gazı üretim hızı ve oksihidrojen jeneratör verimi elde edilir. Yapılan çalışmaların sonuçlarından KOH katalizörlerinin konsantrasyonunun artmasının güç tüketiminin artmasına yol açtığını

bilmek mümkündür. En yüksek elektrik enerjisi tüketimi KOH katalizörü 180 gr/L konsantrasyonunda 26,1 W, en düşük elektrik enerjisi tüketimi ise KOH Katalizör 100 gr/L konsantrasyonunda 8,8 W'tır. Daha sonra oksihidrojen gazı üretim hızı, artan KOH katalizör konsantrasyonları ile artmaktadır. En yüksek oksihidrojen gazı üretimi 180 gr/L KOH katalizör konsantrasyonunda $6,53 \times 10^{-2}$ L/dak, en düşük oksihidrojen gazı üretimi ise KOH Katalizör 100 gr/L konsantrasyonunda $1,86 \times 10^{-2}$ L/dak 'dır. Dolayısıyla makalede en yüksek oksihidrojen jeneratör verimi, KOH katalizörünün 120 gr/L konsantrasyonunda %59,44 olarak sunulmuştur.

Hidroksi gazı genellikle pistonlu içten yanmalı motorlarda, dizel ve benzin ile birlikte araçlarda kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde hidroksi gazının karakteristiğini anlamak ve yakıt zenginleştirilmesi olarak kullanıldığında hidrokarbon yakıtların performans ve emisyon değerlerine katkısı açıkça görülmektedir.

Sharma P., Sharma, D., Soni, Jhalani, Singh, ve Sharma, S. (2020) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, hidroksi gaz ve dizel yakıtlı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorun, sabit modifiye edilmiş bir motorda çift yakıt modu altında karakterizasyonunu araştırmışlardır. Hidroksi gaz (HHO), dizel ile birlikte 0,25, 0,50 ve 0,75 L/dak olmak üzere üç farklı akış hızında motora gönderilmektedir. Çift yakıt modunda (0,75 L/dak HHO ve 10 kg yükte) karbon monoksit, yanmamış hidrokarbon ve duman emisyon parametrelerinde sırasıyla ~% 58, ~% 60 ve ~% 49 oranında önemli bir azalma elde edilmiştir. Ancak HHO gazındaki O₂ içeriği nedeniyle azot oksit (NO_x) emisyonunda hafif bir artış gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Fren termal verimliliği ve frene özgü enerji tüketimi de iyileştirildi ve optimize edilmiş durumda ~%6,5 ve ~%6 olarak bulundu. Bununla birlikte yanma analizi, daha hızlı yanma ve azalan yanma süresi nedeniyle artan basınç artış oranını göstermektedir. Ayrıca yazarlar, Hibrit Entropi-VIKOR tekniği kullanılarak motor yükünü ve HHO akış oranını optimize etmek için sayısal bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Ek olarak, performans ve emisyon parametreleri için simülasyon ve deneysel değerler arasında iyi bir uyum sağlandığı gözlemlenmektedir. Sonuçlar, yakın gelecekte motor çalışma parametreleri, yani enjeksiyon basıncı, sıkıştırma oranı ve enjeksiyon zamanlaması optimize edilerek HHO kullanımının yaygınlaşacağı beklendiğini rapor etmişlerdir. Genel olarak, HHO'nun artan verimlilik ve daha düşük emisyonlarla CI motoru için önemli bir alternatif yakıt olarak kabul edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Krishna, Reddy, Kumar ve Raghu (2020) deneylerinde esas olarak, benzine hidroksi gazı eklemenin, değişken sıkıştırılmalı benzinli motor performansı ve motor emisyonları üzerindeki sonucunu ele almaktadır. Çalışmalarında hidroksi (HHO) gazı, potasyum hidroksit elektrolitli sızdırmaz bir pleksiglas kaplamaya sahip jeneratörde üretmişlerdir. Üretilen hidroksi (HHO) gazı 4 zamanlı su soğutmalı değişken sıkıştırılmalı benzinli motora bağlandıktan sonra, 7'den 10'a kadar değişen sıkıştırma oranları için motor üzerinde yapılan deneysel çalışmanın sonuçları, toplam yakıt tüketiminde bir azalma ve hız alev yayılımındaki artışa bağlı olarak fren ısıl veriminde bir artış olduğunu gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca, hidroksi katkısının ana yakıtın tam yanmasını sağladığı ve motorun modifikasyon yapılmadan standart sıkıştırma oranı aralıklarında çalıştığı raporlanmıştır. Sonuçlar ele alındığında egzoz emisyonları CO₂, CO, O₂, HC ve NO_x değerleri hem benzine hidroksi gaz ilavesiyle yapılan deneyler için hem de standart yakıtlı çalışma koşullarında ölçülmüştür. Sonuçlar performans değerlerinde olduğu gibi, emisyon değerlerinde de iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Dahake, Patil S.D., Patil S.E (2016) yayınladıkları makalelerinde hidroksi (HHO) gazı zenginleştirilmesi, sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda daha iyi yanma ve azaltılmış emisyon çıktıkları ile sonuçlandığını söylemektedirler. Ayrıca dizel yakıtının zayıf ateşleme özelliklerine yardımcı olmak için HHO gazı yanmayı iyileştirmek için kullanılabilceği sonucuna varmışlardır. Hidroksi gazı, dizel motorda hava ile zenginleştirildiğinde, sıkıştırma oranı 18 olan bir motor için hesaplanan ısıl verim, temel dizel yanmasına kıyasla %9,25 artmakta ve özgül yakıt tüketimi tam yük durumunda %15 azaldığı rapor edilmiştir. Hidroksi gazı ile daha yüksek sıkıştırma oranında daha iyi yanma nedeniyle HC emisyonunun ortalama %33 oranında azaltıldığı bildirilmektedir. Bununla birlikte CO emisyonunda dramatik bir azalma görüldüğü, CO emisyonunda ortalama %23 iyileştirme sağlandığı gözlemlenmiştir. NO_x emisyonu göz önünde bulundurulduğunda ise, tam yük durumunda hidroksi gazı zenginleştirmesinin olumsuz etkilediği görülmektedir. Hidroksi zenginleştirilmesi ile egzoz gazı sıcaklığının da yükseldiği, dizel çalıştırma için %10 olan duman opaklığının %8 e gerilediği bildirilmiştir.

Yılmaz, Uludamar ve Aydın (2010) çalışmalarında 1800 d/d'de maksimum 80 kW fren gücü ile dört silindirli, direkt enjeksiyonlu, 3567cc CI motorda katkı yakıt olarak HHO kullanımını test etmişlerdir. HHO, el yapımı bir elektrolizör ünitesi (harici bir kaynakla güçlendirilmiş) aracılığıyla üretildi ve emme manifoldundaki enjeksiyonu özel bir ECU

tarafından düzenlendiği bildirilmiştir. Çeşitli motor hızlarında performans ve emisyon değerleri alınmıştır (1200d/d'den 2800d/d'ye) ve enjekte edilen HHO miktarı buna göre değiştirildiği raporlanmıştır. HHO katkısı ile motor torkunda ortalama %19,1 artış ve özgül yakıt tüketiminde de ortalama %14 kazanç gözlemlendiği görülmüştür. Ayrıca, HC ve CO emisyonları sırasıyla yaklaşık %5 ve %13,5 oranında düşürüldüğü belirtilmektedir.

Bari ve Esmail (2010) çalışmalarında farklı oranlarda HHO ilavesi altında, herhangi bir değişiklik yapılmamış dört silindirli, direkt enjeksiyonlu 4010 cc dizel motorun verimlilik ve emisyon değerlerindeki iyileştirmeleri araştırmışlardır. Deneylerin 1500 d/d sabit motor devrinde üç farklı güç miktarında (19kW, 22kW ve 28kW) ve ticari bir HHO jeneratörüyle (Epoch EP-500) üretilen 30 L/dak'ya kadar HHO akış hızı ile test edildiği bildirilmiştir. Yazarlar, Fren Termal Verimliliğinde (BTE) %8,8'lik bir maksimum artış ve buna karşılık özgül yakıt tüketiminde %8,1'lik bir azalma gözlemlediklerini raporlamışlardır. Ayrıca, HC, CO ve CO₂ emisyonları azalırken HHO'nun yüksek enerji içeriği ve alev hızı ile ilgili en yüksek basınçlar ve sıcaklıklar nedeniyle NO_x emisyonunun arttığı sonucuna varmışlardır.

Arat, Baltacıoğlu, Özcanlı ve Aydın (2016) çalışmalarında, yapısal modifikasyon yapılmayan, dört silindirli, direkt enjeksiyonlu, 3567 cc dizel motorda dizel yakıt ile sadece HHO (5,14 L/dak) ve HHO ve CNG karışımı (sırasıyla 5,14 L/dak ve 15,36 L/dak) ile zenginleştirilmiş dizel yakıtın performansını yakıtın silindirlere pilot dizel enjeksiyon metodu ile püskürtülmesinin performans ve emisyon çıktılarına etkilerini incelemişlerdir. HHO, 24 V batarya ile çalışan ticari bir cihazla oluşturuldu ve testler, 1200 d/d ve 2600 d/d arasında değişen motor hızlarında gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Yakıt zenginleştirilmesi olarak tek başına HHO kullanımı ile fren termal verimlilik değeri yaklaşık %3,4 artarken, özgül yakıt tüketimi değerlerimde %17,4 azaldığı rapor edilmiştir. Yine çalışmada HHO ve CNG bir arada dizel yakıt ile birlikte kullanımının sadece HHO zenginleştirmesine göre sonuçları iyileştirdiği: fren termal verimliliğin %6,28 arttığı ve özgül yakıt tüketimi %27,2 düştüğü ispatlanmıştır. Tüm durumlarda, hem CO₂ hem de NO_x emisyonlarının azaldığı, muhtemelen daha az hava alımına bağlı olarak CO emisyon değerlerinin ilk durumda artarken ve ikincisinde azaldığı sonucuna varılmıştır.

Moreno-Soriano, Soriano-Moranchel, Flores-Herrera, Sandoval-Pineda, ve González-Huerta, (2020) yayınladıkları makalede, atmosferik yanma işlemi için bir oksijen-hidrojen gaz

brülörünün tasarımını ve değerlendirmesini sunmaktadırlar. Gaz, 3 sL/dak'ya kadar üretim hızına sahip bir alkalın elektrolizör ile brülörün yanında sabit bir sistemle üretilmektedir. Bir gaz brülörünün termal verimliliği, belirli bir zaman aralığına göre istenen yüke aktarılan giriş termal enerjisinin yüzdesi olarak tanımlanır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, 1,5 sL/dak minimum akış hızı için %30 ve 3,5 sL/dak akış hızı için %76 termal verimlilik göstermektedir. yazarlar bu sonuçları, brülör yüzeyi ile ısıtma tankı arasındaki 10 mm'lik yükseklikle ilişkindirmektedirler.

2.3. Amonyak Üretimi ve Kullanımı

Amonyak, tarımsal gübre, gıda üretimi, endüstriyel malzemeler, soğutucular ve katkı maddeleri olarak kullanılan ikinci en büyük küresel kimyasal üründür. Son zamanlarda, amonyağın enerji taşıyıcısı (ikincil enerji kaynağı) olarak kullanılması, yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğu, düşük depolama basıncı, uzun süreli depolama için yüksek stabilitesi, yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, düşük yoğunlaşma basıncı ve havadan daha düşük gaz yoğunluğu nedeniyle son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Genel olarak amonyak günümüzde daha çok tercih edilen termokimyasal (Haber – Bosch), elektrokimyasal ve fotokimyasal döngü yöntemler ile üretilmektedir.

Bicer, Dincer, Zamfirescu, Vezina, Raso (2016) çalışmalarında, dört farklı amonyak üretim yönteminin yaşam döngüsü hesaplamaları kullanılarak karşılaştırmalı olarak kıyaslamışlardır. Önerilen amonyak üretim sistemleri, hidrojen üretimi için bir elektrolizörden ve amonyak sentezi için bir Haber-Bosch tesisinden oluşmaktadır. Sistemler için gerekli enerjinin hidroelektrik, nükleer, biyokütle ve evsel atıklar gibi çeşitli kaynaklardan elde edildiği bildirilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi, sistemlerin yaşam döngüsü boyunca her yöntemin küresel ısınma potansiyeli, insanların sağlığını etkileyen toksisite ve abiyotik tükenme kategorilerindeki çevresel etkilerini belirlemek ve ölçmek için kullanıldığı belirtilmektedir. Önerilen konvansiyonel olmayan amonyak üretim seçenekleri, pratik amonyak üretim uygulamaları için önemli kriterler olarak çevresel etkiler ve hem enerji hem de ekserji verimliliği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Amonyak üretim süreçleri için yaşam döngüsü hesaplamaları sonuçları, belediye atık yakma tesisi ve hidroelektrik tabanlı amonyak üretim yöntemlerinin diğer seçilen yöntemlere göre daha zararsız çevresel etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Hidroelektrik, nükleer, biyokütle ve evsel atık bazlı amonyak üretim

yöntemlerinin amonyak üretimi kilogramı başına öngörülen sera gazı emisyonları sırasıyla 0,38 kg CO₂, 0,84 kg CO₂, 0,85 kg CO₂ ve 0,34 kg CO₂ olarak hesaplanmıştır. Sistemlerin enerji ve ekserji verimlilikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte ve iyileştirme potansiyelinin bir göstergesi olarak sürdürülebilirlik endeksi değerleri buna göre hesaplanarak çalışmada sunulmuştur. Önerilen amonyak üretim yöntemlerinin enerji verimliliği hidroelektrik, nükleer, biyokütle ve kentsel atık bazlı seçenekler için sırasıyla %42,7, %23,8, %15,4 ve %11,7 olarak belirlenmiştir. Karşılık gelen ekserji verimliliği hidroelektrik, nükleer, biyokütle ve evsel atıklara dayalı seçenekler için sırasıyla %46,4, %20,4, %15,5 ve %10,3 olarak bulunduğu raporlanmıştır.

Zhang, Wang, Van herle, Marechal ve Desideri (2020) çalışmalarında fosil yakıt tüketimini ve geleneksel amonyak üretiminin iklim değişikliği üzerindeki etkilerini azaltmak için, yeşil hidrojen kullanan yeşil amonyak üretim süreçlerinin araştırılması gerektiğini savunmaktadırlar. Makalelerinde, yeşil amonyak üretim sürecinin teknolojik fizibilitesi araştırılmış ve sistem düzeyinde ısı entegrasyonu ve ısı geri kazanımı için buhar döngülerinin optimum yerleşimi göz önünde bulundurularak son teknoloji ürünü metandan amonyağa geçiş süreci ile karşılaştırılmıştır. Çalışma üç farklı basınç seviyesinde gerçekleştirilmiş ve 50 kton/yıl referans amonyak üretimi ile sonuçlar, her üç durum için de genel enerji verimliliği ve amonyak üretim maliyeti arasında avantaj ve dezavantajlar olduğunu göstermiştir. Biyokütlenin amonyak dönüşümü en ekzotermik proses olarak belirlenmiş, ancak büyük ölçüde asit gazı çıkarılması için gerekli olan büyük ısı miktarının termal verimi sınırladığı görülmüştür. Üç basınç seviyeli buhar döngüleri, sistem seviyesinde ısı kullanımını en üst düzeye çıkarabildiği bildirilmiştir. Yenilenebilir yada şebeke kaynaklı güçten amonyak üretimi, biyokütleden amonyağa (%44) ve metandan amonyağa (%61) göre çok daha yüksek olan %74'ün üzerinde en yüksek sistem verimliliğine ulaştığı raporlanmıştır. Biyokütlenin amonyağa dönüştürülmesi, 450 \$/ton amonyak üretim maliyetinin üzerine, 6 yıldan fazla geri ödeme süresi ile metandan amonyağa (400 \$/ton, 5 yıl) göre daha yüksektir. Güçten-amonyak üretim konsepti şu anda yüksek yığın maliyetleri ve elektrik fiyatları nedeniyle ekonomik olarak uygun olmadığı görülmüştür; ancak, katı oksit endüstrisinin seri üretimi ve artan yenilenebilir enerji penetrasyonu ile 5 yılın altında bir geri ödeme süresi ile rekabet edebileceği sonucuna varılmıştır.

Philibert (2017) yayınladığı raporda güneş ve rüzgarla veya bazı durumlarda tek başına rüzgar enerjisi ile çalışan, tam zamanlı çalışma kapasitesi 5000 ila 7000 saat olan bir tesiste, üretilen yükün % 25'i çoğu zaman kullanılabilmekte ve çoğu zaman da % 5'ten fazlası neredeyse hiç kullanılamamakta olduğunu bildirmiştir. Sıkıştırılmış hidrojen ve nitrojenin kısa süreli depolanması, amonyak sentezi döngüsünün sürekli işlemlerini sağlamak için depolama süresi uzatılabildiği bildirilmektedir. Çalışmada ek maliyetler, H₂'nin sentez döngülerine girmeden önce sıkıştırılması gerekse de, nispeten uzun süre depolamaya kıyasla daha küçük olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada ister ihracat için ister çeşitli gübrelere yerel dönüşüm için 500.000 ton/yıl üretmeyi hedefleyen büyük bir amonyak tesisi, 88.000 ton H₂'den fazlasını üretmek ve tüm alt sistemleri çalıştırmak için yılda yaklaşık 4.8 TWh enerji tüketecektir. Birleştirilmiş güneş ve rüzgar enerjisi kapasiteleri için 6000 tam zamanlı tam yükte çalışma varsayıldığında, gerekli dağıtım, örneğin, 735 MW elektrolizör için 785 MW rüzgar türbini ve 785 MW'a kadar güneş PV santrali olabileceği sonucuna varılmıştır.

Kyriakou, Garagounis, Vasileiou, Vourros ve Stoukides (2017) yeni amonyak üretim yöntemlerinden olan elektrokimyasal amonyak sentezini kullanmışlardır. Bu sistemlerin Fe bazlı katalizörler genellikle 400 ile 500 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 130 ile 170 bar arasındaki basınçlarda kullanıldığı bildirilmektedir. Endüstriyel sürecin tersine, doğada bitkiler ve bakteriler milyonlarca yıldır ılıman koşullarda amonyak üretiliyorlar. Atmosferik nitrojen, metaloenzim nitrojenazın FeMo kofaktörü üzerinde solvatlanmış protonlar tarafından indirgenildiği raporlanmıştır. İlk kez 1998'de gösterildiğinden beri, elektrokimyasal sentez geniş bir sıcaklık aralığında (25–800 °C) çeşitli deneysel konfigürasyonlarda incelenmiştir. Yazarkar bu incelemelerinde, bu yöntemin hem katı hem de sıvı elektrolit hücrelerde ilerlemesi rapor edilmektedir. Deneysel çalışmalar yüksek ($T > 500$ °C), orta (500 °C $> T > 100$ °C) ve düşük ($T < 100$ °C) sıcaklıklara bölünmüştür. Deneysel gözlemler, yoğunluk-fonksiyonel teori olarak bilinen DFT hesaplamalarına dayanan teorik tahminlerle karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Elektrokimyasal yaklaşımın tekno-ekonomik avantajları ve dezavantajları ile pratik uygulamaları mümkün kılmak için karşılanması gereken gereksinimler de analiz edilmiştir. Sırasıyla $3,3 \times 10^{-8}$ mol/s.cm² ve %90,4 kadar yüksek reaksiyon oranları ve Faradaik Verimlilik bildirilmiştir. Ayrıca, 10^{-6} mol H₂ /s.cm² mertebesinde NH₃ üretebilen 30 µm kalınlığındaki seramik proton iletkenler imal edilmiş ve testler sonucunda raporlanmıştır.

Gelişen amonyak üretim teknolojileri ile birlikte hem fosil yakıt ithal etmekte zorlanılan savaş ve ambargo zamanlarında, hem de temiz enerji kullanımının zorunlu olduğu küresel iklim krizi ve yüksek çevre kirliliği gibi hayati önem arz eden durumlarda alternatif enerji kaynaklarına yönelim ile birlikte en temiz ve umut verici hidrojen taşıyıcısı olan amonyak kullanımı da enerji kaynağı olarak kritik rol oynamaktadır.

Kroch (1945) yayınladığı makalede amonyak doğrudan yakıt olarak II. Dünya savaşı sırasında Belçika'da üretilen otobüs filolarında kullanılmıştır. Savaş döneminde yakıt sıkıntısı çeken Avrupa'da özellikle amonyak yüksek hidrojen yoğunluğu sayesinde amonyak kullanımı için tasarlanan motorlarda istenilen gücü üreterek askeri destek sağlamıştır.

Miller, Smooke, Green, ve Kee (1983) tarafından amonyak yanması için ilk ayrıntılı mekanizma önerilmiştir. Bu mekanizma birkaç brülörle stabilize edilmiş yanma reaksiyonu ve yanma odasında karışım halinde alınan NH_3/O_2 ve $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2$ alevlerine dayanmaktadır. Emsiyon değerleri incelendiğinde, incelenen parçacık türlerinin konsantrasyon profilleri, kinetik modelde önemli piroliz adımlarının eksik olduğu çok zengin karışımli alevler dışında, genellikle deney sonuçların tutarlılık gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, önemli NO ve N_2 oluşum reaksiyonları doğru bir şekilde tanımlanmış ve zayıf alevlerdeki nitrik oksit esas olarak ya NH_2+O , $\text{NH}+\text{OH}$ veya $\text{NH}+\text{O}_2$ reaksiyonlarıyla oluşan nitroksil (HNO) ara maddesi yoluyla üretildiği belirtilmiştir. Zayıf (düşük ısıli) alevlerde NO dönüşümünün NH_2 veya NH ile reaksiyona girerek sırasıyla NNH veya N_2O oluşturarak meydana gelmesi beklendiği rapor edilmiştir. Ek olarak, zengin yakıt karışımı koşulları altında, NH_2 ve NH 'nin hızla nitrojen atomlarına dönüştürüldükten sonra NO oluşumu ve genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile NO'nun N_2 'ye dönüştüğü sonucuna varılmıştır.

Giddey, Badwal, Munnings ve Dolan (2017) yaptıkları çalışmalarında yenilenebilir enerjinin taşınmasında bir enerji taşıyıcısı olarak amonyak potansiyelini değerlendirmek için çeşitli teknolojileri ve yolları tartıştıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, amonyağın farklı son kullanım uygulamaları için gidiş-dönüş verimliliği (RTE) üzerine bir analiz gerçekleştirerek konut uygulamaları için en iyi senaryo altında, proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresi ve katiodit yakıt hücresinin (SOFC) sırasıyla %39 (kombine ısıli gücü) ve %50 (kombine ısıli gücü) termal verimlilik ürettiği görülmüştür. Otomotiv sektörü

için, proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresi ve içten yanmalı motorlar sırasıyla %19 ve %21 ile en iyi gidiş-dönüş verimliliğini (RTE) ürettiği görülmüştür. Kombine çevrim türbini, %31'lik en iyi elektrik termal verimliliği üretebildiği hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerjiden amonyağa güç sağlamak için bu aşamada gerçekçi maliyet tahminleri yapabilmek için pek çok bilinmeyen olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, su elektrolizi yoluyla hidrojen üretiminin maliyetinin, güneş PV veya rüzgâr jeneratörlerinden gelen elektriğin fiyatı düştükçe, kg hidrojen başına 5–6 \$ altına düşeceği tahmin edildiği rapor edilmiştir. Bunun amonyak üretiminin maliyeti üzerinde önemli bir etkisi olacağı ve temiz ve karbonsuz enerjinin taşınmasında yeni bir endüstri yaratma potansiyeline sahip olacağı sonucuna varmışlardır.

Siddiqui ve Dincer (2019) yayınladıkları çalışmalarında, güç ve soğutmanın kojenerasyonu için hem amonyak hem de hidrojen yakıtlı içten yanmalı motor ve amonyak yakıt hücresi sistemini içeren yeni bir amonyak bazlı entegre sistem geliştirilmiştir. Entegre sistem, atık ısıyı geri kazanır ve soğutma ve üretim gücü elde etmek için verimli bir şekilde kullanır. Mevcut sistemin performansı termodinamik enerji ve ekserji yaklaşımları kullanılarak değerlendirilmiş ve hesaplanmıştır. Genel kojenerasyon sisteminin enerji verimliliği %59,9, ekserji verimliliği ise %51,9 olarak belirlenmiştir. Ayrıca amonyak yakıt hücresinin enerji verimliliği %44,4 olarak değerlendirilmiş ve ekserji verimi %41,7 olarak bulunduğu rapor edilmiştir. Ayrıca içten yanmalı motorun enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %45,7 ve %43,8 olarak belirlenmiştir. Değişen çalışma koşulları ve parametrelerdeki sistem performansını değerlendirmek için gerçek çalışma koşulları altında bazı parametrik çalışmalar yapıldığı vurgulanmıştır. Geliştirilen sistemin, sistem entegrasyonu, kojenerasyon ve atık ısı geri kazanımı yoluyla amonyak yakıt hücresi sistemlerinin performanslarını iyileştirmeye yönelik yeni bir yön sağlayacağı sonucuna da varılmıştır.

Boretti (2017) gerçekleştirdiği çalışmasında, çok sayıda varsayımla birlikte yeni bir NH_3 -dizel çift yakıtlı motor konseptinin bir simülasyonunu sunmuştur. NH_3 'ün taşınması H_2 'den kesinlikle daha kolay olsa da NH_3 'ün yakıt olarak uygulanmasının H_2 'den daha teknik sorunları olduğu vurgulanmıştır. Yakıt sisteminin ve motor bileşenlerinin korozyonu kullanım zorluklarına en önemli örnektir, dizel- NH_3 yakıtlı motor simülasyonundan sonra NO_x seviyelerinin uygun olmaması amonyak kullanımı için başka bir önemli sorun olarak

görülmüş ve en kritik zorluk olarak da yavaş ve eksik yanma gibi dezavantajların üstesinden gelinmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.4. Gaz Türbinleri

Gaz türbinleri, elektrik üretim kapasiteleri bakımından üç ana kategoriye ayrılmıştır. Bunlar, merkezi güç üretimi sağlayan ağır hizmet tipi gaz türbinleri (500MW'ye kadar), uçak motorlarında (genellikle 60MW'den az) güç üretimi sağlayan hafif gaz türbinleri ve dağıtılmış güç üretimi (5MW'den az) sağlayan mikro gaz türbinleridir.

Valera-Medina ve ark. (2015) makalelerinde jenerik bir girdaplı yanma odası ile bir gaz türbininde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmalar sırasında çalışma yakıtı olarak kullanılan amonyak ve hidrojen yanma odasına alınmadan önce hacimce %50-50 oranında karıştırılarak yanma odasına zayıf bir hava-yakıt karışımı alınması sağlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, amonyak-hidrojen yakıt karışımının metanın yanma özelliğine yakın bir alev hızı üretebileceğini doğruladığı sonucuna vardıklarını rapor etmişlerdir. Ancak, bu deneylerde yüksek NO_x emisyonlarının üretildiğini bildirmişlerdir.

Karabeyoğlu, Evans, Stevens, Cantwell ve Micheletti (2012) enerji üretiminde amonyak kullanımına ilişkin kapsamlı bir çalışma ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada, gaz türbinlerinde amonyak kullanımının insan sağlığına zararları ve fosil yakıtlar yerine amonyak kullanımının enerji üretim verimliliği hakkında bazı önemli noktalar sundular. Ayrıca, yanma reaksiyonundan kaynaklanan NO_x ve düşük yanma verimliliği nedeniyle reaksiyona girmeyen NH_3 emisyonlarını en aza indirmek için gaz türbinlerinde yakıt olarak amonyak kullanımına yönelik yeni teknolojilerin geliştirildiğini bildirdiler.

