

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN KARIŞIMLI YAKITLARIN GEMİLERE
UYGULANABİLİRLİĞİNİN VE EMİSYON SALINIMLARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak ZİNCİR

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN KARIŞIMLI YAKITLARIN GEMİLERE
UYGULANABİLİRLİĞİNİN VE EMİSYON SALINIMLARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Burak ZİNCİR
(512111013)**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cengiz DENİZ

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 512111013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Burak ZİNCİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Hidrojen Karışımli Yakıtların Gemilere Uygulanabilirliğinin ve Emisyon Salınımlarına Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Cengiz DENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Metin ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Dr. Fırat BOLAT
T.C. Ulaştırma Bakanlığı

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı oluşturmamda yapıcı eleştirileri ve tavsiyeleri ile yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. Cengiz DENİZ hocama, manevi destekleri ile beni yalnız bırakmayan aileme, tez çalışmalarımda kullandığım gemi ve geminin seyir bilgilerini bana sağladıkları için SEAHORSE Denizcilik ve Mühendislik'e teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Burak ZİNCİR
Gemi Makineleri İşletme Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Denizcilik Sektöründe Yürürlükte Olan Hava Kirliliği ile Alakalı Uluslararası Kurallar.....	2
1.1.1 NO _x gazları ile ilgili çalışmalar	4
1.1.2 SO _x gazları ile ilgili çalışmalar.....	5
1.1.3 CO ₂ gazları ile ilgili çalışmalar	7
2. GEMİLERDEN KAYNAKLI EMİSYONLARI AZALTMAK İÇİN KULLANILAN SİSTEMLER	9
2.1 Egzoz Gazı Resirkülasyon Sistemi (EGR).....	9
2.2 Seçici Katalitik Azaltma (SCR)	10
2.3 SO _x Filtreleme Sistemi (SO _x Scrubber)	11
2.4 Silindir İçine Su Püskürtme.....	13
2.5 Skavenç Havası Nemlendirme (SAM) Yöntemi.....	13
2.6 Atık Isı Kazanım Sistemi	14
2.7 Miller Çevrimi.....	15
2.8 LNG Çift Yakıt Sistemi.....	15
3. HİDROJEN KULLANIMI İLE EMİSYONLARIN AZALTILMASI	19
3.1 Hidrojenin Yanma Özellikleri.....	20
3.1.1 Geniş alev alma aralığı.....	20
3.1.2 Alev hızı.....	20
3.1.3 Minimum tutuşma enerjisi	20
3.1.4 Yüksek difüzyon hızı	20
3.1.5 Yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	21
3.1.6 Stokiyometrik hava - yakıt oranı.....	21
3.2 Hidrojenin Dizel Motorlarda Yanma Etkisi	21
3.3 Hidrojenin Elde Edilme Yöntemleri	23
3.3.1 Hidrojenin fosil yakıtlardan üretimi.....	23
3.3.2 Hidrojenin suyun elektrolizi ile üretimi	24
3.3.2.1 Alkalın elektroliz.....	24
3.3.2.2 Polimer perde elektrolit elektroliz (PEM).....	26
3.3.2.3 Yüksek ısıli elektroliz	26
3.3.3 Hidrojenin fotoliz ile üretimi	26
3.3.4 Hidrojenin foro-biyolojik işlem ile üretimi.....	27