Verkamp, Hardin ve Williams (1967) yaptıkları çalışmalarında gaz türbini brülörünü test etmek için NH_3 ile deney yaptı ve yanma odasına girmeden önce NH_3 bağlarının zayıflamasının ve NH_3 'ün hidrokarbon katkı maddeleri ile zenginleştirilmesinin alev stabilitesini artırdığını belirtmişlerdir.

Xiao, Valera-Medina ve Bowen (2017) tarafından bir simülasyon programında gaz türbini modeli tasarlayan bir gaz türbininde amonyak-hidrojen yakıt karışımı ile başka bir çalışma

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, amonyak-hidrojen gaz karışımının yanma odasına girmeden önce kinetiği modellenerek, laminer yanma hızı, tutuşma gecikme süreleri ve NO_x emisyon üretimi gibi önemli yanma parametreleri de daha doğru ve tutarlı sonuçlar elde etmek için doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan bu kinetik modelin farklı eşdeğerlik oranlarında gerçek gaz türbini uygulamaları ile eşleştiğini göstermiştir. Ana modelle karşılaştırıldığında sonuçlar, gaz türbinlerinde yakıt olarak amonyak kullanımının yakıt karışımı olarak hidrojen ile daha uygun ve tutarlı sonuçlar verdiğini açıkça göstermektedir.

İki ve ark. (2015) tarafından önem arz eden gaz türbini ile ilgili başarılı çalışmalar 2014 yılında Japonya Ulusal İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST) tarafından yanma odasında yakıt olarak NH_3 -gazyağı-hava karışımı kullanılarak yapılmıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda, gazyağı ile çalışan bir gaz türbinine stabil bir güç çıkışı elde edildikten sonra, belirli oranda kerosen yerine kademeli olarak amonyak gazı eklenmeye başlanmıştır. Deneysel sonuçlarında 21 kW güç elde edilirken, hidrokarbon bazlı gazyağı kullanım oranının %70 ve kerosen yerine kullanılan amonyak gazı oranının %30 olduğu görülmektedir.

Kurata ve ark. (2017) deneylerinde, mikro gaz türbininde NH_3 -hava ve NH_3 - CH_4 -hava karışımı kullandılar. Sonuçlar, yüksek hızlarda NH_3 -hava karışımının yanma veriminin %89 ile %96 arasında olduğunu ve NH_3 - CH_4 -hava karışımının yanma stabilitesini daha da artırdığını, NO_x oluşumunu ve yanmamış NH_3 salınımını azalttığını bildirmişlerdir.

Hussein, Valera-Medina ve Alsaegh (2019) çalışmalarında girdap kullanılan bir brülör tasarlayarak amonyak ve hidrojen karışımının yanma performansını modellemiş ve incelemişlerdir. Bu sistemin birincil amacı, yanma odasında oluşan ana alev bölgesindeki farklı karışımlara çeşitli miktarlarda amonyak/hidrojen enjekte ederek NO_x emisyonlarının azaltılması için yeni yollar bulmaktır. Termal bağ kırımı için sisteminden alınan enjekte edilen amonyak/hidrojen karışımı (X) miktarı, sistemdeki mevcut toplam yakıtın hacimsel olarak %0-4'ü arasında değişirken, sisteme gönderilen gazın geriye kalanı (1,00-X) daha sonra brülöre ana yakıt olarak gönderilmektedir. Tahminler, daha önce yaklaşık 10 kW çıkış güçlerinde karakterize edilmiş bir girdaplı brülörde eşdeğerlik oranı $\phi = 1,2$ olan düşük basınç ve zengin koşullar altında gerçekleştirildiği rapor edilmiştir. Amonyak ve hidrojen karışımları hacimce %50 NH_3 'ten geri kalan gaz hidrojen olarak belirlenmiş ve

NH_3 hacimce %10 artışlı adımlarla devam ettirilmiştir. Sonuçlar, minimum yanmamış amonyak ve daha yüksek alev sıcaklığının, diğer karışımlara kıyasla %60-%40 $\text{NH}_3\text{-H}_2$ oranında, ancak yüksek NO emisyonlarıyla elde edildiğini göstermişlerdir. Bu NO seviyeleri, brülörün yeni tasarımıyla sağlanan ve egzozdaki NO emisyonunu azaltan, bir sirkülasyonda ana alev bölgenin hemen ardına az miktarda NH_3/H_2 karışımı ($X = \%4$) enjekte edilerek azaltıldığı sonucuna varılmıştır.

Yapıcıoğlu ve Dincer (2019) çalışmalarında teknik, ekonomik ve çevresel performans kriterlerine göre temiz amonyak sentezi için yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirmekte ve tartışmaktadır. Temiz amonyak üretim yöntemlerini iyileştirmek için çok sayıda potansiyel strateji de araştırılmıştır: sıvı-elektrolit bazlı sistemler, kompozit membran bazlı sistemler, katı hal elektrolit, seramik / inorganik proton iletken katı elektrolit bazlı sistemler, polimer membran bazlı sistemler, O_2 iletken membran bazlı sistemler ve erimiş tuz bazlı elektrokimyasal sistemler. Ayrıca, ticari olarak temin edilebilen çeşitli jeneratör türlerini amonyak yapabilecek şekilde dönüştürmek için bazı potansiyel yöntemler, sahada gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayanılarak önerilmiş ve tartışılmıştır. Sonuç olarak amonyak yanması ile ilgili araştırmacılar, amonyağın yanması için asıl sorunun, yanma sürecini başlatmak için genellikle ikincil bir yakıt kaynağı gerektiren yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları olduğu konusunda hemfikir olduklarını bildirmişlerdir. Ateşleme görevi gören ikincil yakıt kaynağı, amonyak yakıtının daha düşük sıcaklıklarda ve basınçlarda yanması için bir kıvılcım görevi görerek istenilen yanma prosesinin başlatılması sağlanacağını rapor etmişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar, amonyak kullanımına uygun bir hale dönüştürülmüş jeneratörün performansının orijinal performansından önemli ölçüde daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Bunun yanında emisyonlarla ilgili olarak, amonyak kullanıldığında CO_2 emisyonu olmadığı, ancak NO_x emisyonlarının oluşumu dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Yine de, fosil yakıtların yerini alacak karbon içermeyen yakıt teknolojilerine olan güçlü ihtiyaç, amonyak jeneratörlerini gelecekte ticari pazarda potansiyel olarak uygulanabilir bir seçenek haline getireceği sonucuna varılmıştır.

Hosseini (2020) çalışmasında, hibrit elektrik gücü ve hidrojen yakıtı üretmek için yüksek sıcaklık elektrolizörüne (HTE) entegre edilmiş bir güneş gaz türbini (SGT) sisteminin performansı analiz edilmektedir. Bu tasarımın temel amacı, elektrik enerjisi iletimindeki kayıpları azaltmak ve yüksek sıcaklık elektrolizöründe kullanılmak üzere buhar yapmak

için gaz türbininden (GT) salınan egzoz gazlarının entalpisini kullanılması olarak sunulmuştur. Bu bağlamda, bir GT sistemi, heliostat güneş sahası ve merkezi alıcı içeren bir güneş kulesi ile birleştirilerek elektrik enerjisi üretilmektedir. Yüksek sıcaklık elektrolizöründe kullanılmak üzere buhar yapmak için, SGT sistemine oksitleyici olarak aşırı yüksek sıcaklıkta egzoz gazlarını uygulayan alevsiz bir kazan entegre edilmiştir. Sonuçlar, güneş enerjisi alıcı çıkış sıcaklığının 800 K'den 1300 K'e çıkarılmasıyla sisteme giren toplam enerjinin güneş enerjisi payının %22,1'den %42,38'e yükseldiğini ve tesisin toplam yakıt tüketiminin 7 kg/s'den 2,7 kg/s'ye düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, türbin giriş sıcaklığı (TIT) 1314 K'den yüksek sıcaklıklarda tutulurken kazanda alevsiz moda ulaşılabildiği bildirilmiştir. Ayrıca yazarlar, sabit miktarlarda SGT elektrik gücü kullanılarak HTE voltajı, HTE buhar sıcaklığının artmasıyla azaldığı ve sonuç olarak genel hidrojen üretiminin arttığı rapor edilmiştir. HTE buhar sıcaklığını 950 K'den 1350 K'ye yükseltmek için alevsiz kazandaki yakıt tüketim oranı 0,1 m/s'den 0,8 m/s'ye çıkmaktadır; ancak HTE hidrojen üretimi 4,24 mol/s'den 16 mol/s'ye yükseldiğinden, daha yüksek buhar sıcaklıklarının karşılanabilir olacağı yorumlanmıştır.

Di Gaeta, Reale, Chiariello ve Massoli, (2017) yayınladıkları makalede, standart (yani doğal gaz veya metan) ve alternatif yakıtların (yani hidrojen) karışımlarıyla beslenen ticari bir 100 kW Mikro Gaz Türbini'nin (MGT) dinamik bir modelinin geliştirilmesini ele almaktadır. Model, elektrik enerjisi üretimi sırasında kendi kontrol sistemi tarafından empoze edilen MGT'nin baskın dinamiklerini tanımlayan birinci dereceden diferansiyel denklemden (ODE) oluşmaktadır. Elde edilen model, MGT'nin farklı ortam koşullarında ve farklı yakıt karışımları ile bir dizi güç aşaması tepkisi için deneysel olarak doğrulanmıştır. Model, enerji taşıyıcısı hidrojenin gelişmiş kullanımına dayanan hibrit enerji şebekelerinin (HEG'ler) simülasyonu ve kontrolü uygun hale getirmiştir. Bu bağlamda, MGT modeli, hidrojen depolaması ve bunun MGT'de yeniden kullanımı ile yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının uygun bir karışımına dayanan bir HEG simülasyonunda kullanıldığı bildirilmiştir. Burada MGT, enerji talebine göre yenilenebilir enerjilerin (güneş ve rüzgar gibi) eksikliklerini telafi etmek için programlanabilir bir enerji vektörü olarak kullanılırken, fazla yenilenebilir enerji suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretmek için kullanılır. Simüle edilmiş HEG, bir solar fotovoltaik (PV) tesisi (300 kW), doğalgaz ve hidrojen karışımları ile beslenen bir MGT (100 kW), bir su elektrolizörü (WE) sistemi (8 bar, 56 Nm³/saat), bir hidrojen tankı (54 m³) ve bir Enerji Yönetim Kontrol Sistemi (EMCS) içermektedir. Sonuçlar, fosil yakıtta

(doğal gaz) yaklaşık %37,5'lik bir tasarruf sağladığını ve hibridizasyon olmayan senaryoya göre yaklaşık 1913 kg hidrojen üretimi sağladığını göstermektedir. Yazarlar, hibridizasyon, depolanan hidrojen, ikincil yakıt olarak MGT'de yeniden kullanıldığında, fosil yakıt tasarrufu %41,5'e kadar arttığını raporlamışlardır.

Valera-Medina, Pugh, Marsh, Bulat, ve Bowen (2017) hazırladıkları makalelerinde, gaz türbini çalışmalarında kullanılan genel bir girdaplı yakıcıda önceden karıştırılmış fakir yanma için hacimce 50:50 bir amonyak-hidrojen karışımının kullanıldığı sayısal ve deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadırlar. Sonuçlar, karışımın, hemen hemen eşdeğer laminer alev hızı özelliklerine sahip karışım ile metana benzer iyi bir alev hızı üretebilmesine karşın, bu koşullar altında hidrojenin yüksek yayılma hızının, sınır tabakası geri tepme potansiyeli olan dar bir operasyonel kullanıma yol açtığını göstermektedir. Yanma reaksiyonları sırasında OH ve O radikallerinin fazla üretimi nedeniyle yüksek NO_x emisyonları üretildiği kaydedilmiştir.

Keller, Koshi, Otomo, Iwasaki, Mitsumori ve Yamada (2020) yayınladıkları çalışmalarında, enerji üretmek için yakıt olarak kullanılan amonyak neticesinde ortaya çıkan yüksek NO_x sorunu çözmek için, gaz türbininin yakıt açısından zengin koşullar altında çalıştırıldığı ve yanmamış hidrojenin ısı geri kazanım buhar jeneratöründe (HRSG) yakıldığı egzoz gazı devridaimini (EGR) içeren bir kombine çevrim konfigürasyonu önermişlerdir. Böylelikle gaz türbininin baca gazında bulunan hidrojen, çıkış gücünü arttırmakta ve sistemin ısıl verimini iyileştirdiği belirtilmektedir. Ayrıca yazarlar, EGR'li kombine sistemin egzoz gazının O₂ içermediği ve yanma sıcaklığı, eşdeğerlik oranı değiştirilmeden düşürülebildiği görülmüştür. Önerilen sistem termodinamik modelleme ile değerlendirilmiş ve yüksek termal verimlilik korunurken düşük NO_x emisyonlarının elde edilebileceği bulunmuştur. Türbin giriş sıcaklığını teknik olarak uygun bir seviyenin altında tutmak için soğuk EGR'nin gerekli olduğu düşünülmektedir ve ısıl verimlilik ile yakıcı çıkışındaki NO_x konsantrasyonu arasında bir denge gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu proses için ideal çalışma koşullarının teknik olarak uygun türbin giriş sıcaklığına, EGR oranına ve egzoz gazındaki izin verilen NO_x konsantrasyonuna bağlı olduğu raporlanmıştır.

Božo, Viguera-Zuniga, Buffi, Seljak, ve Valera-Medina (2019) çalışmalarında, amonyak-hidrojen enerji üretiminin kullanımı için rekabetçi sistemler sağlamak üzere

nemlendirilmiş metodolojilerle birlikte amonyak / hidrojen karışımlarının kullanımının verimliliğini belirlemek için gerçekleştirilen bir dizi analitik, sayısal ve deneysel incelemelerde bulunmuşlardır. Makalede önceden deneysel olarak kalibre edilmiş sistemlerin verimliliklerini belirlemek için hazır analitik kodlarla kombinasyon halinde yeni reaksiyon kimyasal kinetiği kullanan CHEMKIN-PRO reaksiyon ağları kullanılarak gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Son olarak, bu karışımların potansiyelini belirlemek için buhar enjeksiyonu kullanılarak deneysel denemeler yapılmıştır. Yeni sonuçlar, nemlendirilmiş amonyak-hidrojen enjeksiyonunun kullanımının hem Kuru Düşük Nitrojen Oksitlere hem de nemlendirilmiş metan bazlı teknolojilere yaklaşık %30 benzer verimlilik sağladığını ve alevlerin kararlı ve düşük kirlilikte olduğunu gösterdiği sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sunulan tez çalışmasında, hidrojen ve HHO gazı ile zenginleştirilmiş NH_3 yakıtı, yapısal bir değişiklik olmaksızın 1 kW gücündeki bir gaz türbininde kullanılmıştır. Deneyler sırasında güneş enerjisi panelleri kullanılarak elde edilen güç ile elektroliz sonucu HHO gazı üretilmektedir. Hidrojen ve HHO gazı yapılan deneylerde ana yakıt olarak kullanılmayacaktır, sadece yakıt zenginleştirme amaçlı kullanılacaktır. Deneyler sırasında kullanılacak yakıtlar ve yakıt karışımları da bu bölümde detaylı bir şekilde sunulacaktır. Her deneyde deneylere başlamadan önce ortam sıcaklığı 24 °C'ye ayarlanmıştır, böylece yapılan deneylerde yakıt karışımı farklılıklarının performans ve emisyonlara etkisi doğrudan görülmüş ve deneyler boyunca havanın yoğunluğunun sabit kalması sağlanmıştır. Deneyler sırasında kullanılan bütün ölçüm cihazları ve Ek olarak, veri toplamaya başlamadan önce, çalışmayı stabilize etmek için deney seti her deneyde 5 dakika süreyle çalıştırılarak sistem sıcaklığı optimize edilmiştir.

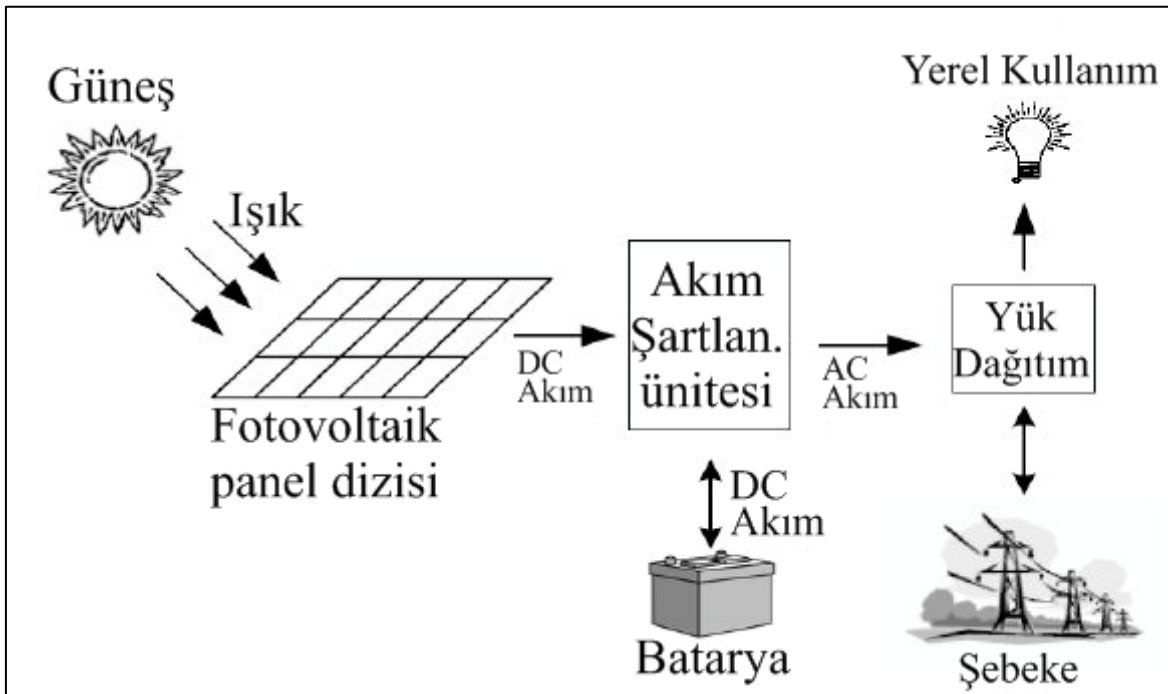
3.1. Güneş Enerjisi Fotovoltaik (PV) Güç Üretimi

Bir fotovoltaik (PV) sistem, elektrik üretmek için Güneş'ten gelen enerjiyi kullanan bir inverter ve diğer elektrikli ve mekanik donanımla birleştirilmiş bir veya daha fazla güneş panelinden oluşur. PV sistemleri, küçük çatı üstü veya taşınabilir sistemlerden devasa kamu hizmeti ölçekli üretim tesislerine kadar büyük farklılıklar gösterebilir. PV sistemleri kendi başlarına şebekeden bağımsız PV sistemleri olarak çalışabilirler de elektrik şebekesine veya şebekeye bağlı PV sistemlerine bağlı sistemlerin kullanımı da oldukça yaygındır.

Fotovoltaik etki, güneş ışığına maruz kaldığında bir fotovoltaik hücrede voltaj veya elektrik akımı üreten bir süreçtir. Panel içindeki hücrelerin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmesi nedeniyle güneş panellerini kullandığımız bu etkidir. Fotovoltaik etki ilk olarak 1839'da Edmond Becquerel tarafından keşfedildi (Boyle, 2004). Islak hücreler üzerinde deneyler yaparken, gümüş plakaları güneş ışığına maruz kaldığında hücrenin voltajının arttığını fark etti.

Foton adı verilen enerji paketlerinden oluşan Güneş'ten gelen ışık, bir güneş paneline düşer ve fotovoltaik etki adı verilen bir işlemle elektrik akımı oluşturur. Her panel nispeten az miktarda enerji üretir, ancak bir güneş dizisi olarak daha yüksek miktarda enerji üretmek

için diğer panellerle birbirine bağlanabilir. Bir güneş panelinden (veya diziden) üretilen elektrik, doğru akım (DC) biçimindedir. Telefonunuz veya dizüstü bilgisayarınız da dahil olmak üzere birçok elektronik cihaz DC elektrik kullansa da, alternatif akım (AC) sağlayan (ve gerektiren) elektrik şebekesini kullanarak çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, güneş elektriğinin faydalı olabilmesi için öncelikle bir inverter kullanılarak DC'den AC'ye dönüştürülmesi gerekir. Eviriciden gelen bu AC elektriği daha sonra yerel olarak elektroniklere güç sağlamak için kullanılabilir veya başka yerlerde kullanılmak üzere elektrik şebekesine gönderilebilir. Şekil 3.1'de güneş enerjisinden fotovoltaik (PV) paneller kullanılarak enerji üretimi ve kullanımını gösterilmektedir.

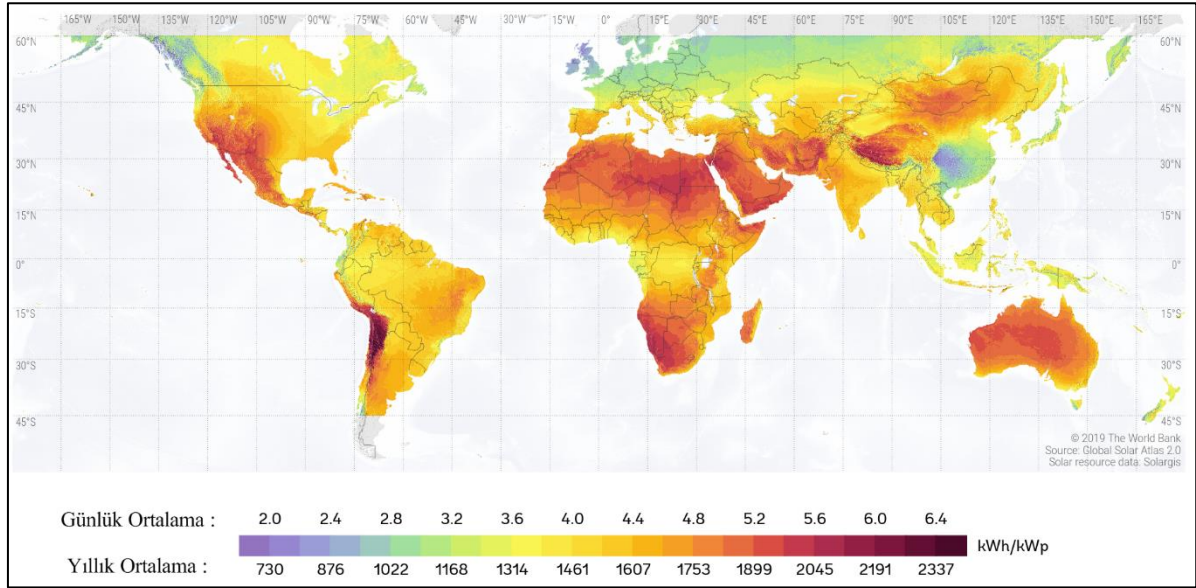


Şekil 3.1. Güneş enerjisi fotovoltaik (PV) panel güç üretim ve dağıtım şeması

Güneş ışığı, AM0 veya "sıfır hava kütlesi" olarak tanımlanan metrekare başına 1367 watt kuvvetle Dünya'nın dış atmosferine ulaşır. Güneş bulutsuz bir günde doğrudan tepede olduğunda, atmosferik kayıplar güneşin gücünü yaklaşık 1000 W/m^2 'ye düşürür (Jack, 1991). Güneş enerjisinden elde edilen gücün yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının şiddeti ile doğrudan bağlantılı olması, üretilen gücün de birim maliyetini belirleme de etkin rol oynamaktadır. Bu nedenle kurulacak güneş enerji santralleri için bölge ve alan seçimi önem arz etmektedir.

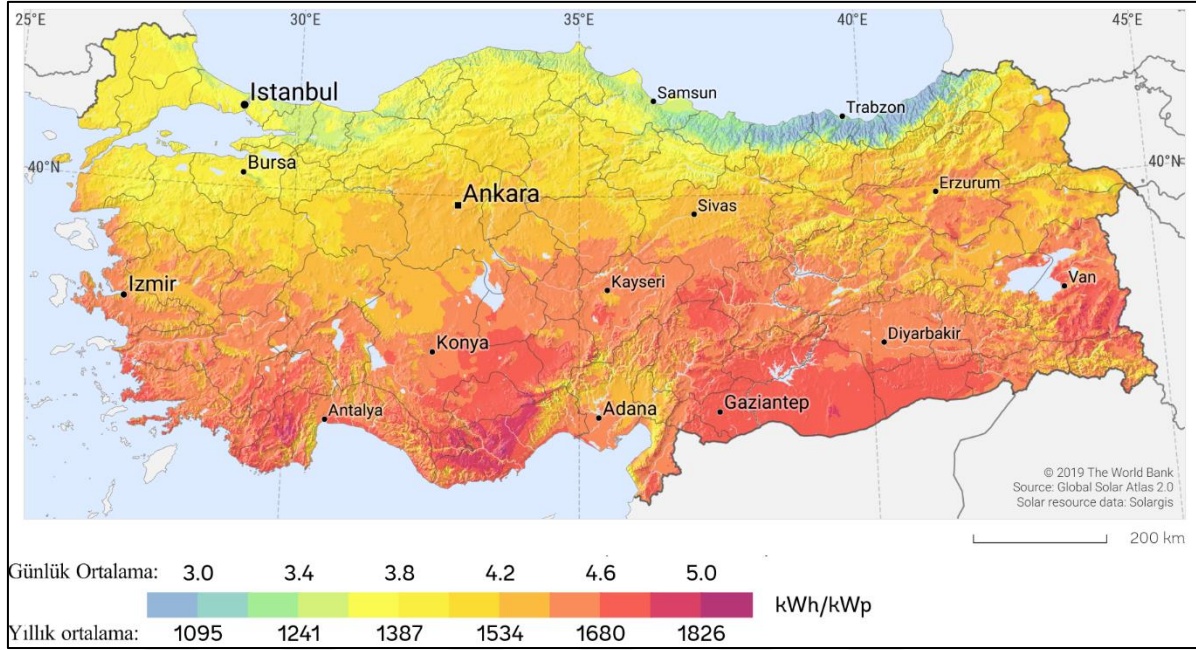
Gün içerisinde dünyanın yüzeyine ulaşan güneş ışınları hem dünyanın geometrik şekli, hem de güneşin konumu göz önünde bulundurulduğunda coğrafi konuma göre de

değişiklik göstermektedir. Dünya yüzeyine ulaşan ve enerji üretmek için kullanılan güneş ışınımı ile günlük ve yıllık ortalama güç üretimi dağılımları Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Fotovoltaik güç potansiyelinin uzun vadeli ortalaması (ESMAP, 2019)

Aynı şekilde ülkemiz için fotovoltaik panellerden enerji üretim potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda Türkiye için ücretsiz, web tabanlı bir uygulama olan Global Solar Atlas 2.0'dan elde edilen harita Enerji Sektörü Yönetim Yardımı Programı (ESMAP) tarafından sağlanan fonla Solargis verilerini kullanan Dünya Bankası Grubu adına Solargis s.r.o. şirketi tarafından geliştirilmiş ve düzenlenmiştir. Bu veriler hangi bölgelerde yatırım yapılmasının daha doğru olduğu, yıllık ve günlük bazda ortalama enerji üretim potansiyelini göstermektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Fotovoltaik güç potansiyelinin uzun vadeli ortalaması (1994-2018) (ESMAP, 2019)

Güneş panellerinden güç hesabı yapmak için öncelikle atmosfer dışında yılın herhangi bir zamanında güneşten gelen fotonların atmosfer tabakasına gelene kadar içerdiği tüm dalga boylarında güneş ışınımı olarak incelenmesi gerekmektedir. Tüm dalga boylarında güneş ışınımı (G_{on}) olarak adlandırılmaktadır.

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.1)$$

denklemden yer alan n ifadesi gün sayısını temsil eder ve yılın başlangıcı olan 1 Ocak tarihinden itibaren hesap yapılan güne kadar geçen gün sayısını gösterir.

Güneş potansiyeli hesabı yapılırken, panellerin kurulduğu ve güneş ışınlarının güneşin konumu itibari ile panellerin kurulu olduğu bölgeye belirli bir açı ile ulaştığı bilinmektedir. Burada önemli 2 (iki) açı bulunmaktadır. Biri enlem açısı (θ) diğeri de deklinasyon açısı (δ)'dır. Enlem açısı panellerin kurulumu belirlenen noktanın ekvator çizgisi ve dünyanın merkezini birleştiren doğrular düzlemindeki konumudur. Kuzey yönü pozitif olmak üzere, bu düzlemde -90° ile $+90^\circ$ arasında güneş ışınlarının geldiği açı değişebilmektedir. Deklinasyon açısı (δ) ise, yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının dünyanın geometrik şekli ve güneş sistemindeki yörüngeyle yapmış olduğu $23,27^\circ$ 'lik açıdan kaynaklandığı bilinmektedir. Yer yüzüne güneş ışınlarının iniş açısı da solistisler arası, $-23,45^\circ$ 21 Aralık (kış solistisi) ve $+23,45^\circ$ 21 Haziran (Yaz solistisi), değişmektedir. Bu değerlerin

ekinoklarda, 21 Mart ve 23 Eylül, 0° olduğu bilinmektedir. Bu tarihler arasında güneş ışınlarının deklinasyon açısının hesaplanması için gerekli formül (3.2) ile gösterilmektedir:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (3.2)$$

denklemden yer alan n ifadesi gün sayısını temsil eder ve yılın başlangıcı olan 1 Ocak tarihinden itibaren hesap yapılan güne kadar geçen gün sayısını gösterir (Üstün, 2018).

Güneş ışınları dünyamızın geometrik şekli itibarıyla ile dünyamıza dar bir alanda dik düşmektedir. Bu sebeple güneş panelleri buldukları konuma yatay yerleştirilir ve güneşi en dik alacak şekilde yatay ile bir açı yaparak maksimum güneş ışığından faydalanılması sağlanır. Yatay ile yapılan bu açıya eğim açısı (β) denir. Yine dünyamız düz olmadığı için dünyanın merkez ekseninden uzaklaştıkça yatay düzlem yüzey normali ile bir açı yapmaktadır buna yüzey azimut açısı (γ) denir. Yüzey azimut açısı bir sistemin güneyinde 0° 'dir. Bu da fotovoltaik panellerden maksimum verim almamızı sağlar ve referans noktası olarak kabul edilir. Sistemin batısına gidildikçe azimut açısı 90° olur. Saat açısı ise, günümüzde kullandığımız güneş saatinin hesaplanması için gerekli olan ve dünyamızın kendi eksenini etrafında tam tur 360° dönmesi için geçen toplam zaman diliminin birim zamana çevrilmesi ile bulunur. Bu sebeple saate 15° dönen dünyamız meridyenler arası açısal olarak yer değiştirdiğinde saat açısını (ω) belirlemiş oluruz:

$$\omega = 15(GS - 12) \quad (3.3)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilir ve (GS) güneş saatidir.

Bütün bu parametreler ile birlikte yeryüzüne düşen güneş ışınlarının geliş açısı (θ) atmosfer tabakasından yer kabuğuna çarpan ışın demetinin çarptığı yüzeyin normali ile yaptığı açı olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte yatay bir yüzeye çarpan güneş ışını demetlerinin geliş açısı da Zenit açısı (θ_z) olarak adlandırılmaktadır. Bu açı hesaplanırken;

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta\sin\varnothing\cos\beta - \sin\delta\cos\varnothing\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\varnothing\cos\beta\cos\omega \\ & + \cos\delta\sin\varnothing\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \end{aligned} \quad (3.4)$$

bağıntısı kullanılır ve yatay bir yüzey ele alındığında ($\beta=0^\circ$) olur. Ve hesaplanacak güneş ışınları demetinin zenit açısı (θ_z)'dir. Eşitlik 3.5'te trigonometrik bağıntılar kullanılarak;

$$\cos\theta_z = \cos\delta\cos\phi\cos\omega + \sin\delta\sin\phi \quad (3.5)$$

zenit açısı hesaplanabilmektedir.

Güneş batarken ise, güneşin konumunun en batıda olduğu dikkate alındığında zenit açısı $\theta_z = 90^\circ$ 'dir ve eşitlik (3.5) tekrar yazıldığında eşitlik (3.6) ve eşitlik (3.7) meydana gelmektedir;

$$\cos\omega_s = -\frac{\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta} \quad (3.6)$$

$$\cos\omega_s = -\tan\phi\tan\delta \quad (3.7)$$

Güneş açısı ve zenit açısı dikkate alındığında gün uzunluğunu eşitlik (3.8) ile hesaplamak mümkündür;

$$S_0 = \frac{2}{15} \cos^{-1} - \tan\phi\tan\delta = \frac{2}{15} \omega_s \quad (3.8)$$

Güneş ışınlarının konumu ve açısı ile ilgili hesaplamalar yeryüzüne gelen foton demetinin düzlemdeki konumunu belirlememize yarar fakat şiddeti hakkında bilgi vermez. Güneşten dünyamıza doğru hareket eden güneş ışınları atmosfere girmeden önce birçok cisimle karşılaşılırlar. Bu cisimlerle karşılaştıklarında yatay olarak cisme etki eden güneş ışınımı eşitlik (3.9) ile hesaplanmaktadır (Ustun, Karakus, ve Yagli, 2020):

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \left[\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi\sin\delta \right] \quad (3.9)$$

Daha sonra atmosfer tabakasını geçerek dünyamıza herhangi bir bölgede yatay olarak gelen ortalama günlük güneş ışınımını bulmak için eşitlik (3.10) olarak verilen Angstrom-Page modeli kullanılmaktadır;

$$\frac{H}{H_0} = \left(a + b \frac{s}{s_0} \right) \quad (3.10)$$

burada;

H; yatay düzleme ortalama günlük güneş ışını miktarını,

H₀; aylık ortalama atmosfer dışında yatay düzleme gelen güneş ışını miktarını,

a, b; güneş ışınlarının şiddetinin hesaplandığı bölgelerin sabitlerini göstermektedir.

$\frac{s}{s_0}$; ise göreceli güneşlenme süresidir.

Bu denklemleri bir arada vermemize yarayan bölgeye bağlı bir parametre kullanılabilir. Bu parametre k_T olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik (3.11) de verilen oran atmosfer dışında ve yer yüzünde yatay düzlemde ölçülen ışın demeti şiddetinin oranını göstermektedir.

$$k_T = \frac{H}{H_0} \quad (3.11)$$

Gerçekleştirilen tez çalışmasında fotovoltaik güneş paneli kullanılarak elde edilen güç ile bir akü beslemesi yapılmaktadır. Deneyler sırasında ve deneylerin yapılmadığı zamanlarda akünün şarj olmasını sağlayan güneş paneli Şekil 3.4' te verilmiştir.



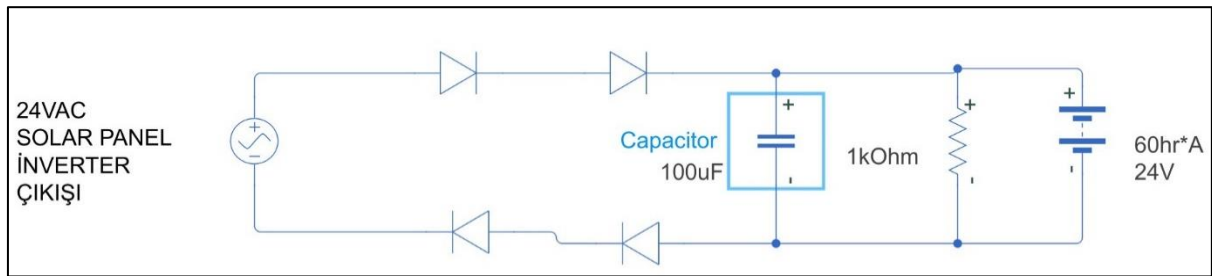
Şekil 3.4. Fotovoltaik Güneş enerjisi panelleri

Kullanılan fotovoltaik panellerin boyut, performans ve hücre sayısı gibi özellikleri çizelge 3.1 de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Güneş Paneli Özellikleri

Özellik	İndis	Birim	Değer
Maksimum Güç	Pmaks	Wp	80
Güç Toleransı	-	%	±0,3
Maksimum Gerilim	Vmaks	V	18,3
Maksimum Akım	Imaks	A	4,37
Açık devre Gerilimi	VOC	V	22,2
Kısa devre Akımı	ISC	A	4,69
Maksimum sistem gerilimi	VDC	V	1000
Sıcaklık / Güç Katsayısı	%/K	W	-0,47
Sıcaklık/Gerilim Katsayısı	MV/K	V	-0,36
Sıcaklık / Güç Katsayısı	%/K	A	0,033
Çalışma Sıcaklığı		oC	-40 , +85
En		mm	750
Boy		mm	1270
Kalınlık		mm	30

Şekil 3.3 te görülen güneş panelinden elde edilen güç hem enerji üretimi sırasında akü ile birlikte HHO jeneratörünü besliyor hem de üretim olmayan zamanlarda aküyü beslenmesi istenilmektedir. Yapılan devre tasarımı şeması şekil 3.4'te verilmiştir.

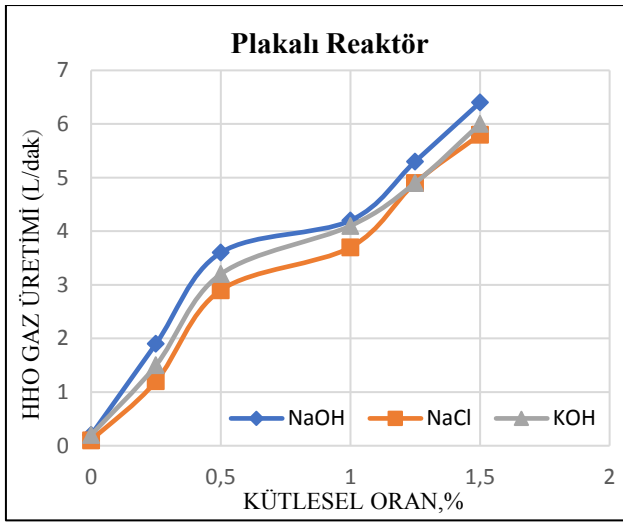


Şekil 3.4. Fotovoltaik Güneş enerjisi panelleri ve akü bağlantı şeması.

3.2. Hidroksi (HHO) gaz jeneratörü

Su elektrolizi ilk olarak 1789'da Hollandalı tüccarlar Jan Rudolph Deiman ve Adriaan Paets van Troostwijk tarafından suya batırılmış iki altın elektrot arasında elektrostatik deşarj oluşturmak için elektrostatik bir jeneratör kullanarak gösterilmiştir (De Levie, 1999). Su elektrolizi, elektriğin suyu iki gaza, hidrojen ve oksijene ayırmak için

kullanıldığı elektrokimyasal bir işlemdir (Acar ve Dincer, 2018). Elektroliz hücresinde kullanılan elektrolite göre üç ana teknoloji ayırt edilebilir: sıvı elektrolit ile alkalin elektroliz; asidik bir iyonomer ile polimer elektrolit membran (PEM) elektrolizi ve elektrolit olarak bir katı oksit ile yüksek sıcaklıkta (HT) buhar elektrolizi (Samolinka, 2009). Bu tez çalışmasında NaOH ve saf su ile hazırlanan çözeltinin plakalı reaktörler kullanılarak elektroliz işlemi yapılmaktadır. Kullanılan elektrolit seçimi yapılırken literatürde bulunan çalışmalardan yararlanılmış ve plakalı reaktörler için üretim kapasitesi en yüksek olan elektrolit seçimine dikkat edilmiştir. Şekil 3.5 plakalı elektroliz reaktörleri için elektrolit seçimi yapmamıza yarar sağlamaktadır (Aydin ve Kenanoğlu, 2018).

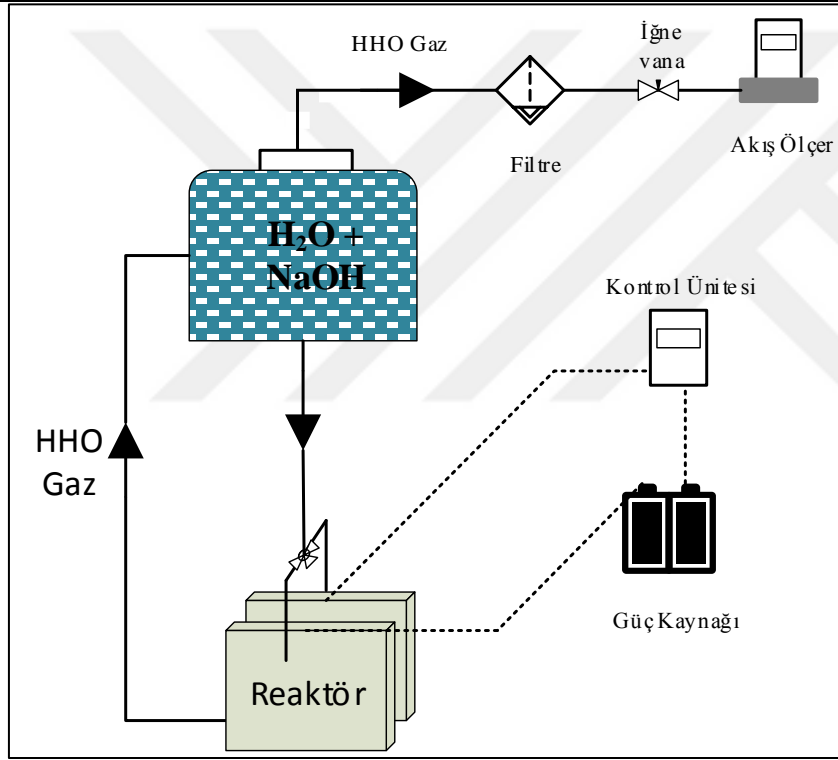


Şekil 3.5. Elektrolitlere göre Hidroksi (HHO) gaz üretimi

Hidroksi Gaz (HHO) bir ticari markadır ve (teorik olarak) %66 H₂ ve %33 O₂ içeren H-OH su moleküllerinin ayrılmasıyla elde edilir (Yılmaz, Uludamar Aydin, 2010). Elektroliz, suyu katotta (+) hidrojene ve anotta (-) oksijene ayırmak için bir elektrik akımı kullanır. Çalışmada kullanılan HHO gaz üretim şeması şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bununla birlikte, kullanılan HHO sisteminin elemanları ve teknik özellikleri çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2: HHO gaz üretim sistemi elemanları ve teknik özellikleri

Özellik	Birim (Açıklama)	Değer
Maksimum HHO üretimi	L/dak	15
Elektrotlar (Anot-Katot)	316L paslanmaz çelik	14x14
Maksimum voltaj	V	24
Maksimum akım	A	30
Reaktör Hacmi	L	1,5
Maksimum çalışma sıcaklığı	°C	65
Plaka En*Boy	mm	120*120



Şekil 3.6. Hidroksi (HHO) gaz üretim ve bağlantı şeması.

Elektroliz işlemi sırasında harcanan elektrik enerjisi suyu atomlarına ayrıştırırken kimyasal reaksiyonlar sonucu bağ kırılmasından meydana gelen sıcaklık artışı görülmektedir. Bu sıcaklık artışı belirli seviyeye kadar HHO gaz üretim miktarını artırırken, yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça kaynama başlar ve elektroliz işleminin gerçekleştiği plakaların temas ettiği sıvı yüzeyi azalır. Bunun önüne geçmek için sistem sıcaklığına duyarlı ve üretim optimizasyonu yapan çalışmalar bulunmaktadır (Baltacıoğlu, 2019).

Suyun elektroliz ile ayrışma işleminde, genel olarak elektrolitik hidrojen, sulu kostik potas veya soda çözeltisinin elektroliz edilmesiyle üretilir. Katottaki elektrokimyasal reaksiyon (Lamy, 2016);



bu, e'nin elektronu gösterdiği hidrojen oluşumudur. Anotta, reaksiyon tarafından oksijen üretilir;



Yukarıdaki denklemler genel HHO üretim reaksiyonunun eşitlik 3.14 ile elde edilmesini sağlar:



Katot , E_c , ve anotta , E_a , denge potansiyelleri şu şekilde temsil edilir:

$$E_c = E_{\text{H}_2}^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}^2}{a_{\text{OH}^-}^2 a_{\text{H}_2}} \quad (3.15)$$

3.3. Gaz Türbini

Gaz türbini, gaz veya sıvı yakıtların yanması sonucu elde edilen basınçlı havayı türbinlerde mekanik enerjiye dönüştürebilen bir içten yanmalı motordur. Türbinlerde elde edilen bu mekanik enerji daha sonra elektrik enerjisi üreten bir jeneratörü çalıştırır ve elektrik enerjisi üretimi yapılmaktadır. Elektrik enerjisi, evlere ve işyerlerine elektrik hatları boyunca dağıtılır.

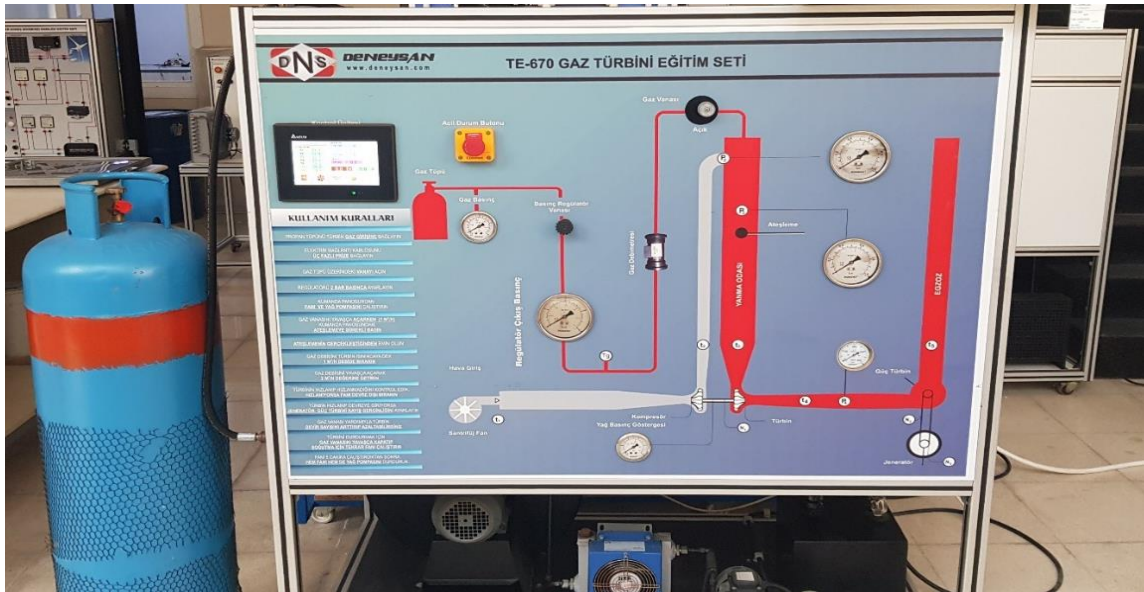
Elektrik üretmek için, gaz türbini çok yüksek sıcaklıklarda hava ve yakıt karışımını ısıtır ve türbin kanatlarının dönmesine neden olur. Dönen türbin, enerjiyi elektriğe dönüştüren bir jeneratörü çalıştırır.

Gaz türbinleri, son derece verimli bir şekilde enerji elde etmek için bir kombine çevrim enerji santralinde bir buhar türbini ile birlikte kullanılabilir.

➤ Hava-yakıt karışımı tutuşur.

- Gaz türbini havayı sıkıştırır ve daha sonra son derece yüksek sıcaklıklarda yakılan yakıtla karıştırarak sıcak bir gaz oluşturur.
- Sıcak hava yakıt karışımı yanma sonrası gaz türbin kanatlarını döndürür.
- Sıcak hava ve yakıt karışımı, türbindeki kanatların içinden geçerek hızlı bir şekilde dönmelerine neden olur.
- Dönen bıçaklar, tahrik milini döndürür.
- Hızlı dönen türbin kanatları, türbin tahrik milini döndürür.
- Türbin dönüşü jeneratöre güç sağlar.
- Dönen türbin, bakır tel bobinleriyle çevrili büyük bir mıknatısı döndüren bir jeneratörde çubuğa bağlanır.
- Jeneratör mıknatısı, elektronların hareket etmesine neden olur ve elektrik oluşturur.
- Hızlı dönen jeneratör mıknatısı, elektronları bakır bobinlerin etrafında hizalayan ve hareket etmelerine neden olan güçlü bir manyetik alan oluşturur.
- Bu elektronların bir tel boyunca hareketi elektrik akımı oluşmasını sağlar.

Bu çalışmada kullanılan gaz türbini Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Deneysel test teçhizatı, ortamdaki temiz havayı emen bir kompresör, kompresörden gelen sıkıştırılmış havanın ve enjektörden gelen yakıtın yakıldığı bir yanma odası, kanatlı türbin rotoru ve bir jeneratör. Kullanılan gaz türbini elemanları ve yardımcı cihazların teknik özellikleri Çizelge 3.3’te belirtilmiştir.

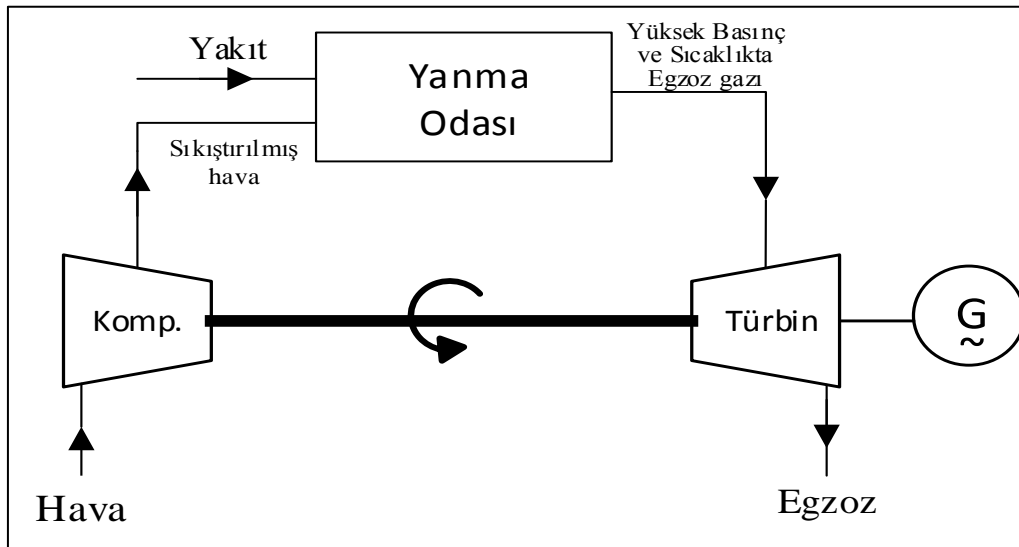


Şekil 3.7. Gaz türbini test düzeneği

Çizelge 3.3. Gaz türbini elemanları ve yardımcı cihazların teknik özellikleri

Komponent	Adedi	Özellikler
Net Türbin gücü	1	1000 W
Radyal Fan	1	220/380 Volt, 1,1 kW, 2800 d/d, 450 m ³ /s, 400 mm/ss, Emiş çapı: 120 mm, Çıkış çapı: 70 mm
Akış Ölçer	1	For NH ₃ , Propane and HHO
Yağlama Pompası	1	1380 d/d, 220 V AC, 180 W
Ateşleme trafosu	1	Çift çıkışlı 220 V AC, 5000 V
Jeneratör	1	1500 d/d, 24 V DC , 1600 W

Açık çevrim gaz türbini, ortam koşullarında taze atmosferik havayı, havanın bir santrifüj veya eksenel akış kompresörü tarafından sıkıştırılarak sisteme çekme prensibine göre çalışır (Polyzakis, Koroneos, ve Xydis 2008). Kompresör, atmosferik havanın sıcaklığını ve basıncını belirtilen seviyelere yükselmek için kullanılmaktadır. Daha yüksek basınçtaki sıkıştırılmış hava, yakıtın sabit bir basınçta yakılacağı bir yanma odasına beslenir (Yağlı, Koç, Y., Koç, A., Görgülü, ve Tandiroğlu 2016). Yüksek basınçlı sıcak gazlar türbini çalıştırır ve türbin shaftının dönüşü sayesinde geliştirilen güç, endüstriyel cihazlar ve konut uygulamaları gibi bir dizi uygulamada kullanılabilir (Adefarati, Papy, Thopil, M ve Tazvinga, 2017). Şekil 3.8’de açık gaz türbini çevriminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.8. Açık gaz türbini çevrimi şematik gösterimi

Açık gaz türbini güç çevrimi bütünüyle ele alındığında 5 ana bileşeni bulunmaktadır:

- Kompresör
- Yanma Odası
- Türbin
- Kontrol ve ateşleme ünitesi
- Elektrik jeneratörü

3.3.1. Kompresör

İlk gaz türbinleri, nispeten basit ve ucuz olan santrifüj kompresörleri kullanıyordu. Bununla birlikte, düşük basınç oranlarıyla sınırlıdır ve modern eksenel akışlı kompresörlerin verimlilikleriyle karşılaştırılmazlar. Santrifüj kompresörler günümüzde ağırlıklı olarak küçük sanayi birimlerinde kullanılmaktadır.

Eksenel akışlı bir kompresör, bir türbin hareketinin tam tersidir. Bükülmüş, oldukça kavisli kanat profillerine benzeyen kanat geçişleri, kanadın bir tarafındaki basınçlar diğer tarafa göre daha yüksek olacak şekilde akışkana teğetsel bir kuvvet uygular. Ses hızı altı (subsonic) akış için, basınçtaki bir artış, akış alanının da artmasını gerektirir, böylece kanat geçişleri arasındaki akış hızını düşürür ve akışı yayar. Bir dizi kompresör kanadı, hava akışının güçlü bir şekilde etkileşime girdiği bir dizi yakın aralıklı, oldukça eğimli kanat şekli olarak görülmelidir. Kanatlar boyunca sadece basınçta bir artış olmayacak, aynı zamanda aralarında da bir değişiklik olacaktır. Akış sürtünmesi, sızıntı, önceki kanat setlerinin ürettiği dalgalanmalar ve ikincil sirkülasyon veya girdap akışlarının tümü, gerçek bir birimdeki kayıplara katkıda bulunur. Kaskad olarak bilinen sabit kanatlı cihazların testleri, özel rüzgar tünellerinde gerçekleştirilebilir, ancak dönen bir cihazda gerçek kanat düzenlemeleri özel test kurulumları veya donanımları gerektirir.

Kanatlar yalnızca doğru aerodinamik şekle sahip olacak şekilde değil, aynı zamanda hafif olacak ve kritik titreşimlere eğilimli olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Kompresör (ve türbin) kanat tasarımındaki son gelişmeler kapsamlı bilgisayar programları tarafından desteklenmektedir (Barsi, Perrone, Qu, Ratto, Ricci, Sergeev ve Zunino, 2018).

Bir reaksiyon türbini aşamasında orta derecede büyük genleşme basıncı oranları elde edilebilirken, sadece nispeten küçük basınç artışları, bir kompresör aşamasıyla

sağlanabilir- tipik olarak modern bir tasarımda aşama başına 1,35 veya 1,4'e 1 basınç oranları bulunur. Bu nedenle kompresörler türbinlere göre daha fazla kademe gerektirir. Daha yüksek kademe basınç oranları denenirse, akış kanatlardan ayrılma eğiliminde olacaktır, bu da türbülansa, düşük basınç artışına ve aynı zamanda motor gücü kaybıyla birlikte kompresörün "durmasına" neden olacaktır. Ne yazık ki, kompresörler, küçük bozulmaların çalışmayı kesintiye uğratabileceği bu sözde aşırı gerilim durumuna yakın yerlerde en verimli olanıdır. Kompresörü durdurmadan yüksek verimliliği korumak tasarımcı için büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir.

Hava sıkıştırıldıkça hacmi azalır. Dolayısıyla, akış hızı neredeyse sabit tutulacaksa, dairesel geçiş alanı da azalmalıdır- yani, kanatların daha yüksek basınçlarda daha kısa olması gerekir. Optimum bıçak ucu hızları ve hava akış hızları dengesi genellikle kompresörün ön, düşük basınçlı ucunun dönme hızının yüksek basınçlı ucunkinden daha düşük olmasını gerektirir. Bu, büyük hava taşıtı gaz türbinlerinde, türbinin düşük basınçlı kısmı tarafından tahrik edilen düşük basınç ucu için shaftın içi boş yüksek basınçlı kompresör/türbin shaftı içinde farklı bir hızda çalıştığı "makaralı" shaftlarla elde edilir. Her shaftın kendi yatakları vardır. Hem ikiz hem de üçlü makaralı motorlar geliştirilmiştir.

3.3.2. Yanma odası

Bir gaz türbininin yanma odası, tüm sistemi çalıştıran enerjinin üretildiği yerdir. Modern bir türbinin yanma odası tipik olarak, içinde astar adı verilen ikinci bir küçük silindire sahip bir silindirden oluşur. Bir yakıt hava karışımı, astarın ağzından geçer ve astarı soğuk tutmak için astar ile dış silindir arasından bunun dışından ek hava geçebilir. Bu hava daha sonra astar boyunca deliklerden ve yarıklardan verilir.

Çoğu modern gaz türbini yakıcıda hava, bir dizi nozul aracılığıyla yanma odasına enjekte edilmeden önce yakıtla önceden karıştırılır. Yanma odasındaki nozulların ve bölmelerin şekli ve yönü, yanma odası içinde hem homojen karışım hem de sabit bir alev sağlamak için dikkatlice tasarlanmıştır. Yakıt hava karışımı yanma bölgesinde tutuşarak ısı olarak enerji açığa çıkarır. Alev yanma bölgesindeki sıcaklık, çoğu malzemenin dayanabileceğinden çok daha yüksek olan 1900 ° C'nin üzerine çıkabilir. Bunu kontrol etmek için kompresörden gelen havanın bir kısmı yanma odası astarının duvarlarını soğutmak için kullanılabilir. Bu aynı zamanda çok sıcak yanma gazlarını seyrelterek sıcaklıklarını düşürür (Sousa, Paniagua, ve Morata, 2017).

Alev kararsızlığı ve enerji kaybına yol açacak türbülansın kaçınmak için yanma odasının tüm parçalarından hava akışı dikkatlice yönetilmelidir. Amaç, ısı enerjisi ilavesi ile havanın sıcaklığını yükseltmek ve toplam basıncı artırmak olsa da düzgün bir hava akışı sağlamaktır (Pashchenko, 2018).

Yanma işlemi sırasında NO_x üretimini kontrol etmek için yanma odasına hava ilavesi de dikkatle yönetilir. Yanma bölgesindeki yüksek sıcaklıklar, havadan oksijen ve nitrojen arasındaki reaksiyondan nitrojen oksitlerin hızlı üretimine yol açar. Bu durum indirgeme koşulları sürdürülerek kontrol edilebilir. Oksijen miktarını tüm yakıtı yakmak için gereken miktara kıyasla düşük tutarak NO_x üretimi en aza indirilebilir. Bu tür yanma ile, yanma reaksiyonunun tamamlanmaya devam etmesini sağlamak için yanma bölgesinin sonraki aşamalarına daha fazla hava verilir. Bununla birlikte, birçok modern yanma odası, NO_x üretimini kontrol altında tutmak için yakıt-hava karışımı yakıcıya girmeden önce yakıt ve havanın stokiometrik oranlarda dikkatlice karıştırılmasına önem vermektedir (Okaför, 2019).

Yanma işlemi tamamlandıktan sonra sıcak gazlar geçiş bölümü olarak adlandırılan yanma odasının son aşamasına geçer. Bu, statik basıncı dinamik basınca dönüştüren, sıcak gazların türbin bölümüne girmeden önce hızını artıran bir kanaldır. Bir gaz türbinindeki yanma odalarının tipi ve sayısı, üreticiden üreticiye ve türbinden türbine değişiklik gösterecektir. Daha büyük türbin tasarımlarının çoğu, türbin shaftını kompresör ve türbin arasında çevreleyen bir dizi dairesel yanma odası kullanır. Diğerleri türbin gövdesi dışındaki kompresörden bir veya daha fazla yanma odasına hava alır ve ardından gazları türbine geri döndürür.

Bir ağır endüstriyel gaz türbini aynı zamanda çok sayıda gaz türbini ve yanma odası kullanır. Bu tasarım, gaz türbininin türbin bölümünü ikiye ayırır. Birinci yanma odası grubundan gelen sıcak hava, enerjinin türbin kanatları tarafından çekildiği birinci türbin bölümüne girer, ardından hava, ikinci bir türbin bölümüne beslenmeden önce daha fazla yakıtın yakıldığı ve daha fazla enerjinin eklendiği ikinci bir yanma odası grubuna girer. Yeniden ısıtma türbini olarak adlandırılan bu tür tasarım, genellikle elektrik üretimi için büyük buhar türbinlerinde kullanılır, ancak gaz türbinlerinde çok daha az yaygındır.

3.3.3. Türbin

Gaz türbininin son kısmı türbin bölümüdür. Yakıttan gelen enerjinin bir tür mekanik enerjiye dönüştürüldüğü yer burasıdır, türbin şaftının dönüşü bir tork oluşturur. Bazı çok küçük makineler dışındaki tüm gaz türbinleri aksenal akış türbini bölümleri kullanır. Kompresörde olduğu gibi, aksenal akış türbini birkaç aşamadan oluşacaktır; her aşama, genellikle nozul adı verilen bir dizi sabit kanat ve türbin şaftına bağlı bir dizi dönen kanat içerir.

Bir gaz türbinine uygulanabilen iki ana türbin / kanat tasarımı vardır ve bunların her biri bir akışkandan enerji elde etme yolu ile tanımlanır. Bu iki türbin türüne reaksiyon türbinleri ve impuls türbinleri denir. Farkı anlamının yolu, reaksiyon türbinlerinin bir akışkandaki statik basınçtan yararlanırken, impuls türbinlerinin dinamik basınçtan yararlandığını gözlemlemektir. Bu, akışkan bir reaksiyon türbininden geçerken statik basıncın düştüğü, ancak dinamik basıncını tanımlayan akışkan hızının nispeten sabit kaldığı anlamına gelir. Bunun tersine, akışkan bir itme türbini aşamasından geçtiğinde, statik basınç sabit kalırken hız düşer. Modern bir aksenal gaz türbininin aşamaları genellikle ikisini birleştirerek enerjilerinin bir kısmını statik basınçtan ve kısmen de dinamik basınçtan çekecektir. Bunun amacı hem itme kuvveti elde ederken hem de elektrik üretmektir. İlk aşamaların ağırlıklı olarak itki tipi olması yaygındır, sonraki aşamalar ise daha fazla reaksiyon tipidir. Bununla birlikte, tüm aşamalar genellikle her ikisini de kullanır.

Türbin içindeki sabit kanatların ve dönen kanatların sırası kompresörün tersidir. Yakıcıdan çıkan yüksek basınçlı, yüksek sıcaklıklı gaz, önce bir kademenin kanatlarıyla buluşur ve ardından kanatlarına yönlendirilir. Kanatlar, statik basıncı dinamik basınca dönüştüren ve içinden geçen havanın hızını artıran yakınsak kanallar oluşturur. Bu dinamik basınç daha sonra dönen kanatların etrafında hareket etmek için kullanılır. Kompresörde olduğu gibi, tüm türbinden düzgün hava akışını sağlamak için hem kanat hem de kanat kanatları kanatlara benzer. Her aşama, havada bulunan enerjinin bir kısmını çeker (Kumar, Pandey, 2017).

Basit bir gaz türbininde, kompresör ve türbin kanatları tek bir şaft üzerindedir. Ancak, daha karmaşık düzenlemeler mevcuttur. Bazı makinelerde iki eş merkezli mil vardır. Bunlardan biri kompresör kanatlarını ve türbin kanatlarının ilk bir veya iki kademesini

taşıır. Sonraki türbin aşamaları, jeneratörü elektrik enerjisi üretmek için çalıştıran ikinci bir şafta bağlanır. Bazı havacılık türevli gaz türbinlerinde bu daha da ileri götürülür ve kompresör aşamaları da bölünür. Düşük basınçlı kompresör kanatları daha sonra düşük (veya orta) basınçlı türbin aşamaları ile aynı şafta monte edilirken, yüksek basınçlı kompresör aşamaları, yüksek basınçlı türbin aşamalarıyla aynı şaft üzerindedir (Duong, 2016).

Bir gaz türbininin verimliliği, aşamalardaki sıcaklık düşüşüne bağlı olur. Yüksek verim elde etmek için türbin aşaması giriş sıcaklığının çok yüksek olması gerekir. Bazı modern gaz türbinlerinde giriş sıcaklığı 1600°C'ye ulaşabilir. Bu sıcaklığa dayanabilecek türbin bileşenlerini tasarlamak için çok özel malzemeler ve tasarım teknikleri gerekir.

3.3.4. Kontrol ve ateşleme ünitesi

Elektrik jeneratörünü çalıştıran bir gaz türbinli motorda, elektrik yüküne bakılmaksızın hız sabit tutulmalıdır. Tasarımın maksimumundan gelen yükte bir azalma, motor devrini sabit tutarken daha az yakıt yakarak eşleştirilebilir. Yakıt akışının azaltılması, yanma odasının çıkış sıcaklığını ve bununla birlikte türbin için mevcut olan entalpi düşüşünü düşürecektir. Bu türbin verimini biraz düşürse de aynı miktarda havayı işleyen kompresörü etkilemez. Bu kontrol yöntemi, kütle akış hızının değişen yüklere uyacak şekilde değiştirilmesi gereken bir buhar türbininden önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Zhou, Lu, Zhou, ve Huang, 2020).

3.3.5. Elektrik jeneratörü

Elektrik enerjisi üretimi alanında, gaz türbinleri büyük merkezi güç istasyonlarında buhar türbinleri ile ve daha küçük tesislerde dizel motorlarla rekabet etmek zorundadır. Bir gaz türbininin başlangıç maliyeti, orta büyüklükteki üniteler için her iki alternatiften daha az olsa da, doğal verimliliği de daha düşüktür. Yine de, bir gaz türbini ünitesi daha az yer gerektirir ve başlatma için saatler süren bir buhar ünitesinin aksine, dakikalar içinde devreye alınabilir. Sonuç olarak, gaz türbinli motorlar, bir elektrik sistemindeki yüksek güç talebinin kısa süreleri sırasında aralıklı olarak çalışmak üzere orta ölçekli "pik yük" tesisleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu durumda, yakıt masraflarından ziyade ilk maliyetler ana husus haline gelir.

İlk ticari sabit tesisler, düşük türbin giriş sıcaklıklarında çalışan uçak üniteleri kullanıyordu. Uçak türbinlerinin yüksek dönme hızı, elektrik jeneratörlerini çalıştırmak için özel dişliler gerektiriyordu. Daha yakın zamanlarda, özel birimler dakikada 3600 devirde doğrudan kullanım için tasarlanmıştır. Tesislerin çoğu 100.000 kilovattan az olmasına rağmen, 200.000 kilovata kadar boyutlarda üniteler inşa edilmiştir. Bu türbinler, sıvı yakıtlarla veya doğal gazla yılda 6.000 saate kadar çalışmıştır. Büyük üniteler için tipik türbin giriş sıcaklıkları, daha yüksek sıcaklıklarda kullanılan türbin kanadı soğutması ile yaklaşık 980 °C ila 1.260 °C arasındadır (Kalantari, Sullivan-Lewis ve McDonell, 2017).

Çizelge 3.4. Gaz Türbinleri avantajları ve Dezavantajları (Adefarati ve Bansal, 2019)

Avantajları	Dezavantajları
Daha yüksek güvenilirlik ve kullanılabilirlik	Buhar türbinlerine kıyasla katı yakıt kullanma kabiliyeti sınırlı.
Daha düşük işletme maliyetleri ve sera gazı emisyonları.	Yakıtların spesifikasyonlardan herhangi bir küçük sapması, gaz türbininin verimini azaltabilir ve bakım faktörünü ve erken revizyonu artırabilir.
Egzozdan gelen büyük miktardaki atık ısı akışı diğer işlemlerde kullanılabilir.	Gaz türbinleri, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle özel ve pahalı ekipman gerektirir.
Yüksek güç yoğunluğu ve yakıt esnekliği	Gaz türbini tarafından üretilen güç, ortam sıcaklığı arttıkça azalır.
Gaz türbinlerinin başlangıç maliyeti çok düşüktür.	Kendiliğinden devam eden çalışmayı başlatmak için siyah başlatma jeneratörü gibi harici güç kaynağı gerekir.
Gaz türbinleri, daha düşük inşaat maliyetleriyle daha hızlı inşa edilebilir.	Pompaları ve kompresörleri çalıştırmak için gereken güç, gaz türbinlerinin net güç çıkışlarını azaltır.
Gaz türbinleri dakikalar içinde tam yükte çalışmaya ulaşabilir.	Kompresörleri ve pompaları çalıştırmak için daha fazla yakıt tüketilmesi gerekir.
Hızlı başlatma ve sahalara taşınması kolaydır.	Gaz türbinlerinin yüksek çalışma sıcaklığı, bazı bileşenlerin kullanım ömrünü azaltabilir.
Yüksek güç-ağırlık oranı ve yüksek ısı dereceli yakıtlar mevcuttur.	Açık çevrim gaz türbini motorlarının verimlilik seviyeleri, açık çevrim gaz türbini motorlarından daha düşüktür, çünkü egzoz bırakıldığında termal enerji boşa harcanır.
Buhar türbinlerine kıyasla daha küçük boyut ve ağırlık ve kurulum için daha az alan gerekir.	Gaz türbinleri düşük kısmi yük verimiyle çalışır.

Yüksek türbin egzoz sıcaklıklarından (tipik olarak yaklaşık 480 ° ila 590 ° C) yararlanmak için bir rejeneratör eklenerek verimlilik artırılabilir. Alternatif olarak, gaz türbini, sürekli çalışan bir buhar enerji santrali için bir tepe yük birimi olarak hizmet veriyorsa, sıcak egzoz gazları, bir buhar kazanına giren yanma havasını bir ısı eşanjörü aracılığıyla ön ısıtmak için kullanılabilir. Modern bir gelişme, gaz türbini egzozunun doğrudan, ilave yakıtın yakıldığı bir buhar jeneratörüne beslenmesini ve bir buhar türbini için orta basınçlı buhar üretilmesini içerir. Bu kombine üniteler için yaklaşık yüzde 50'lik bir genel termal verimlilik iddia ediliyor ve bu da onları şu anda mevcut olan en yakıt verimli enerji santralleri yapıyor (Sadeghi, Chitsaz, Marivani, Yari, ve Mahmoudi, 2020).

Her sistemde olduğu gibi gaz türbinlerinin de avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Gaz türbinlerinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.4'te sunulmaktadır.

3.3.6. Termodinamik analiz

Kinetik ve potansiyel enerji değişiklikleri ihmal edildiğinde, sabit bir akış için proses enerji dengesi birim kütle esasına göre yazılabilir (Dincer, Cengel, 2001). Gaz türbininin her devir için bir döngüsü vardır;

$$W_{top} = n \cdot W_{net} \quad (3.16)$$

$$N_e = n \cdot W_{net} / (60 \times 75) \quad [HP] \quad (3.17)$$

Burada (W_{top}) toplam işi, (W_{net}) her bir çevrim için elde edilen yararlı işi, (n) devir sayısını (N_e) ise toplam enerji akışını göstermektedir.

Termodinamiğin birinci yasasına göre, giriş enerjisi çıkış enerjisine eşittir. Bu durumda, net iş (W_{net}) ideal koşullarda aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (3.18)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (3.19)$$

burada, ($\sum \dot{m}_i$) giriş kütleli debiyi ve ($\sum \dot{m}_e$) sistemden çıkan kütleli debiyi ifade eder ve birbirine eşittir. Ayrıca h_i giriş entalpisini ve h_e sistemin çıkış entalpisini temsil etmektedir.

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} c_p (T_2 - T_3) \quad (3.20)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m} c_p (T_4 - T_1) \quad (3.21)$$

$$\dot{W}_t - \dot{W}_k = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \quad (3.22)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \quad (3.23)$$

Burada (\dot{m}) hava-yakıt karışımının kütleini, (c_p) özgül ısıyı, (\dot{Q}_1) sistemden yanma sonrası sabit basınçta çekilen ısıyı, (\dot{Q}_2) havanın soğutulmuş gaz türbinine girişini, (\dot{W}_k) kompresör işini, (\dot{W}_t) türbinden üretilen net işi, (T_1) kompresör giriş sıcaklığını, (T_2) kompresör çıkış sıcaklığını, (T_3) türbin giriş sıcaklığını ve (T_4) türbin çıkış sıcaklığını temsil etmektedir.

3.4. Yakıtlar ve Yakıt Karışımları

Gaz türbinlerinde enerji üretmek için kullanılan birçok yakıt çeşidi bulunmaktadır. Gaz türbinleri, benzin, doğal gaz, propan, dizel yakıt ve gazyağı gibi ticari yakıtların çoğunun yanı sıra E85, biyodizel ve biyogaz gibi yenilenebilir yakıtlarında kullanımına izin vermektedir. Bu tez çalışmasında standart çalışma yakıtı olarak propan kullanılmıştır. Performans ve emisyon analizi yapılan amonyak, gaz türbinlerinde ana yakıt olarak tek başına kullanıldığında bazı zorluklara sahiptir. Bunları tolere etmek için yakıt zenginleştirilmesi olarak farklı oranlarda H_2 ve elektroliz yolu ile elde edilen HHO gazları yakıt zenginleştirilmesi olarak kullanılmıştır.

3.4.1. Propan

Propan gazı, LPG - Sıvılaştırılmış Petrol Gazı tanımına uyan gazlardan biridir. Propan, basınçlandırma yoluyla sıvılaştırılan ve ısıtma, pişirme, sıcak su ve araçlarda yakıt olarak yaygın olarak kullanılan yanıcı bir hidrokarbon gazdır. Propan ayrıca soğutucular, aerosol itici gazlar ve petrokimyasal hammadde için de kullanılabilir.

Propan gazı, nispeten düşük basınçlarda bir sıvıya sıkıştırılabilir. Propan genellikle küçük barbekü gaz şişelerinden daha büyük gaz tüplerine ve LPG depolama tanklarına kadar değişen çelik kaplarda sıvı olarak depolanır. Propan, doğal gaz işleme ve petrol

rafinasyonundan elde edilir. Bu gazların karışımlarının yanı sıra bütan (n-bütan) ve izobütan (i-bütan) dahil olmak üzere "LPG" etiketi altında yer alan bir dizi başka gaz vardır ve doğal gaz sıvıları- NGL olarak da adlandırılır. Yanıcılığın alt ve üst sınırları, propan / hava karışımında bulunması gereken propan yüzdeleridir. Bu, yanıcı olabilmesi için toplam propan / hava karışımının %2,15 ila %9,6'sının propan olması gerektiği anlamına gelir. Propan gazının fiziksel özellikleri çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Propan Fiziksel Özellikleri

Özellik	Değerleri
Kimyasal Formül	C ₃ H ₈
Enerji içeriği: MJ/m ³	95,8
Enerji içeriği: MJ/kg	49,58
Enerji içeriği: MJ/L	25,3
Kaynama sıcaklığı: C°	-42
Basınç @ 21°C: kPa	858,7
Alev sıcaklığı: C°	1967
Genleşme: m ³ /L	0,270
Gaz Hacmi: m ³ /kg	0,540
Göreceli yoğunluk: H ₂ O	0,51
Göreceli yoğunluk: hava	1,53
kg/L	0,51
L/kg	1,96
Özgül Ağırlık @ 25°C	1,55

3.4.2. Amonyak

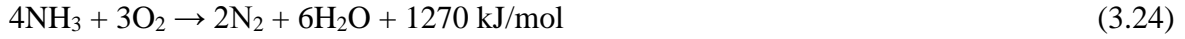
NH₃ olarak da bilinen amonyak, nitrojen ve hidrojen atomlarından oluşan farklı bir kokusu olan renksiz bir gazdır. İnsan vücudunda ve doğada - suda, toprakta ve havada, hatta küçük bakteri moleküllerinde bile doğal olarak üretilir. İnsan sağlığında amonyak ve amonyum iyonu metabolik süreçlerin hayati bileşenleridir. Çoğunlukla tarım için bir nitrojen hammaddesi veya bir soğutucu olarak bilinen amonyak, geçmişte zaman zaman içten yanmalı motorlar ve yakıt hücreleri için yakıt olarak kullanılmıştır. Karbon içermeyen bir madde olduğu ve yüksek oktan sayısına sahip olduğu için, amonyağı yakıt olarak

kullanmaya yönelik şu anda yenilenmiş bir ilgi mevcuttur (Zamfirescu ve Dincer, 2009). Çizelge 3.6'da yakıt olarak kullanılacak amonyağın fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Amonyagın fiziksel özellikleri (Nozari ve Karabeyoğlu, 2015)

Özellik	Birimi	Değeri
Yoğunluk	kg/m ³	603
Moleküler Ağırlık	g/mol	17,03
Buhar Basıncı @293 K	Bar	8,88
Tutuşma Sıcaklığı	°C	651
Kaynama noktası 1 atm	°C	-34
Maksimum Alev Sıcaklığı	°C	1850
Üst Isıl Değer	MJ/kg	22,5
Alt Isıl Değer	MJ/kg	18,65
Fiyat	\$/kg	0,25
Fiyat	\$/m ³	151
Enerji Fiyatı	\$/GJ	11
Ana üretim yöntemi	60-65% verim	Haber-Bosch
Gizli ısı 1 atm basınç ve kaynama noktasında	kJ/kg	1371.2
Kritik T ve P	K / bar	405,4 / 112.8
Gaz Yoğunluğu 1 atm basınç ve kaynama noktasında	kg/m ³	0,86
Sıkıştırılabilirlik katsayısı 1atm, 288 K	-	0,9929
Cp ve Cv at 1 atm, 288 K	kJ/mol-K	0,037 / 0,028
Yanıcılık sınırları (hava)	Hacimsel	15%-28%
Oktan sayısı	-	110-130

Enerji yoğunluğu ulaşım uygulamaları için önemli bir parametre olmakla birlikte, hidrokarbon yakıtlara göre düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu bilinen amonyağın bu özelliğinin enerji üretim sistemleri için önemli bir dezavantaj olmadığu bilinmelidir (Karabeyoglu, Evans, Stevens, Cantwell ve Micheletti, 2012). Amonyak stokiyometrik Hava Yakıt Oranı (AFR) ile yakıldığında yaklaşık 6,06 , yanma sonunda sadece nitrojen gazı ve su açığa çıkar. Amonyak yanma reaksiyonu denklemi eşitlik 3.16'da verilmiştir.



3.4.3. Hidrojen (H₂) ve Hidroksi Gaz (HHO)

Hidrojen ve hidroksi gaz son yıllarda içten yanmalı motorlarda sıklıkla yakıt katkısı olarak kullanılması itibari ile önem arz etmektedir. Yakıt katkısı olarak kullanıldıklarında bir çok avantaj sağlayan ve yakıt zenginleştirilmesi olarak ifade edilen bu gazların temel 2 farkı bulunmaktadır. Birinci fark depolamadır. Bilindiği üzere hidrojen yüksek basınçlarda ve çok düşük sıcaklıklarda depolanması gereken bir gazdır ve bu da maliyet ve güvenlik tedbirlerini beraberinde getirmektedir. İkinci en önemli fark ise hidroksi gazın içerisinde bulunan ekstra oksijen atomudur. Elektroliz yoluyla elde edilen hidroksi gaz yakıt zenginleştirilmesi olarak kullanıldığında yanma olayına içerdiği oksijen atomu sayesinde pozitif katkı sağlar ve yanma verimliliğini artırır. Ek olarak depolama gerekmez ve bir batarya veya akü yardımıyla kolayca oda koşullarında elde edilebilir. Hidrojenin fiziksel özellikleri çizelge 3.7’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.7 Hidrojenin fiziksel özellikleri (Sürer ve Arat, 2018)

Özellik	Birim	Değer
Oktan sayısı	-	130
Tutuşma sıcaklığı	°C	585
Alt ısııl değer	kJ/g	119,93
Üst ısııl değer	kJ/g	141,86
Kaynama noktası	°C	-252,7
Erime noktası	°C	-259,2
Yoğunluk (Kaynama noktasında)	kg/m ³	70,8
Buhar yoğunluğu	kg/m ³	0,08376
Özgül hacim (sıvı)	m ³ /kg	0,014
Özgül hacim (gaz)	m ³ /kg	11,9
Parlama noktası	°C ; K	<-253 ; 20
Alev sıcaklığı	°C	2158
Hava /Yakıt oranı	-	34,2
Enerji tüketimi	Mj/km	316,5
Yakıt tüketimi	kg/km	2,64
Yanma ısısı	kJ/kg	120
Buharlaşma ısısı	kJ/kg	446

3.4.4. Yakıt karışımları

Tez çalışması propan, NH_3 , H_2 ve HHO olmak üzere dört ana yakıt türünden oluşur. Propan gazı ile çalışmak üzere tasarlanan gaz türbininin standart güç üretimini belirlemek ve ardından diğer yakıtların etkilerini incelemek için öncelikle propan gazı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan tüm yakıt karışım oranları Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Yakıt karışım oranları

Karışım adı	NH_3	HHO	Karışım adı	NH_3	H_2
$\text{NH}_3 + 3 \text{ HHO}$	10 L/dak	3 L/ dak	$\text{NH}_3 + 3 \text{ H}_2$	10 L/ dak	3 L/ dak
$\text{NH}_3 + 5 \text{ HHO}$	10 L/ dak	5 L/ dak	$\text{NH}_3 + 5 \text{ H}_2$	10 L/ dak	5 L/ dak
$\text{NH}_3 + 7 \text{ HHO}$	10 L/ dak	7 L/ dak	$\text{NH}_3 + 7 \text{ H}_2$	10 L/ dak	7 L/ dak

3.5. Gaz Analizörü

Tez çalışmasında yapılan deneyler amonyak kullanımının gaz türbinlerinde performans verilerinin incelenmesi kadar yanma sonrası egzoz gazlarının emisyon değerlerinin araştırılmasıdır. Şekil 3.9 kullanılan gaz analizörü ve kullanılan gaz probu gösterilmektedir. Gaz probu 335 mm daldırma derinliği, +1000 °C'ye kadar çıkabilen NiCr-Ni termokupıl, kondensat tutucu, partikül filtresi, montaj adaptöründen oluşmaktadır. Bununla birlikte çizelge 3.9'da kullanılan gaz analizörünün özellikleri, ölçüm kabiliyeti, ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri verilmiştir. Gaz analiz cihazı üzerinde bulunan ekrandan anlık olarak verilerin okunması mümkün olduğu gibi RS 232 bağlantısı kullanılarak aynı veriler bir arayüz programı yardımı ile bilgisayara kaydedilebilmektedir. Deneyler sırasında her saniye veri kaydedilerek anlık NO_x değerleri takip edilmiştir.



Şekil 3.9. Testo 350 Gaz analizörü ve probu

Çizelge 3.9 Gaz analizörünün teknik özellikleri

Değişken	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Sıcaklık	-200,0...+ 1760,0 °C	En yüksek \pm % 1
O ₂ (oksijen)	0,0... %25,0 (hacimsel)	\pm %0,8
CO (H ₂ kompanzasyonlu) (karbonmonoksit)	0...10000ppm	\pm %5 (2000ppm'e kadar) \pm % 10 (2001ppm...10000ppm)
Düşük seviyelerde CO	0...500ppm	\pm 5% ölç.değ. (+200 +2000 ppm CO) \pm 10% ölç.değ. (+2001 ...+10000 ppm CO) \pm 10 ppm CO (0... +199 ppm CO
CO ₂ (karbondioksit)	0,0...%CO _{2max}	Hesaplanan değişken
NO (azotmomoksit)	0...4000ppm	\pm % 5
Düşük seviyelerde NO	0...300ppm	\pm 2ppm (39,9ppm'e kadar) \pm % 5 (40ppm...300ppm)
NO ₂ (azotdioksit)	0...500ppm	\pm % 5

Deneyleerde kullanılan gaz analizörünün firma tarafından belirtilen fiziksel özellikleri, içeriği ve kabiliyetleri şu şekilde sıralanabilir;

- Cihaz, yapılan ölçümlerin görüntülediği el kontrol ünitesi ve baca gazı ölçüm hücrelerinin bulunduğu analizör ünitesi olmak üzere iki bağımsız üniteden oluşmaktadır. Bu iki ünite arasındaki veri alışverişi el kontrol ünitesi, analizör ünitesine entegre edilerek ve olarak bluetooth ile sağlanmaktadır.
- Analizör ünitesi üzerinde fark basıncı ölçüm sensörü, baca gazı örnekleme probu girişi ve ortam sıcaklık soketi bulunmaktadır.
- El kontrol ünitesi ve analizör ünitesi birbirine monte edilebilmektedir. Bir adet el kontrol ünitesi ve bir adet analizör ünitesinin ağırlığı yaklaşık olarak 5 kg'dır.
- El kontrol ünitesinin ekranı aynı anda altı adet parametreyi gösteren genişlikte renkli ve grafiksel, ölçümleri matris ve tablolar halinde gösterebilir yapıdadır.
- Gaz ölçüm sensörlerinin bulunduğu hazne sıcaklık değişimlerinden sensörlerin etkilenmesini engellemek için diğer cihaz bileşenlerinden termal olarak izole edilmiştir.
- Sensörler tekrar kalibrasyon gerektirmeksizin kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir.
- El kontrol ünitesi üzerinden her türlü programlama, ölçüm ve düzenleme yapılabilmelidir.
- Ölçüm cihazına isteğe bağlı olarak 16 adete kadar analizör ünitesi bağlanabilmektedir. Böylece 16 adede kadar farklı noktadan ölçüm ve izleme yapılabilir fakat bu çalışmada tek bir noktadan ölçüm alınmaktadır. Sürekli izleme ve/veya ölçüm yapılacağı zaman el kontrol ünitesi devreden çıkartılarak özel yazılım programı ile yapılan ölçümler sürekli olarak bilgisayardan izlenmektedir.
- Analizör ünitesinde bulunan baca gazı emişi için kullanılan vakum pompası 200 mbar negatif basıncın veya 50 mbar pozitif basıncın olduğu ortamlardan gaz emebilecek yapıdadır.
- Cihazın hafızasında yakıtlar ile ilgili yakıt parametreleri ve katsayıları bulunur ve isteğe bağlı kullanıcı tarafından iki adet özel yakıt tanımlanabilmektedir.

Bu cihazlar ve yöntemler kullanılarak elde edilen verilerin tamamı bilgisayarda kaydedilmiş ve araştırma bulguları ve tartışma bölümünde detaylıca ele alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması sırasında elde edilen bütün çıktılar bu bölümde tartışılacaktır. Elde edilen sonuçlar grafik haline getirilmiş ve ayrı ayrı tartışılmıştır. Bu bölümde çalışmanın ana bulguları ve vurgulanmak istenen iyileştirmeler yer almaktadır.

Deneyle sırasında elde edilen bulgular bir ara yüz programı vasıtası ile toplanmıştır. Bu program kullanılan gaz türbini deney setinin üreticisi tarafından oluşturulan sıcaklık, basınç ve üretilen akım ve voltaj değerlerinin kaydedilmesini sağlayan bir programdır. Bu sebeple veri toplayıcı harici bir cihaza gerek duyulmadan veriler bilgisayar üzerinden izlenebilmektedir.

Çalışmada temel hedef, kullanılan deney düzeneğinin ekipmanlarında yapısal bir değişikliğe gidilmeden karbon esaslı yakıtların elemine edilerek sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının performans ve emisyon değerleri incelenerek, karbon esaslı yakıtlar yerine kullanılabilirliğini ispatlamaktır. Bunu sağlamak için deneylerde kullanılan amonyak ana yakıt olarak yakıt besleme hattından yanma odasına gönderilirken ek bir hat yardımıyla hidrojen ve hidroksi gaz beslemesi de yapılmıştır.

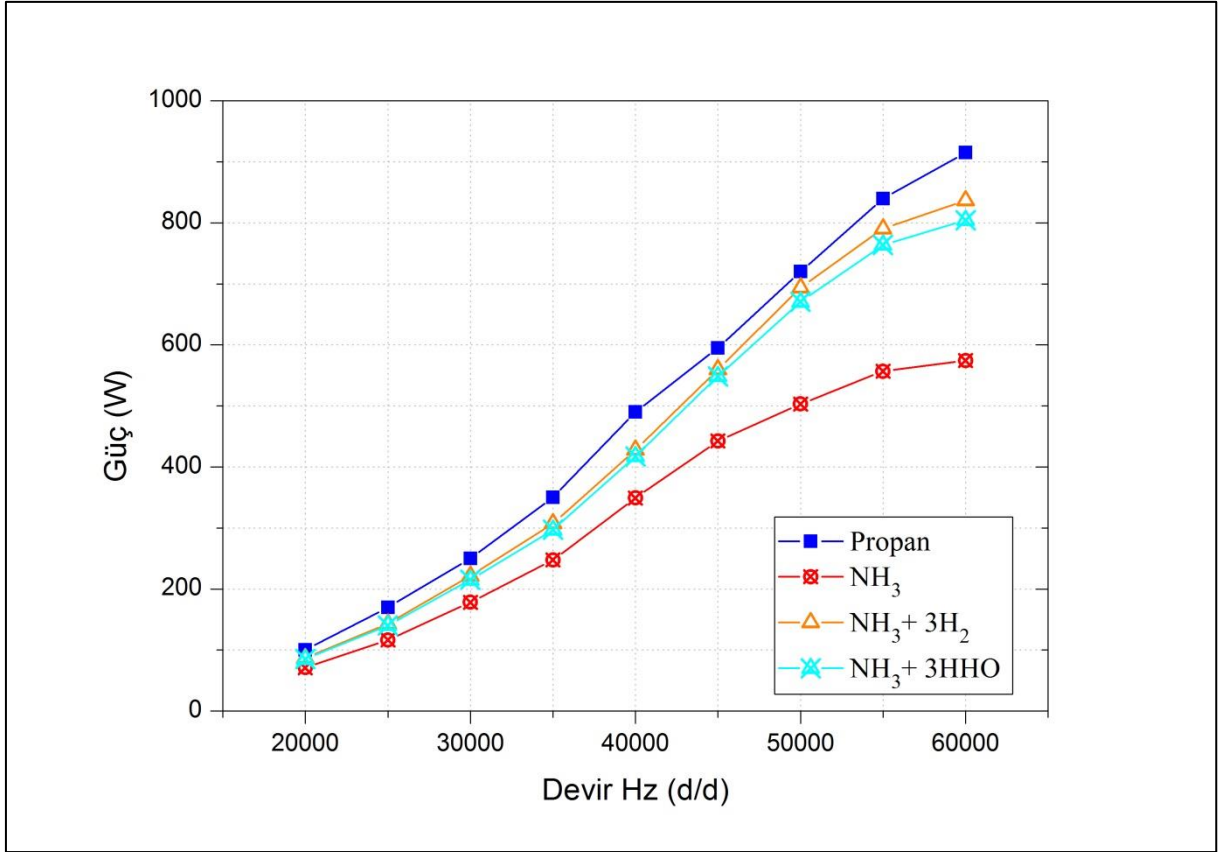
Yakıtların hidrojen zenginleştirilmesi ve hidroksi gaz zenginleştirilmesi sayesinde performans değerlerinde iyileştirmeler elde edildiği görülmektedir. Hidroksi gaz içerisinde bulunan ekstra oksijen sayesinde performans değerlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamış olsa da NO_x emisyonları göz önünde bulundurulduğunda kontrol altına alınması gerektiği tespit edilmiştir.

Bu bölüm 2 ana başlıkta incelenecektir. Deneylede ana yakıt olarak kullanılan NH_3 ile hidrojen zenginleştirmelerinin performans ve emisyon etkileri, NH_3 ile hidroksi gaz zenginleştirmelerinin performans ve emisyon etkileri incelenmiştir. Bu bölümler de zenginleştirme oranlarının etkileri de kendi aralarında NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 kıyaslaması, NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 kıyaslaması ve NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 kıyaslaması alt başlıklar olarak incelenecektir. Son olarak bütün yakıt karışımları kendi ana başlıkları altında NH_3+H_2 ve NH_3+HHO olarak kendi içinde incelenecek ve yapılan deneyler göz önünde bulundurularak optimum yakıt seçimi yapılacaktır.

4.1. NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 Kıyaslaması

Gaz türbinlerinde kullanılan geleneksel fosil yakıtların yerine yenilenebilir kaynakların kullanımı küresel ısınma ve enerji talebi ile birlikte zorunlu hale gelmiştir. Fakat yakıt olarak kullanılan temiz enerji kaynaklarının modifiye edilmeden gaz türbinlerinde kullanımının bir takım zorlukları bulunmaktadır. Amonyak tek başına kullanıldığında yüksek tutuşma sıcaklığı ve yüksek buharlaşma ısısı sebebi ile istenilen performans değerlerini elde etmemize olanak sağlamamaktadır. Bu sebeple ana yakıt olarak kullanılması için amonyağın dezavantajlarını tolere edebilecek ve en temiz enerji kaynağı olan hidrojen ve HHO gazları yakıt zenginleştirilmesi olarak kullanılmıştır. Yakıt karışımları, özellikle yanma odasına homojen bir şekilde gönderildiğinde, birbirlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırarak yanma performansını iyileştirir. Amonyagın temel problemleri düşük alev hızı ($\sim 0,06-0,08$ m/s), düşük ısıtma değeri ve yüksek ateşleme enerjisidir bununla birlikte hidrojen yüksek alev hızına ve ısıtma değerine sahiptir (Li, Huang, Kobayashi, He ve Nagai, 2014).

Şekil 4.1’de Devir hızı- Güç grafiği verilmiştir. Elde edilen veriler propan yakıtının yüksek ısıl değeri göz önünde bulundurulduğunda 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinin performans değerlerini yeterince yükseltmediğini ve propan (C_3H_8) yakıtından daha düşük güç üretildiği görülmektedir. Sonuçlar, NH_3+3HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %11,89 ve NH_3+3H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %8,15 daha düşük güç üretildiğini göstermektedir. Bunun temel sebebi hali hazırda fakir yanma yapılan yanma odasında 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği olarak açıklanabilir. Yanma odasına gönderilen ekstra oksijen ihtivasının yanmaya katılması yerine, 3 L/dak H_2 de hidrojenin tamamının yanmaya katılması performansta meydana gelen iyileştirmenin temel sebebi olarak gösterilebilir.

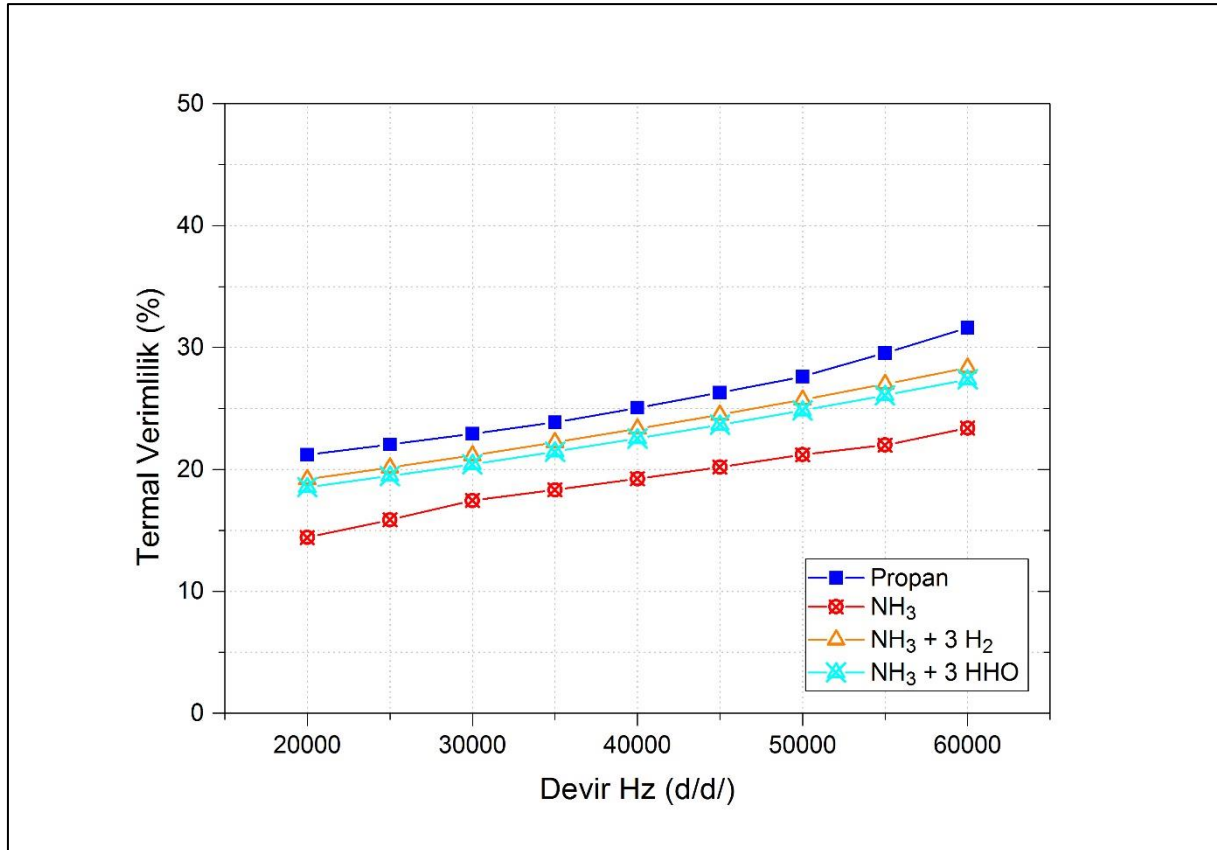


Şekil 4.1. NH₃+3HHO ve NH₃+3H₂ Devir Hızı- Güç grafiği

Şekil 4.2 de Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği verilmiştir. Termal verimlilik sisteme giren yakıt ve sistemden elde edilen güç ile doğrudan bağlantılı bir parametredir. Bu sebeple deneylerde seçilen yakıtların kullanılabilirlik parametresi olarak da adlandırmak mümkündür. Görüldüğü üzere özellikle verimlilik dikkate alındığında güç değerleri ile doğru orantılı olmak üzere amonyak, tek başına kullanılması mantıklı ve kârlı değildir. Yakıt zenginleştirmeleri ile standart çalışma yakıtı olan propan ile kıyaslandığında hidrojen ve hidroksi gaz zenginleştirme miktarının da bu deneyler için yeterli olmadığı görülmektedir. Düşük devirlerde hem NH₃-hava karışım oranının düşük olması hem de yakıtların homojen karışmaması sebebi ile yanma verimliliklerinde büyük farklılıklar görülmemektedir. Bununla birlikte artan türbin hızlarında hem yeterli hava-yakıt karışımı hem de yakıt zenginleştirme ile elde edilen yanma verimliliği artmış, yakıt zenginleştirme oranları aynı görünse de saf hidrojen gönderilen deneylere hacimce daha fazla hidrojen girmiş olması daha verimli bir yanma elde edilmesini sağlamıştır.

Sonuçlar, NH₃+3HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %10,19 ve NH₃+3H₂ yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %7,09 daha düşük

termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir. Bu durum üretilen güç verilerinde olduğu gibi hali hazırda fakir yanma yapılan yanma odasında 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği olarak açıklanabilir. Yanma odasına gönderilen ekstra oksijen ihtivasının yanmaya katılması yerine, 3 L/dak H₂ de hidrojenin tamamının yanmaya katılması NH₃ ile kıyaslandığında performansta meydana gelen iyileştirmenin temel sebebi olarak gösterilebilir.

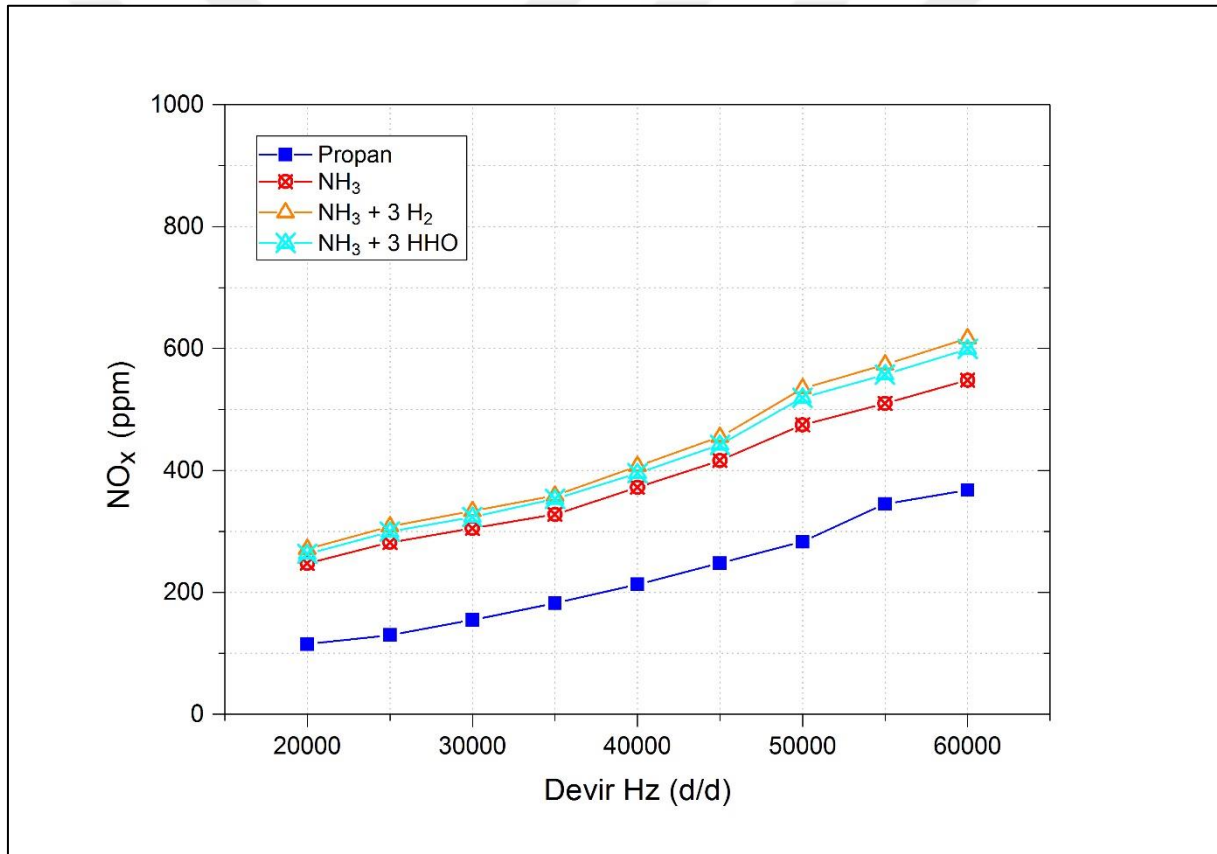


Şekil 4.2. NH₃+3HHO ve NH₃+3H₂ Devir Hızı- Termal verimlilik grafiği

Emisyon değerleri göz önünde bulundurulduğunda ise karbon içermeyen yakıt karışımları kullanılması sebebi ile bu çalışmanın yenilenebilir enerji üretimine katkı sağladığı görülmektedir. Propan ile üretilen CO, CO₂ ve yanmamış hidrokarbon emisyonları bu çalışmada tamamıyla elemine edilerek çevreci bir yanma sağlanması çalışma çıktıları bakımından sevindiricidir. Öte yandan NO_x emisyonları dikkate alındığında yanma sırasında güç çıktıları artıran performans parametrelerinin NO_x oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Yakıt zenginleştirmesi için kullanılan hidrojen ve HHO oranlarının düşük olması sebebi ile yapılan deneylerde NO_x artışının 3L/dak ile yapılan zenginleştirmelerde diğer deneylere göre nispeten daha az NO_x oluşumu görülmektedir.

NO_x üretimi yanma sıcaklığı ile doğru orantılıdır ve yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklığın bir sonucudur. Gaz türbininde daha fazla güç elde edilmesini sağlayan hidrojen atomları nedeniyle yanma sırasında yüksek ısı açığa çıkar ve bu durumun NO_x değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir (Kurata, Iki, Inoue, Matsunuma, Tsujimura, Furutani, Kawano, Arai, Okafor, Hayakawa ve Kobayashi, 2019).

Şekil 4.3'te Devir Hızı- NO_x grafiği sunulmuştur. Propan içinde bulunan karbonların yanma sırasında oksijen tutuculuğu sebebi ile NO_x emisyonu bakımından NH_3 ile kıyaslanamayacak kadar düşük değerlere sahip olsa da yüksek devirlerde yüzdesel olarak farkın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. NH_3+3HHO ve NH_3+3H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği

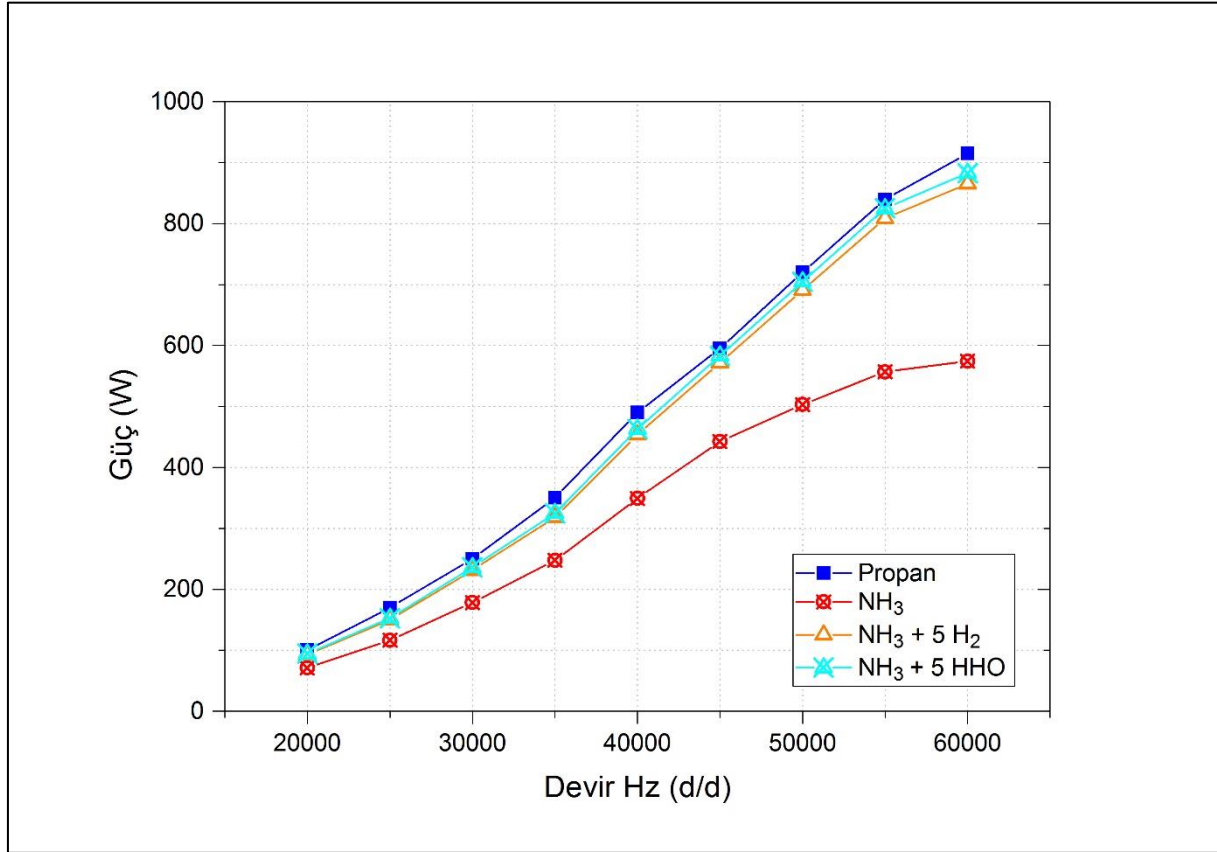
Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH_3 'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+3HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %7,72 ve NH_3+3H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %10,75 artış görüldüğü gözlenmiştir.

4.2. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Kıyaslaması

Gaz türbinlerinde herhangi bir modifikasyon yapılmadan fosil yakıt yerine, tekil yakıt olarak amonyak kullanımının, hidrojen zenginleştirmesinin ve hidroksi gaz zenginleştirmelerinin performans ve emisyonlara etkisinin araştırıldığı bu tezde, bir önceki deneylerden farklı olarak hidrojen ve hidroksi gaz oranı arttırılarak elde edilen güç, termal verimlilik ve NO_x değerleri incelenmiştir.

Şekil 4.4'te Devir Hızı- Güç grafiği sunulmuştur. 3 L/dak H_2 ve HHO gazı kullanılan önceki deneylerde elde edilen veriler hidrojen konsantrasyonu yüksek olan yakıtın daha fazla performans çıktılarını verdiğini göstermekteydi. Bunun sebebi fakir yanma koşullarında hidrojen konsantrasyonu yüksek olan karışımın daha fazla güç çıktısı vermesiydi. Fakat $\text{NH}_3 + 5\text{H}_2$ ve $\text{NH}_3 + 5\text{HHO}$ yakıt karışımları güç çıktılarını incelendiğinde karışımın yanma sırasında bir önceki karışıma göre daha fazla oksijen ihtiyacı olduğu açıkça görülmektedir. Hem hidrojenin yanma sırasında oksijen ihtiyacı hem de bağları kırılan NH_3 'ten yanmaya katılan hidrojenlerin oksijen ile tepkimeye girerek daha yüksek enerji açığa çıkarması anlamına gelmektedir.

Sonuçlar, NH_3+5HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %3,65 ve NH_3+5H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %5,68 daha düşük güç üretildiğini göstermektedir. Özellikle hidroksi gazın içeriğinde yer alan oksijen ile yanma performansı artmış ve bu durum yanma sonu basınç ve sıcaklıkların artması ve jeneratörde üretilen voltaj ve akımın artmasına sebep olmuştur. Bir önceki deneylerde 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği performansta yeterli iyileştirmenin elde edilememesi olarak açıklanmıştı. Yanma odasına gönderilen ekstra oksijen ihtivasının yanmaya katılmasına ihtiyaç duyulması performansta meydana gelen iyileştirmenin temel sebebi olarak gösterilebilir (Baltacıoğlu, Arat, Özcanlı ve Aydın, 2016).

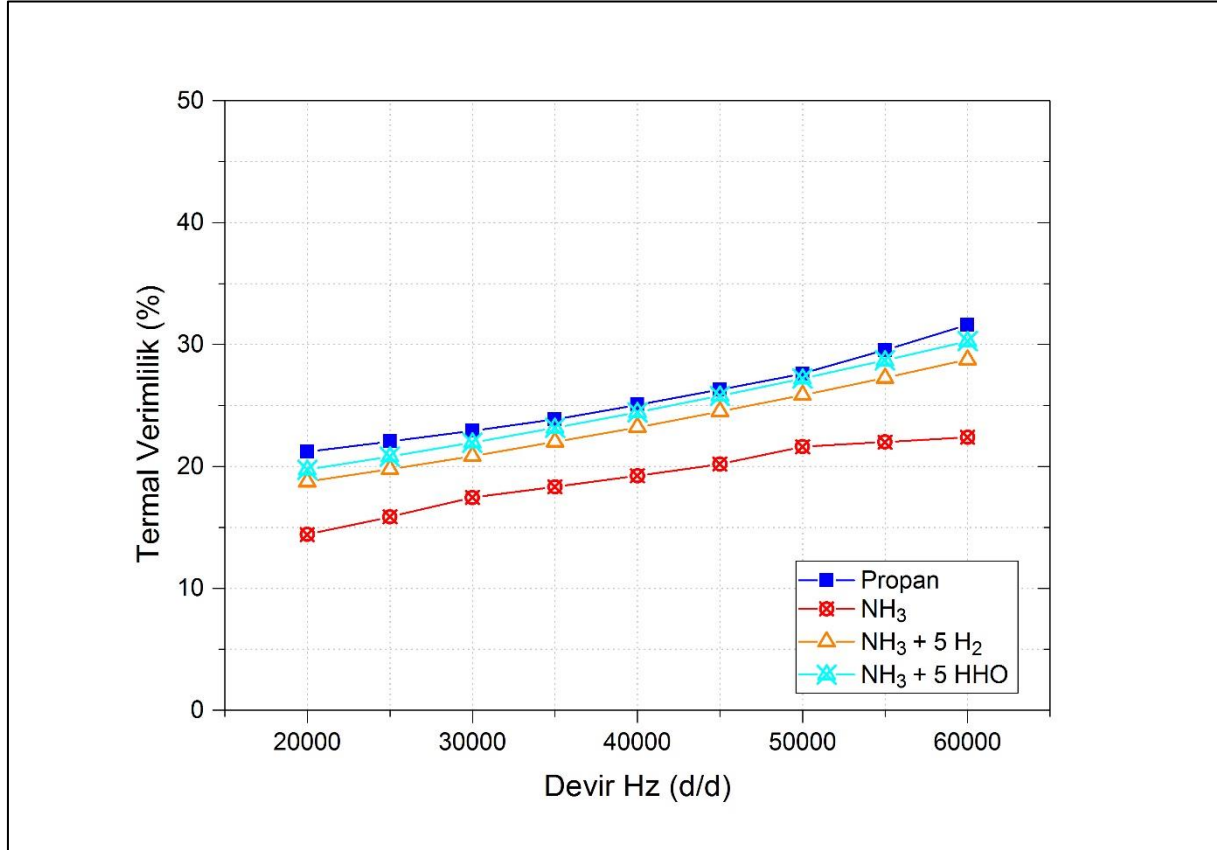


Şekil 4.4. NH₃+5HHO ve NH₃+5H₂ Devir Hızı-Güç grafiği

Şekil 4.5'te Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği verilmiştir. Yakıt zenginleştirmeleri ile standart çalışma yakıtı olan propan ile kıyaslandığında hidrojen ve hidroksi gaz zenginleştirme miktarının da bu deneyler için yeterli olmadığı görülse de bir önceki deney sonuçları göz önüne alındığında 5 L/dak yakıt zenginleştirme verilerinin propan yakıtı ile elde edilen verimliliğe daha yakın olduğunu göstermektedir. Düşük devirlerde hem NH₃-hava karışım oranının düşük olması hem de yakıtların homojen karışmaması sebebi ile yanma verimliliklerinde büyük farklılıklar görülmemektedir. Bununla birlikte bu karışım oranlarında da artan türbin hızlarında hem yeterli hava-yakıt karışımı hem de yakıt zenginleştirme ile elde edilen yanma verimliliği artmış, yakıt zenginleştirme oranları aynı görünse de bu defa hidroksi gazı zenginleştirme saf hidrojen gönderilen deneylere göre daha verimli bir yanma elde edilmesini sağlamıştır.

Sonuçlar, NH₃+5HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %3,53 ve NH₃+5H₂ yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %6,51 daha düşük termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir. Bu durum üretilen güç verilerinde olduğu gibi hali hazırda fakir yanma yapılan yanma odasında 5 L/dak yakıt zenginleştirmesinde

HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği olarak açıklanabilir. NH_3+5H_2 yakıt karışımının termal verimlilik sonuçlarının bir önceki yakıt karışımı ile yakın olmasının sebebi yanma olayına katılan H_2 miktarının artması ile ilgilidir.

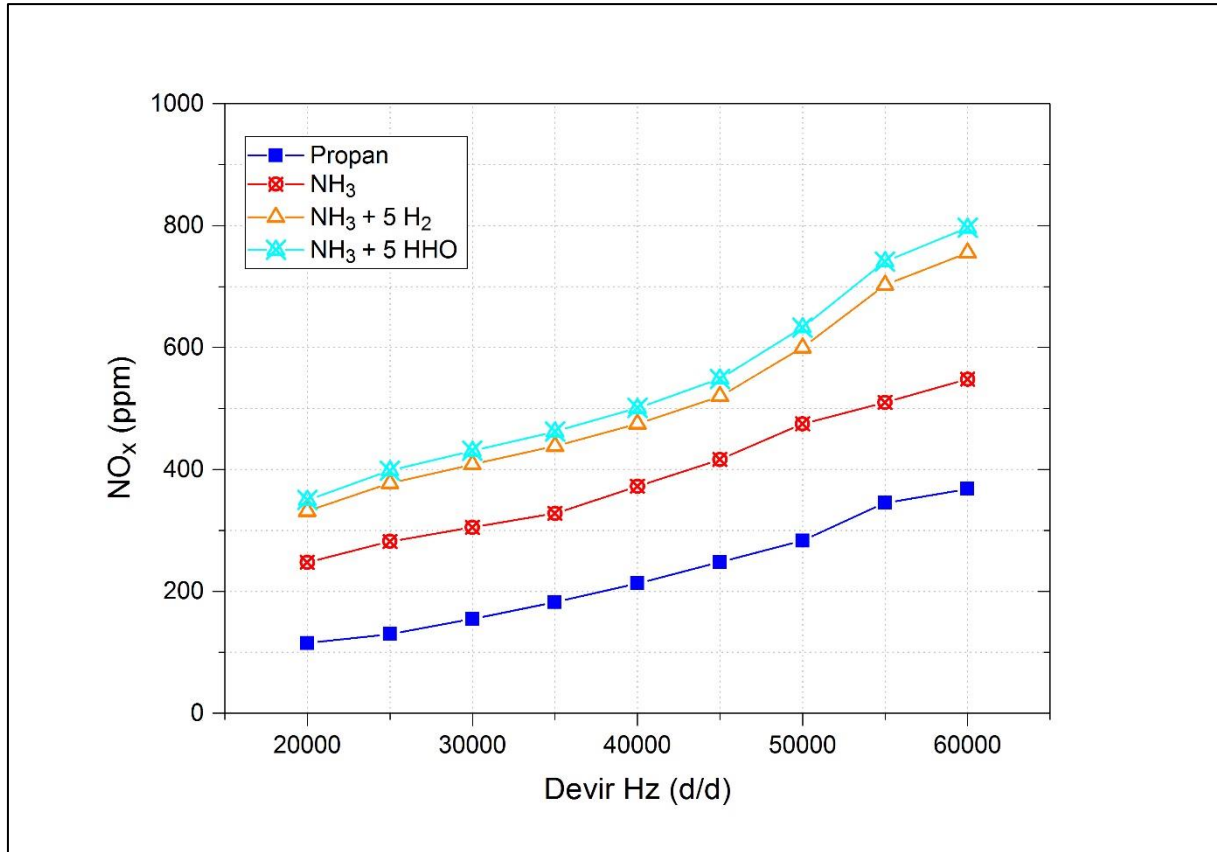


Şekil 4.5. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Devir Hızı- Termal Verimlilik grafiği

Bu yakıt karışımlarında da bir önceki hidrojen zenginleştirmelerinde olduğu gibi NO_x değerlerinin kontrolsüz bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yakıt zenginleştirmesi için kullanılan hidrojen ve HHO oranlarının 5 L/dak 'ya çıkarılması ile yapılan zenginleştirmelerde bir önceki deneye göre daha fazla NO_x oluşumu görülmektedir. Düşük yakıt-hava karışımında, H_2 ilavesinden kaynaklanan NO_x artışı, NO_x 'in logaritmik ölçüde olmasa da devir hızı ile birlikte arttığını göstermiştir. Aynı şekilde HHO gaz zenginleştirmesi sonucu elde edilen hava-yakıt karışımı daha fakir yanma koşullarında gerçekleşmiş olsa da hidrojenin yüksek ısıl değeri sebebi ile daha fazla NO_x üretildiği görülmektedir (Li, Z. ve Li, S., 2020).

Şekil 4.6'da Devir Hızı- NO_x grafiği sunulmuştur. Propan içinde bulunan karbonların yanma sırasında oksijen tutuculuğu sebebi ile NO_x emisyonu bakımından NH_3 ile kıyaslanamayacak kadar düşük değerlere sahiptir. Bir önceki yakıt karışımına kıyasla 5

L/dak yakıt zenginleştirmesi kullanılan deneylerde yüksek performansa dayalı yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında ortaya çıkan NO_x emisyonu ile karşılaştırıldığında hidrojen ve HHO zenginleştirmesi sonucu yüksek NO_x artışı elde edildiği görülmüştür. Bu durum Zeldovich mekanizması olarak bilinen yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma olayında yer alan NH_3 ün daha fazla NO_x üretimi ile açıklanabilmektedir.



Şekil 4.6. NH_3+5HHO ve NH_3+5H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği

Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH_3 'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+5HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %39,52 ve NH_3+5H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %32,26 artış görüldüğü gözlenmiştir.

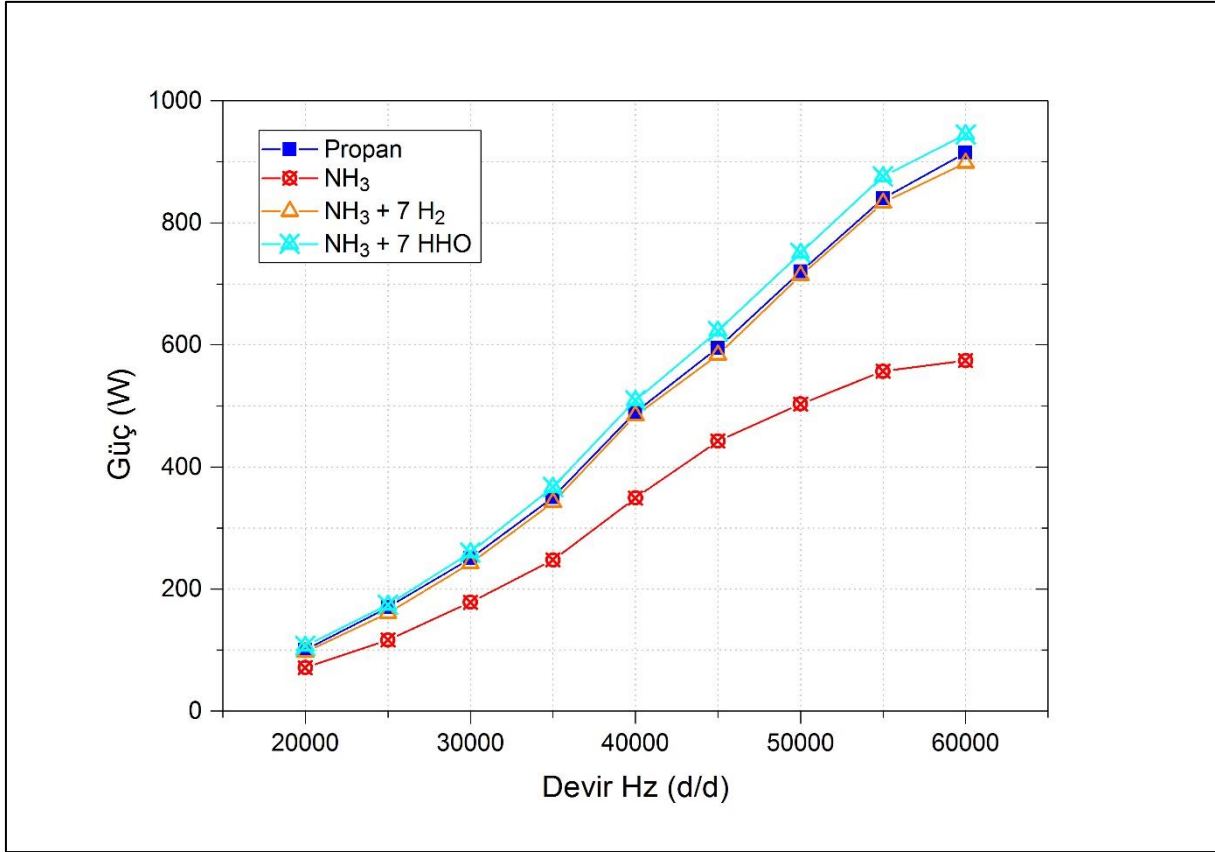
4.3. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Kıyaslaması

Şekil 4.7'de Devir Hızı- Güç grafiği sunulmuştur. 5L/dak H_2 ve HHO gazı kullanılan önceki deneylerde elde edilen veriler hidroksi gaz konsantrasyonu yüksek olan yakıtın daha fazla performans çıktılarını verdiğini göstermekteydi. Bunun sebebi fakir yanma koşullarında hidroksi gaz konsantrasyonu yüksek olan karışımın daha fazla güç çıktısı

vermesiydi. Benzer bir şekilde $\text{NH}_3 + 7\text{H}_2$ ve $\text{NH}_3 + 7\text{HHO}$ yakıt karışımları güç çıktıları incelendiğinde karışımın yanma sırasında bir önceki karışıma göre daha fazla oksijen ihtiyacı olduğu açıkça görülmektedir. Hem hidrojenin yanma sırasında oksijen ihtiyacı hem de bağları kırılan NH_3 'ten yanmaya katılan hidrojenlerin oksijen ile tepkimeye girerek daha yüksek enerji açığa çıkarması anlamına gelmektedir.

Sonuçlar, NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde propan yakıtına kıyasla %4,11 daha yüksek ve NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %1,71 daha düşük güç üretildiğini göstermektedir. Özellikle hidroksi gazın içeriğinde yer alan oksijen ile yanma performansı artmış ve bu durum yanma sonu basınç ve sıcaklıkların artması ve jeneratörde üretilen voltaj ve akımın artmasına sebep olmuştur. Bir önceki deneylerde 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği performansta yeterli iyileştirmenin elde edilememesi olarak açıklanmıştı. Yanma odasına gönderilen ekstra oksijen ihtivasının yanmaya katılmasına ihtiyaç duyulması performansta meydana gelen iyileştirmenin temel sebebi olarak gösterilebilir (Baltacioglu, Arat, Ozcanli ve Aydin, 2016).

Çalışmada propan yakıtının yüksek ısıl değeri ile elde edilen gücü sağlayan ve hatta daha fazla güç üretebilen tek yakıt karışımı NH_3+7HHO olarak bulunmuştur. Yapılan detaylı literatür araştırmaları ve yanma odasına gönderilen yakıt miktarı göz önünde bulundurulduğunda bu durum gaz türbinlerinde performans açısından kullanılmaya elverişli bir yakıt karışımı olduğunu göstermektedir. Yanma odasına gönderilen maksimum yakıt miktarı 0,0002844 kg/s $\text{NH}_3 + 7\text{HHO}$ iken tekil yakıt olarak kullanılan ve yakıt zenginleştirmesiz amonyak değeri 0,00023 kg / s olarak hesaplanmıştır. Bu durum saniyede yanma odasına gönderilen hidrojen ve oksijen miktarının yüksek olması ile açıklanabilir.

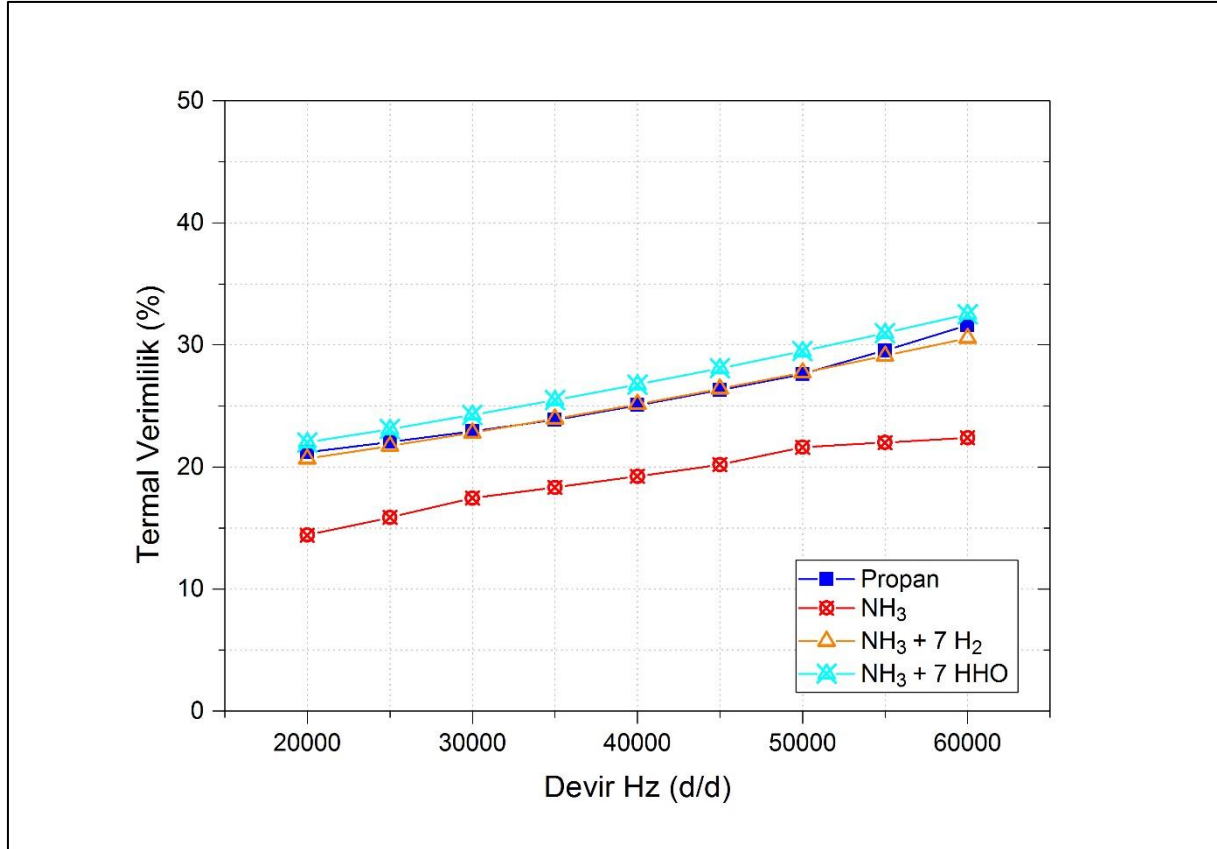


Şekil 4.7. NH₃+7HHO ve NH₃+7H₂ Devir Hızı- Güç grafiği

Şekil 4.8’de Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği verilmiştir. Yakıt zenginleştirmeleri standart çalışma yakıtı olan propan ile kıyaslandığında, hidrojen zenginleştirme miktarının bu deneyler için yeterli olmadığı görülmüştür. Bir önceki deney sonuçları göz önüne alındığında 7 L/dak hidrojen yakıt zenginleştirme verilerinin propan yakıtı ile elde edilen verimliliği az bir farkla sağladığı, ek olarak HHO zenginleştirmesinin propandan daha yüksek verimliliğe sahip olduğu görülmektedir. Düşük devirlerde hem NH₃-hava karışım oranının düşük olması hem de yakıtların homojen karışmaması sebebi ile yanma verimliliklerinde büyük farklılıklar görülmemektedir. Bununla birlikte bu karışım oranlarında da artan türbin hızlarında hem yeterli hava-yakıt karışımı hem de yakıt zenginleştirme ile elde edilen yanma verimliliği artmış, yakıt zenginleştirme oranları aynı görünse de bu defa hidroksi gazı zenginleştirme saf hidrojen gönderilen deneylere göre daha verimli bir yanma elde edilmesini sağlamıştır.

Sonuçlar, NH₃+7HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %5,42 iyileştirme sağlanırken, NH₃+7H₂ yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %0,90 daha düşük termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir. Bu durum üretilen güç

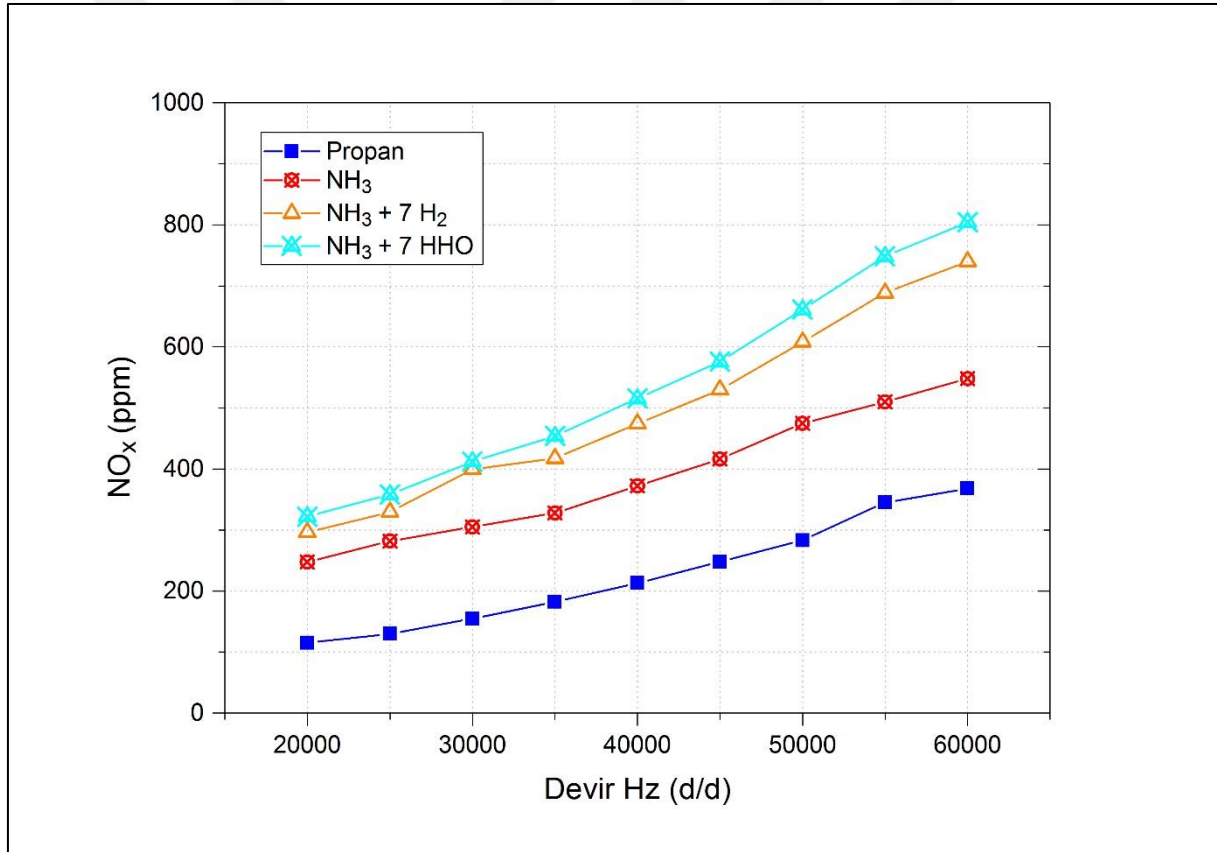
verilerinde olduğu gibi hali hazırda fakir yanma yapılan yanma odasında 7 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği olarak açıklanabilir. NH_3+7H_2 yakıt karışımının termal verimlilik sonuçlarının propan ile benzerlik göstermesinin sebebi daha yüksek sıcaklık ve yanma olayına katılan H_2 miktarının artması ile ilgilidir.



Şekil 4.8. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Devir Hızı- Termal Verimlilik grafiği

Bu yakıt karışımlarında da bir önceki hidrojen zenginleştirmelerinde olduğu gibi NO_x değerlerinin kontrolsüz bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yakıt zenginleştirmesi için kullanılan hidrojen ve HHO oranlarının 7 L/dak 'ya çıkarılması ile yapılan zenginleştirmelerde bir önceki deneye göre daha fazla NO_x oluşumu görülmektedir. Düşük yakıt-hava karışımında, H_2 ilavesinden kaynaklanan NO_x artışı, NO_x 'in logaritmik ölçüde olmasa da devir hızı ile birlikte arttığını göstermiştir. Aynı şekilde HHO gaz zenginleştirmesi sonucu elde edilen hava-yakıt karışımı daha fakir yanma koşullarında gerçekleşmiş olsa da hidrojenin yüksek ısı değeri sebebi ile daha fazla NO_x üretildiği görülmektedir (Li, Z. ve Li, S., 2020).

Şekil 4.9’da Devir Hızı- NO_x grafiği sunulmuştur. Propan içinde bulunan karbonların yanma sırasında oksijen tutuculuğu sebebi ile NO_x emisyonu bakımından NH_3 ile kıyaslanamayacak kadar düşük değerlere sahiptir. Bir önceki yakıt karışımına kıyasla 7 L/dak yakıt zenginleştirilmesi kullanılan deneylerde yüksek performansa dayalı yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında ortaya çıkan NO_x emisyonu ile karşılaştırıldığında hidrojen ve HHO zenginleştirilmesi sonucu yüksek NO_x artışı elde edildiği görülmüştür. Bu durum Zeldovich mekanizması olarak bilinen yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma olayında yer alan NH_3 ün daha fazla NO_x üretimi ile açıklanabilmektedir (Dai, Gersen, Glarborg, Levinsky ve Mokhov, 2020).



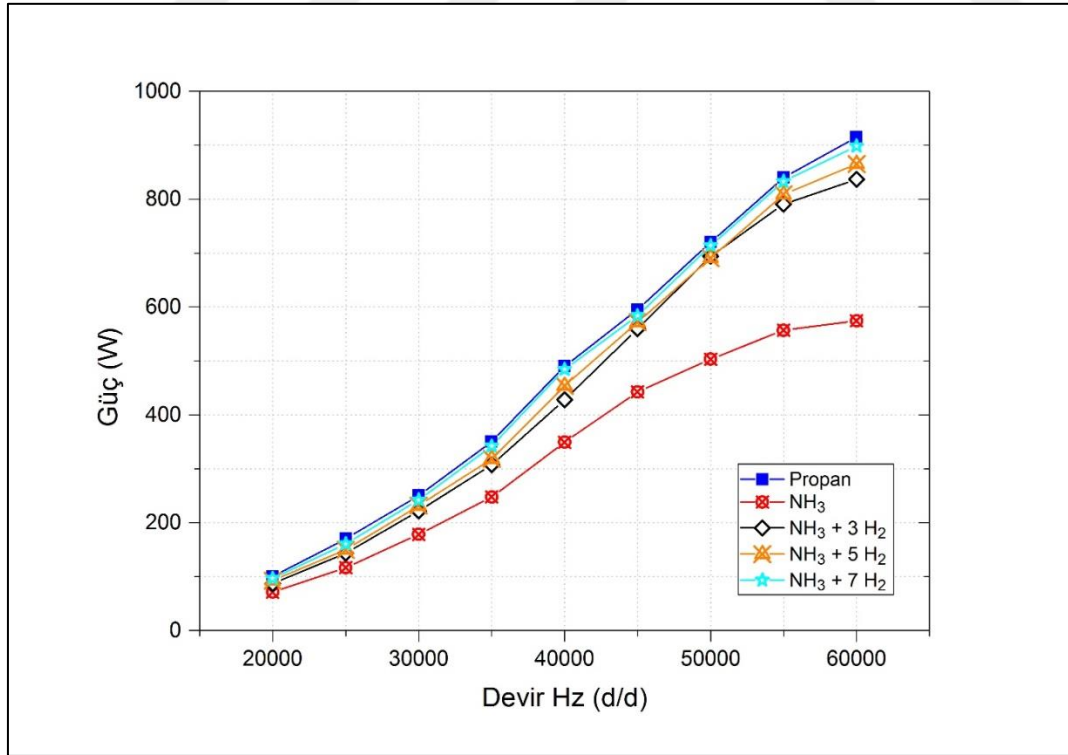
Şekil 4.9. NH_3+7HHO ve NH_3+7H_2 Devir Hızı- NO_x grafiği

Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH_3 'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %42,05 ve NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %33,90 artış görüldüğü gözlenmiştir. Performans değerlerinde iyileşme sağlandığı gibi, bu derece yüksek NO_x üretimi de literatürde yer alan diğer çalışmalarla uyum göstermektedir.

4.4. NH₃+H₂ Yakıt Karışımları Kıyaslaması

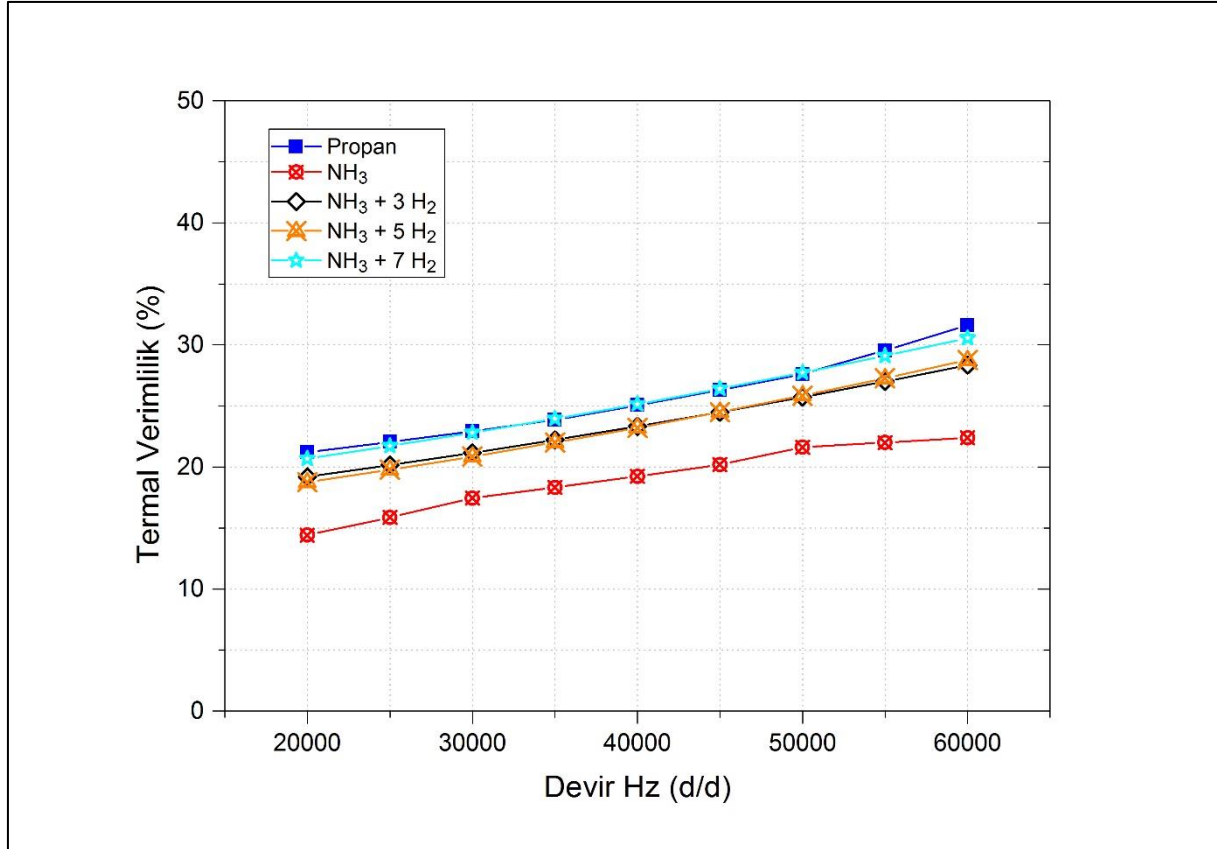
Tez çalışmasında kullanılan yakıt zenginleştirmelerinin birbiri ile kıyasları yapılarak amonyak üzerindeki performans ve emisyon değerlerine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Hidrojen için değişen yakıt karışımı oranları NH₃+3H₂, NH₃+5H₂ ve NH₃+7H₂ olarak belirlenmiş ve saf NH₃ ve propan ile kıyaslanmıştır. Hidrojen yakıt katkısı olarak kullanıldığında performans değerlerini iyileştirmekte ve NO_x emisyonlarını yanma sıcaklığına bağlı olarak arttırmaktadır.

Şekil 4.10'da Devir Hızı-Güç grafiği verilen hidrojen ile zenginleştirilmiş NH₃ yakıtlarının ürettiği güç grafikleri sunulmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde yüksek alt ısıl değer, yüksek alev hızı ve kolay tutuşabilirlik özellikleri sayesinde NH₃ yakıtı ile elde edilen performans verilerinde iyileşme elde edildiği görülmüştür. Fakat her ne kadar fakir yanma olsa da meydana gelen yanma reaksiyonları sonrası propan yakıtı kullanımı ile aynı değerler ulaşılamasa da çok NH₃+7H₂ yakıt karışımında elde edilen güç verilerinin çok yakın olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.10. NH₃+H₂ Yakıt Karışımları Devir Hızı- Güç grafiği

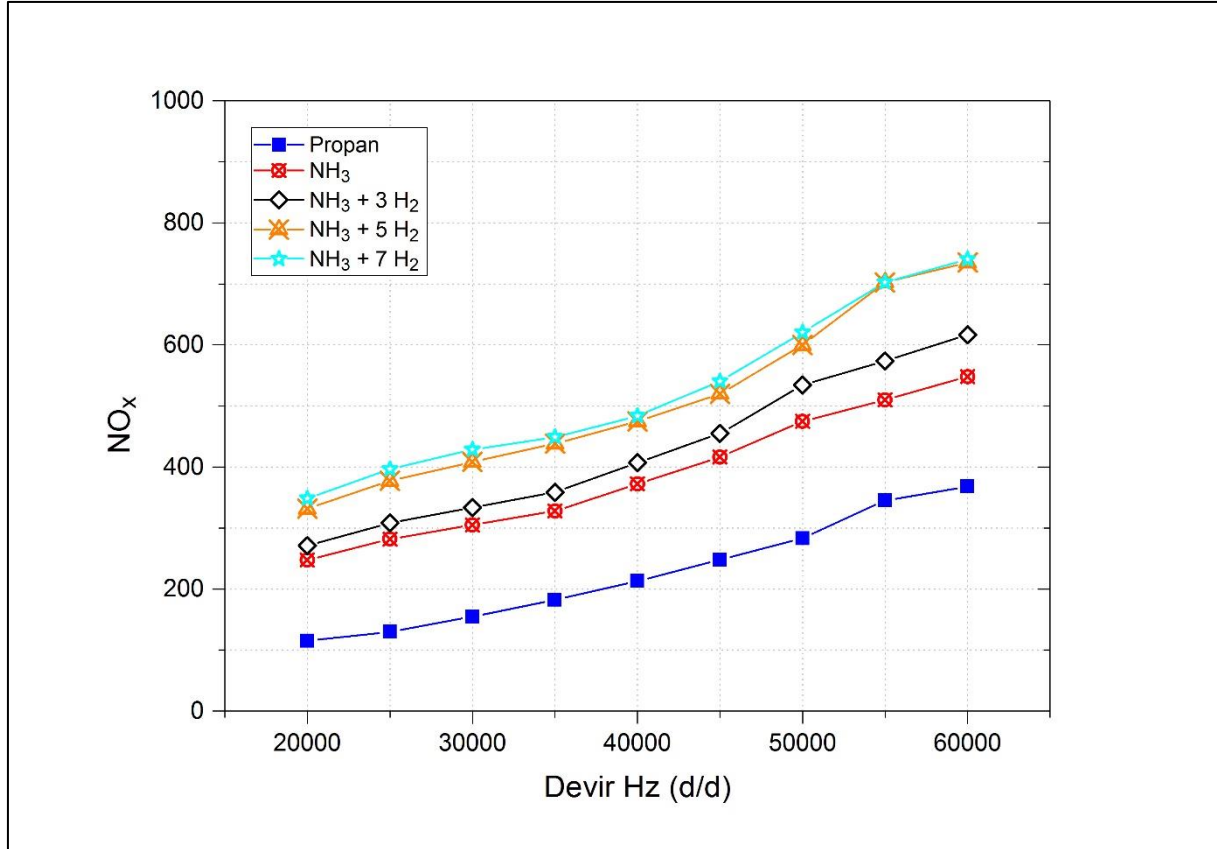
Sonuçlar, NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde maksimum iyileştirmeye sebep olmasına rağmen propan yakıtına kıyasla %1,71 daha düşük güç çıktısı elde edildiği görülmektedir. NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %31,37 daha düşük güç elde edilirken, NH_3+3H_2 ve NH_3+5H_2 güç değerlerinde sırasıyla %8,15 ve %5,58 güç düşüşü yaşanmaktadır.



Şekil 4.11. NH_3+H_2 Yakıt Karışımları Devir Hızı – Termal Verimlilik

Hidrojen yakıt zenginleştirmelerinin Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği Şekil 4.11’de verilmektedir. Termal verimlilik giren enerji ile gaz türbinlerinde elde edilen gücün bir bağıntısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek hidrojen zenginleştirmeleri yüksek güç çıktılarına sebep olurken aynı oranda termal verimliliğe, yüksek alev hızı ve egzoz kayıpları sebebi ile erişilememektedir. Yakıt zenginleştirmeleri standart çalışma yakıtı olan propan ile kıyaslandığında hidrojen zenginleştirme miktarının bu deneyler için yeterli olmadığı görülse de diğer tüm yakıtlar arasında elde edilen deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda 7 L/dak yakıt zenginleştirme verilerinin propan yakıtı ile elde edilen verimliliği neredeyse sağladığı görülmektedir.

Sonuçlar, NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %0,90 daha düşük termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir. NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %25,51 daha düşük termal verimlilik değerine sahipken, NH_3+3H_2 ve NH_3+5H_2 güç değerlerinde sırasıyla %7,09 ve %6,51 termal verimlilik değerlerinin düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. NH_3+H_2 Yakıt Karışımları Devir Hızı- NO_x grafiği

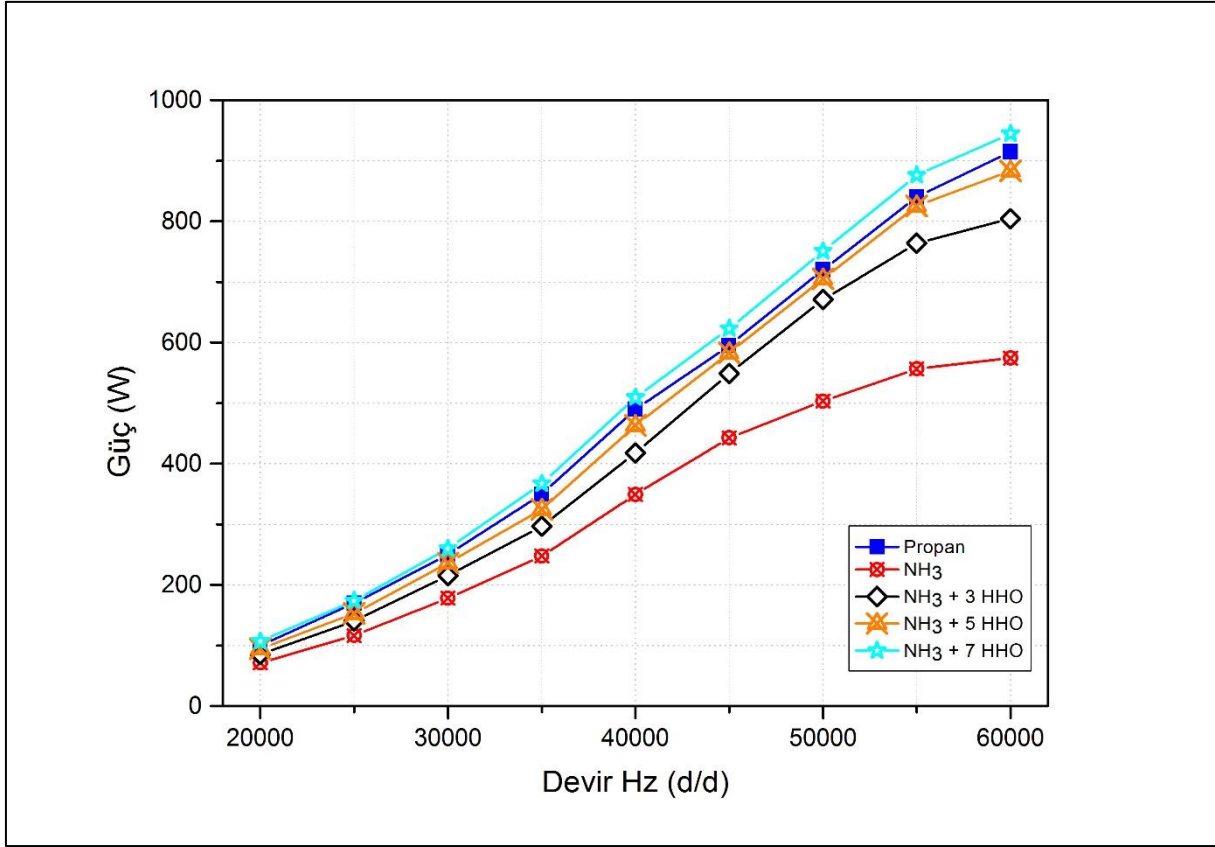
Şekil 4.12'de Devir Hızı- NO_x grafiği sunulmuştur. Hidrojen kullanımının en önemli dezavantajı olarak görülen NO_x verileri yakıt zenginleştirme seçimi yapılırken önemli rol oynayan bir başka parametre olarak görülmektedir. Hidrojen zenginleştirmeli bütün yakıt karışımları karşılaştırıldığında NH_3+7H_2 yakıt zenginleştirme kullanılan deneylerde yüksek performansa dayalı yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında ortaya çıkan NO_x emisyonu ile karşılaştırıldığında hidrojen zenginleştirme sonucu yüksek NO_x artışı elde edildiği görülmüştür. Bu durum önceki karşılaştırmalarda olduğu gibi Zeldovich mekanizması ile yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma olayında yer alan NH_3 ün daha fazla NO_x üretimi eğilimi olarak açıklanabilmektedir (Dai, Gersen, Glarborg, Levinsky ve Mokhov, 2020).

4.5. NH₃+HHO Yakıt Karışımları Karşılaştırmaları

Bu tez çalışmasının temel amacı, gaz türbinlerinde elektrik üretimi için ana yakıt olarak amonyak kullanımını ve HHO gaz zenginleştirmesinin amonyak üzerindeki olumlu etkilerini kanıtlamaktır. Bu nedenle, güneş enerjisi kullanılarak elde edilen, NH₃ + 3HHO, NH₃ + 5HHO ve NH₃ + 7HHO gazlarının farklı oranlarda zenginleştirilmiş saf NH₃ ve hidroksi gazının (HHO) gücü, ısıl verimi ve NO_x emisyonları incelenmiş ve hidrokarbon bileşik olan propan (C₃H₈) ile karşılaştırılmıştır.

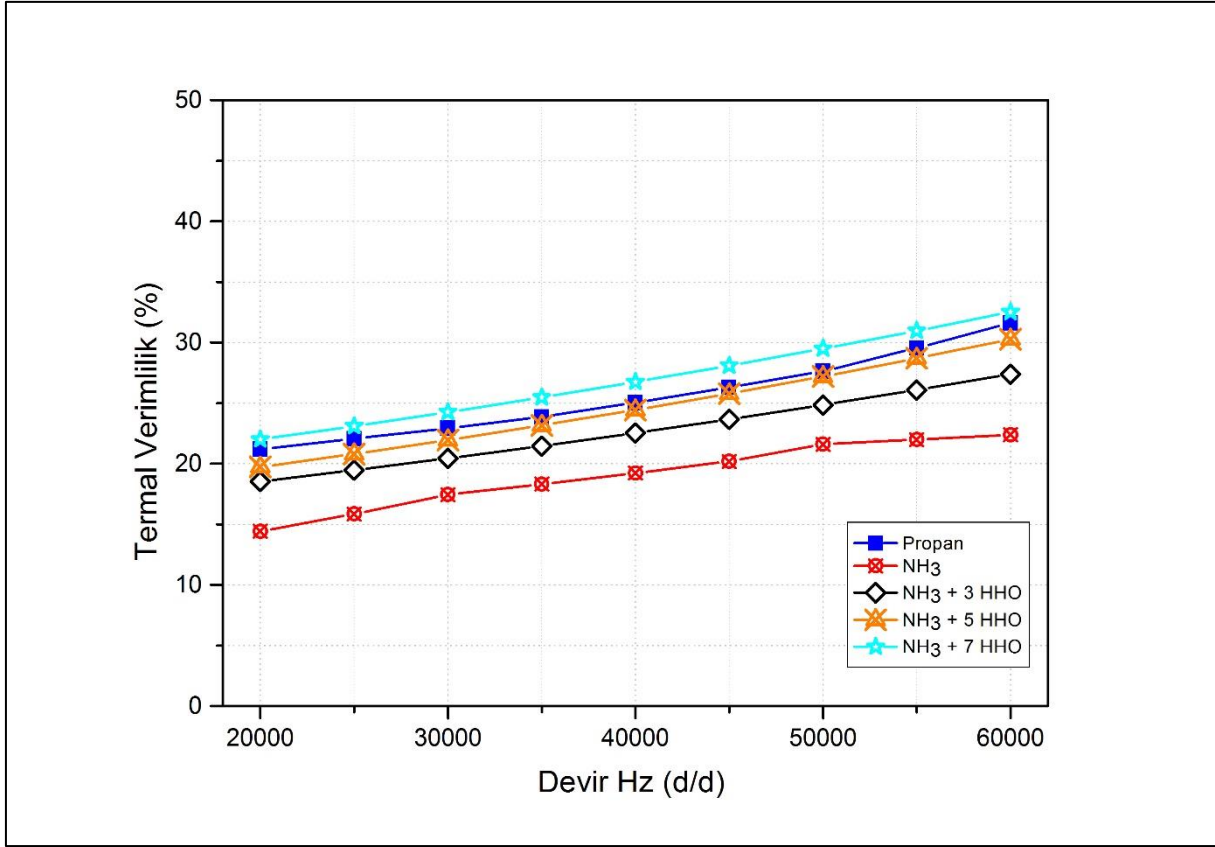
Ek olarak, bu bölümde kullanılan veriler ve grafikler International Journal of Hydrogen Energy (IJHE) isimli uluslararası hakemli dergi de yayınlanmıştır. Yayınlanan makale; “Kenanoğlu, R. ve Baltacıoğlu, E. (2020). An experimental investigation on hydroxy (HHO) enriched ammonia as alternative fuel in gas turbine. *International Journal of Hydrogen Energy*.”

Elde edilen verilere göre Devir Hızı - Güç grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi çok dar bir yanıcılık aralığına sahip olan ve düşük alev hızına sahip olan amonyak, güç üretmeye başlamasına rağmen tek yakıt olarak kullanıldığında yanma odasındaki yüksek kıvılcım ateşleme enerjisi sayesinde, üretilen güç çok düşüktür ve güç üreten uygulamalar için uygun olmadığı açıkça görülmüştür. Ancak amonyağın hidroksi (HHO) gazı ile zenginleştirilmesi ile bir hidrokarbon yakıt olan propan kadar enerji üretimi sağlandığı görülmüştür. Sadece amonyak kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen güç propan ile karşılaştırıldığında % 31,7 daha düşük iken NH₃ + 3HHO ve NH₃ + 5HHO yakıt karışımları ile elde edilen güç değerleri sırasıyla %10.98 ve %3.65 daha düşük değerlere sahipti. Ayrıca en iyi performans iyileştirmesine sahip yakıt karışımı %4,12 ile NH₃ + 7HHO oldu. Daha yüksek türbin hızlarında HHO zenginleştirmesinin güç üretimini daha fazla artırdığı görülmektedir. Bu durum, hidrojenin yüksek alev hızı ve yüksek devirlerde yanma odasına daha fazla yakıt gönderilmesi olarak açıklanabilir (Okaför, Naito, Colson, Ichikawa, Kudo, Hayakawa ve Kobayashi, 2018)



Şekil 4.13. NH₃+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – Güç grafiği

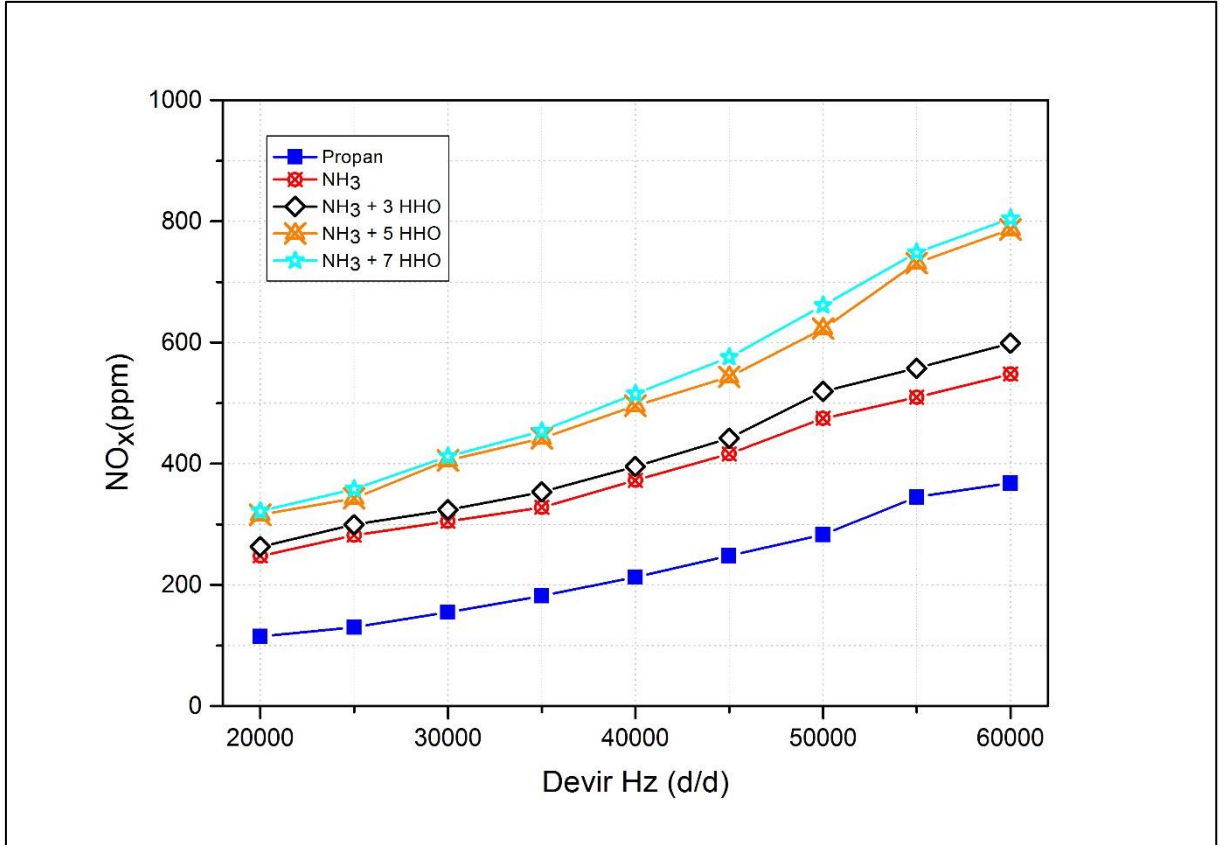
Güç değerlerine bakıldığında HHO zenginleştirmesi olmadan amonyak kullanımının etkili olmayacağı açıkça görülmektedir. Isıl verim değerlerindeki değişim, yakıtlardan elde edilen güç ile doğru orantılı olmakla birlikte grafikte bazı değişiklikler gözlenmektedir. Bu değişikliklerin nedeni, yakıt zenginleşmesine bağlı olarak değişen hava / yakıt oranı olarak gösterilmektedir. Yanma odasına gönderilen maksimum yakıt miktarı 0.0002844 kg/s NH₃ + 7HHO iken, yakıt zenginleştirmesiz amonyak değeri 0.00023 kg/s olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle yakıt zenginleştirmesinden sonra sisteme giren toplam enerji miktarı artmıştır. Enerji üretiminde olduğu gibi, en iyi ısıl verim NH₃ + 7HHO yakıt karışımı ile elde edildi. Maksimum verim oranına Şekil 4.14'da görüldüğü gibi % 32,52 ile en yüksek devir hızında ulaşılmıştır. Özellikle yüksek türbin hızlarında tam yanma için zaman ve hava eksikliği olsa da, bu gelişme ekstra oksijen içeriği ve HHO zenginleştirmesinin yüksek yanma aralığı ve yanmaya olan ekstra oksijen katkısı daha iyi yanma verimliliği sağlayabilir (Baltacıoğlu, Arat ve Kenanoğlu 2017).



Şekil 4.14. NH₃+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – Termal Verimlilik grafiği

NO_x emisyonları ele alındığında yanma sırasında güç çıkışlarını artıran performans parametrelerinin de NO_x oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklıkla doğru orantılıdır ve yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklığın bir sonucudur. Gaz türbininde daha fazla güç elde edilmesini sağlayan HHO gazındaki hidrojen atomları nedeniyle yanma sırasında yüksek ısı açığa çıkar ve bu durumun NO_x değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir [58]. Ek olarak, Zeldovich mekanizması göz önüne alındığında, daha yüksek yanma sıcaklıklarıyla daha fazla NO_x üretilecek ve NO, NH ve N₂'nin yanma ortamındaki oksijen (O) atomları ile bileşikler oluşturma eğilimi, sıcaklık yükseldikçe önemli ölçüde artacaktır (Santner, Ahmed, Farouk ve Dryer 2016). NO_x - dönüş hızı grafiği şekil 4.15'te verilmiştir.

Sonuçlar, NH₃+7HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde maksimum üretime sebep olmaktadır. NH₃ yakıtının tekil yakıt olarak kullanımına kıyasla NH₃+3 HHO %7,72 arttırarak en düşük NO_x artışı elde edildiği görülmektedir. NH₃ tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %31,37 daha düşük güç elde edilirken, NH₃+5 HHO ve NH₃+7 HHO güç değerlerinde sırasıyla %39,52 ve %42,05 NO_x artışı meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.15. NH₃+HHO Yakıt Karışımları Devir Hızı – NO_x grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelecekteki enerji krizinin çözümünde en önemli rolü oynayacak olan hidrojen, enerji taşıyıcısı ve yakıt olarak her geçen gün ilgi odağı haline gelmektedir. Günümüzde hidrojen enerjisi yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri gibi birçok uygulamada kullanılırken, hidrojeni sisteme entegre etme yöntemleri farklılık göstermektedir. Bu çalışmada hidrojen, taşıma, depolama ve güvenlik gibi bilinen dezavantajları nedeniyle sisteme amonyak (NH_3) ve HHO gazı dâhil edilmiştir. Hidrojen ve HHO yakıt zenginleştirmelerinin güç ve termal verimlilik gibi performans verileri ile birlikte en önemli emisyon çıktısı olan NO_x verileri de detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar mevcut gaz türbinlerinde herhangi bir değişiklik yapmadan amonyağın tek yakıt olarak kullanılmasının verimli olmayacağını gösterse de elektroliz ile elde edilen HHO gazı ve istenilen güç çıktıları sayesinde verimli yanma koşullarının sağlandığı görülmektedir. Çalışmanın en temel amaçlarından birini oluşturan %100 yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı yakıtların üretiminde de fosil yakıtların kullanılmamasını kapsamaktadır. Bu sebeple çalışmanın en önemli sonuçlarının başında;

- Yakıt zenginleştirme olarak kullanılan HHO gazının güneş panellerinden toplanan enerjiyle elde edilmesi, çalışmada karbon emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılmasına katkı sağlamaktadır,
- Güneş panellerinden doğrudan üretim sağlamak mümkün değildir, ikinci bir enerji kaynağına (akü, bataryaya) ihtiyaç duyulmaktadır, gibi çalışmanın temelini oluşturan maddeler gelmektedir.

Performans çıktıları incelendiğinde, amonyağın soğutma ve gizli ısı etkisini tolere etmek üzere H_2 ve HHO kullanımının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Deneylerde kullanılan gaz türbininde propan ile yapılan çalışmalarda elde edilen performans çıktıları H_2 ve HHO ile zenginleştirilmiş amonyak çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sırasında hacimce yakıt zenginleştirmeleri kategorilere ayrılmış ve daha sonra her yakıt zenginleştirme türü için ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılmıştır. Performans çıktıları incelendiğinde;

- NH_3+3HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %11,89 ve NH_3+3H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %8,15 daha düşük güç üretildiği sonucuna varılmıştır. Bunun temel sebebi hali hazırda fakir yanma yapılan yanma odasında 3 L/dak yakıt zenginleştirmesinde HHO yakıtında bulunan %66 hidrojen ve %33 oksijen içeriği olarak gösterilmiştir,
- NH_3+3HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %10,19 ve NH_3+3H_2 yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %7,09 daha düşük termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir,
- NH_3+5HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %3,65 ve NH_3+5H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %5,68 daha düşük güç üretildiği sonucuna varılmıştır,
- NH_3+5HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %3,53 ve NH_3+5H_2 yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %6,51 daha düşük termal verimlilik elde edildiği görülmektedir,
- NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde propan yakıtına kıyasla %4,11 daha yüksek ve NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde %1,71 daha düşük güç üretildiği sonucuna varılmıştır,
- NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %5,42 iyileştirme sağlanırken, NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %0,90 daha düşük termal verimlilik elde edildiği görülmektedir,

Emisyon değerleri incelendiğinde, çalışmadan tamamen çıkarılan hidrokarbon yakıtlar nedeniyle CO ve CO₂ emisyonlarının tamamen ortadan kaldırıldığı görülmektedir. Ancak yanma sırasında, özellikle HHO kullanımına bağlı olarak artan yanma sıcaklığı ile NO_x emisyonlarında istenmeyen bir artış gözlemlenmektedir.

- Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH₃'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+3HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %7,72 ve NH_3+3H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %10,75 artış görüldüğü gözlenmiştir,
- Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH₃'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+5HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %39,52 ve NH_3+5H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %32,26 artış görüldüğü gözlenmiştir,

- Sonuçlar incelendiğinde NO_x oluşumu NH_3 'ün tekil yakıt olarak kullanılmasına kıyasla NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %42,05 ve NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde %33,90 artış grldği gözlenmiştir. Performans değerlerinde iyileşme sağlandığı gibi, bu derece yüksek NO_x üretimi de literatürde yer alan diğer çalışmalarla uyum göstermektedir.

Yakıtlar hacimsel olarak kendi aralarında kıyaslandığında hidrojen ve HHO zenginleştirmesinin farklı oranlarda farklı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu durumun daha iyi yorumlanabilmesi ve performans ve emisyon değerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için her yakıt zenginleştirme türü (H_2 ve HHO) kendi içinde karşılaştırılarak performans ve emisyonlar arasındaki değişim okurlara sunulmuştur.

Performans değerleri göz önünde bulunduğunda H_2 zenginleştirmesi arttığa performans parametrelerinin yükseldiği fakat yinede yanma verimliliğinin propan yakıtına kıyasla daha düşük olduğu grlmştir. Bununla birlikte HHO zenginleştirmesinin de hacimsel olarak arttığa performans verilerinde iyileşmeye sebep olduğu görülmektedir. Ek olarak HHO zenginleştirmesi ile propan yakıt değerlerine ulaşıldığı grlmştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

- NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama güç değerlerinde maksimum iyileştirmeye sebep olmasına rağmen propan yakıtına kıyasla %1,71 daha düşük güç çıktısı elde edildiği görülmektedir. NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %31,37 daha düşük güç elde edilirken, NH_3+3H_2 ve NH_3+5H_2 güç değerlerinde sırasıyla %8,15 ve %5,58 g düşüşü meydana geldiği grlmştir,
- NH_3+7H_2 yakıt karışımının ortalama termal verimlilik değerlerinde %0,90 daha düşük termal verimlilik elde edildiğini göstermektedir. NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %25,51 daha düşük termal verimlilik değerine sahipken , NH_3+3H_2 ve NH_3+5H_2 güç değerlerinde sırasıyla %7,09 ve %6,51 termal verimlilik değerlerinin düşük olduğu görülmektedir.
- Sadece amonyak kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen güç propan ile karşılaştırıldığında % 31,7 daha düşük iken $\text{NH}_3 + 3\text{HHO}$ ve $\text{NH}_3 + 5\text{HHO}$ yakıt karışımları ile elde edilen güç değerleri sırasıyla %10,98 ve %3,65 daha düşük değerlere sahipti. Ayrıca en iyi performans iyileştirmesine sahip yakıt karışımı %4,12 ile $\text{NH}_3 + 7\text{HHO}$ olduğu grlmştir.

- En iyi ısı verim $\text{NH}_3 + 7\text{HHO}$ yakıt karışımı ile elde edildiği ve maksimum verim oranına % 32,52 ile en yüksek devir hızında ulaşıldığı görülmüştür.

Emisyon değerleri incelendiğinde ise amonyak temelli bu çalışmanın hidrojeninde yanma olayına katılması sebebi ile NO_x değerlerini her durumda yükselttiği bulguları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralabilir:

- NH_3+7H_2 yakıt zenginleştirilmesi kullanılan deneylerde yüksek performansa dayalı yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında ortaya çıkan NO_x emisyonu ile karşılaştırıldığında hidrojen zenginleştirilmesi sonucu yüksek NO_x artışı elde edildiği görülmüştür
- NH_3+7HHO yakıt karışımının ortalama NO_x değerlerinde maksimum üretime sebep olmaktadır. NH_3 yakıtının tekil yakıt olarak kullanımına kıyasla $\text{NH}_3+3 \text{ HHO}$ %7,72 arttırarak en düşük NO_x artışı elde edildiği görülmektedir. NH_3 tekil yakıt olarak kullanıldığında propan yakıtına kıyasla %31,37 daha düşük güç elde edilirken, $\text{NH}_3+5 \text{ HHO}$ ve $\text{NH}_3+7 \text{ HHO}$ güç değerlerinde sırasıyla %39,52 ve %42,05 NO_x artışı meydana geldiğini göstermektedir.

Bu çalışmada filtre kullanılmamasına rağmen literatürde bu NO_x ve yanmamış NH_3 emisyonlarının Seçici Katalizör İndirgeme (SCR) kullanılarak önlenebileceği bildirilmiştir.

Bu çalışmada, elde edilen en önemli çıktı, hidroksi (HHO) gazı ile zenginleştirilmiş amonyağın, elektrik üretimi için gaz türbinlerinde verimli bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuş olmasıdır. Bu da geleceğimiz için temiz enerji üretiminin anahtarı olacaktır.

Daha sonraki çalışmalar için tavsiye edilenler şu şekilde sıralabilir:

- Ana yakıt olarak kullanılan amonyağın %100 yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi önceliğimiz olmalıdır,

Yakıt zenginleştirmelerinde, devirlere göre farklı hacimlerde H_2 veya HHO gazlarına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Gelecekteki bir çalışmada, güç üretim döngülerinde amonyak yakıtı için optimum HHO gazı zenginleştirme oranlarını elde etmek için yapay zeka tabanlı bir kontrol kartı yürütülecektir.

- Termal verimlilik ve üretilen güç bakımından yüksek devirli türbinlerde çalışmak her zaman daha avantajlıdır. Fakat modifiye edilmemiş gaz türbinlerinde egzoz gazı iyileştirmeleri yapılmalıdır.
- Kontrolsüz NO_x artışı göz önünde bulundurulduğunda, bu artışa sebep olan hidrojen ve HHO zenginleştirmelerinin yanma odasına alınması da yine bir kontrol kartı yoluyla sağlanabileceği görülmektedir.



KAYNAKLAR

- Acar, C. ve Dincer, I. (2018). 3.1 Hydrogen Production. *Comprehensive energy systems*, 3-39.
- Adams, W. G. ve Day, R. E. (1877). IX. The action of light on selenium. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (167), 313-349.
- Adefarati, T. ve Bansal, R. C. (2019). Energizing renewable energy systems and distribution generation. In *Pathways to a smarter power system* (29-65). Academic Press.
- Adefarati, T., Papy, N. B., Thopil, M. ve Tazvinga, H. (2017). Non-renewable distributed generation technologies: a review. In *Handbook of Distributed Generation* (69-105). Springer, Cham.
- Alam, N. ve Pandey, K. M. (2017, August). Experimental Study of Hydroxy Gas (HHO) Production with Variation in Current, Voltage and Electrolyte Concentration. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (225)-. 012197.
- Amalia R., Nurisma R.A and Efendi S., (2020). The Effect of Oxy Hydrogen Gas addition on Dry Cell Generator's Performance. *2020 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia, 2020, (74-77), doi: 10.1109/IES50839.2020.9231745.
- Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K., Özcanlı, M. ve Aydın, K. (2016). Effect of using Hydroxy-CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. *International journal of hydrogen energy*, 41(19), 8354-8363.
- Ayaz S. K. (2019). Bir gaz türbin motorunda ikili-yakıt kullanılmasının ekonomik ve çevresel etkilerinin incelenmesi (Yayımlanmış Doktora Tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.
- Aydın, K. ve Kenanoğlu, R. (2018). Effects of hydrogenation of fossil fuels with hydrogen and hydroxy gas on performance and emissions of internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(30), 14047-14058.
- Baltacıoğlu, M. K. (2019). A novel application of pulse width modulation technique on hydroxy gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9726-9734.
- Baltacıoğlu, M. K., Arat, H. T. ve Kenanoğlu, R. (2017). Exergy and performance analysis of a CI engine fuelled with HCNG gaseous fuel enriched biodiesel. *International Journal of Exergy*, 24(1), 39-56
- Baltacıoğlu, M. K., Arat, H. T., Özcanlı, M. ve Aydın, K. (2016). Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 8347-8353.
- Bari, S. ve Esmaeil, M. M. (2010). Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378-383.
- Barsi, D., Perrone, A., Qu, Y., Ratto, L., Ricci, G., Sergeev, V. ve Zunino, P. (2018). Compressor and turbine multidisciplinary design for highly efficient micro-gas turbine. *Journal of Thermal Science*, 27(3), 259-269.
- Bequerel, E. (1839). Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques. *CR Acad. Sci*, 9(145), 1.
- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G. ve Raso, F. (2016). Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1379-1395.

- Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, A., Sarı, A. ve Kaygusuz, K. (2008). Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(2), 372-396.
- Boretti, A. (2017). Novel dual fuel diesel-ammonia combustion system in advanced TDI engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(10), 7071-7076.
- Bow, Y. ve Dewi, T. (2019, April). HHO Gas Generation in Hydrogen Generator using Electrolysis. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (258)-012007. IOP Publishing.
- Boyle, G. (2004). Photovoltaic power. In: ed. *Renewable energy: power for a sustainable future [2nd ed.]*. Oxford, UK: Oxford University Press, 66–104.
- Božo, M. G., Viguera-Zuniga, M. O., Buffi, M., Seljak, T. ve Valera-Medina, A. (2019). Fuel rich ammonia-hydrogen injection for humidified gas turbines. *Applied Energy*, 251, 113334.
- Brown, Y. (1977). *U.S. Patent No. 4,014,777*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Corumlu, V., Ozsoy, A. ve Ozturk, M. (2018). Thermodynamic studies of a novel heat pipe evacuated tube solar collectors based integrated process for hydrogen production. *international journal of hydrogen energy*, 43(2), 1060-1070.
- Cunow, E. ve Giesler, B. (2001). The megawatt solar roof at the new Munich Trade Fair Centre—an advanced and successful new concept for PV plants in the megawatt range. *Solar energy materials and solar cells*, 67(1-4), 459-467.
- Dahake, M. R., Patil, S. D. ve Patil, S. E. (2016). Effect of hydroxy gas addition on performance and emissions of diesel engine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(01).
- Dai, L., Gersen, S., Glarborg, P., Levinsky, H. ve Mokhov, A. (2020). Experimental and numerical analysis of the autoignition behavior of NH₃ and NH₃/H₂ mixtures at high pressure. *Combustion and Flame*, 215, 134-144.
- De Levie, R. (1999). The electrolysis of water. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 476(1), 92-93.
- Di Gaeta, A., Reale, F., Chiariello, F. ve Massoli, P. (2017). A dynamic model of a 100 kW micro gas turbine fuelled with natural gas and hydrogen blends and its application in a hybrid energy grid. *Energy*, 129, 299-320.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 4(2), 157-175.
- Dincer, I. ve Cengel, Y. A. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy*, 3(3), 116-149.
- Dresselhaus, M. S. ve Thomas, I. L. (2001). Alternative energy technologies. *Nature*, 414(6861), 332-337.
- Duong, H. (2016). *U.S. Patent Application No. 14/947,441*.
- El-Shatter, T. F., Eskandar, M. N. ve El-Hagry, M. T. (2002). Hybrid PV/fuel cell system design and simulation. *Renewable Energy*, 27(3), 479-485.
- Erenonal, R. ve Özgören, Y. Ş. (2014). Buji Ateşlemeli Motorlarda Etanol-Benzin, Mtb-Benzin ve Methanol-Benzin Karışımlarının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(1), 11-22.
- ESMAP, SOLARGIS. "WB, and IFC, "Global Solar Atlas,." *Glob. Sol. Atlas* (2019): 1.
- Felgenhauer, M. ve Hamacher, T. (2015). State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2084-2090.

- Giddey, S., Badwal, S. P. S., Munnings, C. ve Dolan, M. (2017). Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS Sustainable Chemistry ve Engineering*, 5(11), 10231-10239.
- Gül, M. ve Akyüz, E. (2020). Hydrogen Generation from a Small-Scale Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Electrolyzer System: Numerical Model and Experimental Verification. *Energies*, 13(11), 2997.
- Hacker, V. ve Kordesch, K. (2010). Ammonia crackers. *Handbook of fuel cells*.
- Hosseini, S. E. (2020). Performance evaluation of a solarized gas turbine system integrated to a high temperature electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 21068-21086.
- Hussein, N. A., Valera-Medina, A. ve Alsaegh, A. S. (2019). Ammonia-hydrogen combustion in a swirl burner with reduction of NOx emissions. *Energy Procedia*, 158, 2305-2310.
- IEA (2019), Change in global electricity generation by selected technology and scenario, 2000-2019 and 2019-2040, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/change-in-global-electricity-generation-by-selected-technology-and-scenario-2000-2019-and-2019-2040> (13.12.2021)
- IEA (2018) Hydrogen production costs by production source, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>
- IEA (2020), Electricity security in tomorrow's power systems, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/electricity-security-in-tomorrow-s-power-systems> (13.12.2021)
- Iki, N., Kurata, O., Matsunuma, T., Inoue, T., Suzuki, M., Tsujimura, T. ve Furutani, H. (2015, June). Micro gas turbine firing kerosene and ammonia. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 56796, p. V008T23A023). American Society of Mechanical Engineers.
- Ito, M., Kato, K., Sugihara, H., Kichimi, T., Song, J. ve Kurokawa, K. (2003). A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75(3-4), 507-517.,
- Jack, L. 1991. Photovoltaic; Unlimited Electrical Energy from the Sun *Physics Today* 64: 5.
- Jenniches, S. (2018). Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources—A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 35-51.
- Kalantari, A., Sullivan-Lewis, E. ve McDonell, V. (2017). Application of a turbulent jet flame flashback propensity model to a commercial gas turbine combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(4).
- Karabeyoglu, A. ve Evans, B. (2012, October). Fuel conditioning system for ammonia fired power plants. In *NH3 Congress, Iowa, USA*.
- Karabeyoglu, A., Evans, B., Stevens, J., Cantwell, B. ve Micheletti, D. (2012). Development of ammonia based fuels for environmentally friendly power generation. In *10th international energy conversion engineering conference* (4055).
- Keller, M., Koshi, M., Otomo, J., Iwasaki, H., Mitsumori, T. ve Yamada, K. (2020). Thermodynamic evaluation of an ammonia-fueled combined-cycle gas turbine process operated under fuel-rich conditions. *Energy*, 194, 116894.

- Khalid, F., Dincer, I. ve Rosen, M. A. (2018). Model development and analysis of a novel high-temperature electrolyser for gas phase electrolysis of hydrogen chloride for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9112-9118.
- Koc, Y., Kose, O. ve Yagli, H. (2019). Exergy analysis of a natural gas fuelled gas turbine based cogeneration cycle. *International Journal of Exergy*, 30(2), 103-125.
- Krishna, V. M., Reddy, A. H., Kumar, M. S. ve Raghu, A. (2020). Effect of hydroxy gas addition on performance and exhaust emissions in variable compression spark ignition engine. *Materials Today: Proceedings*, 24, 930-936.
- Kroch, E. (1945). Ammonia--a fuel for motor buses. *J. Inst. Pet*, 31, 213.
- Kumar, R. R. ve Pandey, K. M. (2017). Static structural and modal analysis of gas turbine blade. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (225) - 012102*.
- Kurata, O., Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Tsujimura, T., Furutani, H., ... ve Kobayashi, H. (2019). Development of a wide range-operable, rich-lean low-NOx combustor for NH₃ fuel gas-turbine power generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4587-4595
- Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Tsujimura, T., Furutani, H., ... ve Hayakawa, A. (2017). Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃CH₄-air combustion gas-turbine power generations. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3), 3351-3359
- Kyriakou, V., Garagounis, I., Vasileiou, E., Vourros, A. ve Stoukides, M. (2017). Progress in the electrochemical synthesis of ammonia. *Catalysis Today*, 286, 2-13.
- Lamy, C. (2016). From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(34), 15415-15425.
- Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., He, Z. ve Nagai, Y. (2014). Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO_x formation. *International journal of energy research*, 38(9), 1214-1223
- Li, Z. ve Li, S. (2020). Kinetics modeling of NO_x emissions characteristics of a NH₃/H₂ fueled gas turbine combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Maclay, J. D., Brouwer, J. ve Samuelsen, G. S. (2006). Dynamic analyses of regenerative fuel cell power for potential use in renewable residential applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(8), 994-1009.
- Miller, J. A., Smooke, M. D., Green, R. M. ve Kee, R. J. (1983). Kinetic modeling of the oxidation of ammonia in flames. *Combustion Science and Technology*, 34(1-6), 149-176.
- Moreno-Soriano, R., Soriano-Moranchel, F., Flores-Herrera, L. A., Sandoval-Pineda, J. M. ve González-Huerta, R. D. G. (2020). Thermal Efficiency of Oxyhydrogen Gas Burner. *Energies*, 13(20), 5526.
- Muneer, T., Asif, M. ve Kubie, J. (2003). Generation and transmission prospects for solar electricity: UK and global markets. *Energy conversion and management*, 44(1), 35-52.
- Nozari, H. ve Karabeyoğlu, A. (2015). Numerical study of combustion characteristics of ammonia as a renewable fuel and establishment of reduced reaction mechanisms. *Fuel*, 159, 223-233.
- Nozari, H. ve Karabeyoglu, A. M. (2015). Combustion characteristics of ammonia as a renewable energy source and development of reduced chemical mechanisms. In *13th International Energy Conversion Engineering Conference (3917)*.

- Okafor, E. C., Naito, Y., Colson, S., Ichikawa, A., Kudo, T., Hayakawa, A. ve Kobayashi, H. (2018). Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames. *Combustion and Flame*, 187, 185-198
- Okafor, E. C., Somarathne, K. K. A., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N. ve Kobayashi, H. (2019). Towards the development of an efficient low-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4597-4606.
- Papadopoulos, V., Desmet, J., Knockaert, J. ve Develder, C. (2018). Improving the utilization factor of a PEM electrolyzer powered by a 15 MW PV park by combining wind power and battery storage-Feasibility study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(34), 16468-16478.
- Pashchenko, D. (2018). Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit. *Energy Conversion and Management*, 171, 917-924.
- Philibert, C. (2017). Producing ammonia and fertilizers: new opportunities from renewables. *International Energy Agency*.
- Polyzakis, A. L., Koroneos, C. ve Xydis, G. (2008). Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant. *Energy conversion and management*, 49(4), 551-563.
- Poponi, D. (2003). Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology based on experience curves. *Solar Energy*, 74(4), 331-340.
- Rehman, S., Bader, M. A. ve Al-Moallem, S. A. (2007). Cost of solar energy generated using PV panels. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(8), 1843-1857.
- Sadeghi, M., Chitsaz, A., Marivani, P., Yari, M. ve Mahmoudi, S. M. S. (2020). Effects of thermophysical and thermochemical recuperation on the performance of combined gas turbine and organic rankine cycle power generation system: Thermoeconomic comparison and multi-objective optimization. *Energy*, 210, 118551.
- Santner, J., Ahmed, S. F., Farouk, T. ve Dryer, F. L. (2016). Computational Study of NO_x Formation at Conditions Relevant to Gas Turbine Operation: Part 1. *Energy ve Fuels*, 30(8), 6745-6755
- Schlapbach, L. ve Züttel, A. (2011). Hydrogen-storage materials for mobile applications. In *Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from nature publishing group* (265-270).
- Shah, S. Q., Ali, Z., Larik, J. ve Kaimkhani, A. A. (2018, March). Comparative study of dry cell and wet cell for the HHO gas generation as a supplement fuel for IC engine. In *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (1-8). IEEE.
- Sharma, P. K., Sharma, D., Soni, S. L., Jhalani, A., Singh, D. ve Sharma, S. (2020). Characterization of the hydroxy fueled compression ignition engine under dual fuel mode: Experimental and numerical simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8067-8081.
- Siddiqui, O. ve Dincer, I. (2019). Development and assessment of a novel integrated system using an ammonia internal combustion engine and fuel cells for cogeneration purposes. *Energy ve Fuels*, 33(3), 2413-2425.
- Smolinka, T. (2009). Fuels - hydrogen production | water electrolysis. *Encyclopedia of electrochemical power sources* (pp. 394-413) doi:10.1016/B978-044452745-5.00315-4.

- Sousa, J., Paniagua, G. ve Morata, E. C. (2017). Thermodynamic analysis of a gas turbine engine with a rotating detonation combustor. *Applied Energy*, 195, 247-256.
- Sürer, M. G. ve Arat, H. T. (2018). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20-30.
- Ustun, I., Karakus, C. ve Yagli, H. (2020). Empirical models for estimating the daily and monthly global solar radiation for Mediterranean and Central Anatolia region of Turkey. *International Journal of Global Warming*, 20(3), 249-275.
- Üstün, İ. (2018). *Regresyon ve multi regresyon analizleri kullanılarak güneş ışınım miktarının tahmininde yeni modellerin oluşturulması* (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Valera Medina, A., Morris, S., Runyon, J., Pugh, D. G., Marsh, R., Beasley, P. ve Hughes, T. (2015). Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines. *Energy Procedia*, 75, 118-123.
- Valera-Medina, A., Pugh, D. G., Marsh, P., Bulat, G. ve Bowen, P. (2017). Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24495-24503.
- Verkamp, F. J., Hardin, M. C. ve Williams, J. R. (1967, January). Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners. In Symposium (International) on Combustion (11) - 985-992. Elsevier.
- Walker, S. B., Van Lanen, D., Fowler, M. ve Mukherjee, U. (2016). Economic analysis with respect to Power-to-Gas energy storage with consideration of various market mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 7754-7765.
- Xiao, H., Valera-Medina, A. ve Bowen, P. J. (2017). Modeling combustion of ammonia/hydrogen fuel blends under gas turbine conditions. *Energy ve Fuels*, 31(8), 8631-8642.
- Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A. ve Tandiroğlu, A. (2016). Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat. *Energy*, 111, 923-932.
- Yapicioglu, A. ve Dincer, I. (2019). A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 96-108.
- Yilmaz, A. C., Uludamar, E. ve Aydin, K. (2010). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *international journal of hydrogen energy*, 35(20), 11366-11372.
- Zamfirescu, C. ve Dincer, I. (2009). Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. *Fuel processing technology*, 90(5), 729-737.
- Zervas, P. L., Sarimveis, H., Palyvos, J. A. ve Markatos, N. C. G. (2008). Model-based optimal control of a hybrid power generation system consisting of photovoltaic arrays and fuel cells. *Journal of power sources*, 181(2), 327-338.
- Zhang, H., Wang, L., Maréchal, F. ve Desideri, U. (2020). Techno-economic comparison of green ammonia production processes. *Applied Energy*, 259, 114135.
- Zhang, W., Maleki, A., Rosen, M. A. ve Liu, J. (2018). Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage. *Energy*, 163, 191-207.
- Zhou, X., Lu, F., Zhou, W. ve Huang, J. (2020). An improved multivariable generalized predictive control algorithm for direct performance control of gas turbine engine. *Aerospace Science and Technology*, 99, 105576.

- Zhou, X., Yang, J., Wang, F. ve Xiao, B. (2009). Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 736-749.
- Zohuri, B. (2018). Hydrogen energy: Challenges and solutions for a cleaner future. *Springer*.



DİZİN

A

Amonyak

1, 3, 4, 10, 11, 16, 18, 21
22, 26, 27, 28, 31, 35,
38, 60, 61, 62, 74,
83, 82

H

HHO, hidrojen 1, 4, 6, 7,

10, 58, 59, 62, 63, 64,
65, 66, 67, 69, 71, 72,
74, 76, 78, 82, 83

PPerformans 4, 13, 31, 32,
33, 35, 38, 40, 45, 47, 49
51, 55, 59, 76, 77, 78,
79, 80, 81, 82, 83

EEmisyon 1, 4, 10, 11, 16,
18, 21, 22, 26, 27, 28,
31, 35, 38, 60, 22, 34,
74, 75, 76, 77, 78, 83

G

Gaz Türbini

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
10, 12, 13, 14, 15, 16, 18
20, 21, 23,
24, 27, 28, 30, 31, 35,
41, 42, 43, 48, 51, 54,
59, 63, 64, 65, 66, 67,
68, 69, 70, 71, 73, 75

NNO_x 1, 4, 12, 26, 29, 33,
34, 36, 70, 71, 74, 76,
81, 82, 83



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