3.3.5 Hidrojenin yüksek ısı ile bozunma işlemi ile üretimi	27
3.4 Hidrojeni Depolama Yöntemleri	28
4. HİDROJENİN YAKIT OLARAK KULLANIMI İLE İLGİLİ LİTERATÜR	
ÇALIŞMALARI	31
4.1 Saf Hidrojen ile Çalışmalar	31
4.2 Benzin - Hidrojen ile Çalışmalar	32
4.3 Dizel -Hidrojen ile Çalışmalar.....	34
4.4 Hidrojenin Dizel Yakıt ile Beraber Kullanımına İlişkin Deneysel Çalışma	39
5. ALKALİN ELEKTROLİZ METODUNUN GEMİLERE	
UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ	45
5.1 Sistemin Kurulumu.....	48
5.2 Geminin Tükettiği Yakıt Miktarı ve Yakıt Masrafı	52
5.3 Sistemin Tüketeceği Elektrik Miktarı	53
5.4 Sistemin Tüketeceği Saf Su Miktarı.....	54
5.5 Sistem Sayesinde Elde Edilecek Yakıt Tasarruf Miktarı	54
5.6 Geminin Ürettiği Emisyon Miktarı	57
5.7 Maliyet Analizi.....	59
6. SONUÇ	63
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
BM	: Birleşmiş Milletler
BSU	: Bosch Duman Birimi
CFCs	: Kloroflorokarbonlar
ECA	: Emisyon Kontrol Alanı
EEDI	: Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EIAPP	: Makine Uluslararası Hava Kirliliğini Önleme Sertifikası
GRT	: Gros tonaj
HFO	: Ağır yakıt
IAPP	: Uluslararası Hava Kirliliğini Önleme Sertifikası
IEE	: Uluslararası Enerji Verimliliği Sertifikası
IMO	: Uluslararası Denizcilik Organizasyonu
KOH	: Potasyum hidroksit
LBP	: Baş - kık kaideler arasındai boy
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz
LOA	: Gemi tam boyu
MARPOL	: Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi
MCR	: Maksimum sürekli değer
MDO	: Deniz dizel yakıtı
MEPC	: Deniz Çevresini Koruma Komitesi
NaCl	: Sodyum klorür
NaOH	: Sodyum hidroksit
NRT	: Net tonaj
PEM	: Polimer perde elektrolit
PM	: Partikül madde
SAM	: Skavenç Havası Nemlendirme
SCR	: Seçici Katalitik Azaltma
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Kyoto protokolü ek I'de belirtilen üye devletlerin emisyon azaltma hedefleri ve maksimum emisyon limitleri.....	2
Çizelge 1.2 : MARPOL Ek VI maddeleri.....	4
Çizelge 1.3 : NO _x Teknik Kanunnamesi emisyon limitleri.	5
Çizelge 2.1 : Gemilerde kullanılan sistemlerin emisyonlara ve yakıt tüketimine etkileri.....	17
Çizelge 3.1 : Dizel yakıt ve hidrojenin özelliklerinin karşılaştırılması	19
Çizelge 4.1 : Antwerp Limanı MSC Terminali'ndeki Scania DS12 liman içi konteyner taşıma kreyni bir yıllık emisyon kazancı.....	39
Çizelge 4.2 : Antwerp Limanı MSC Terminali'ndeki Cummins KTA-38-Gottward mobil kreynin bir yıllık emisyon kazancı	39
Çizelge 4.3 : Aracın motor özellikleri	39
Çizelge 4.4 : Alkalın elektroliz sistemi özellikleri ve parçaları.....	40
Çizelge 5.1 : Hidrojen elde etme yöntemleri karşılaştırması.....	46
Çizelge 5.2 : M/V Petra F gemi bilgileri	49
Çizelge 5.3 : Alkalın elektroliz hücresi	49
Çizelge 5.4 : Alkalın elektroliz yöntemi ve tüpten hidrojen beslemesi ile çalışmalarda elde edilen yakıt tasarruf oranları.....	55
Çizelge 5.5 : Seçilen yakıt tasarruf oranlarının adlandırılması.....	56
Çizelge 5.6 : Emisyon faktörleri, kg/ton-yakıt	58
Çizelge 5.7 : Yakıt tasarruf adlandırmasına göre emisyon azalma miktarları, kg.....	58
Çizelge 5.8 : Elektroliz hücre sisteminin toplam maliyetleri	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : MARPOL Ek VI madde 14, yıllara göre yakıtlarda bulunması gereken maksimum sülfür yüzdeleri.....	6
Şekil 1.2 : Emisyon kontrol alanları.	6
Şekil 2.1 : EGR sistem şeması.....	10
Şekil 2.2 : SCR sistem şeması	11
Şekil 2.3 : Açık devre SO _x filtreleme sistemi sistem şeması	12
Şekil 2.4 : Kapalı devre SO _x filtreleme sistemi sistem şeması	12
Şekil 2.5 : SAM sistem şeması	14
Şekil 2.6 : Atık ısı kazanım sistemi şeması	15
Şekil 2.7 : LNG besleme devresi şeması	16
Şekil 3.1 : Silindire verilen hidrojen miktarı - fren ısı verimlilik grafiği	21
Şekil 3.2 : Silindire verilen hidrojen miktarı - özgül enerji tüketimi grafiği.....	22
Şekil 3.3 : Krank açısı - silindir basınç grafiği	22
Şekil 3.4 : Krank açısına göre sadece dizel ve dizel - hidrojen karışımli operasyonların ısı boşalma grafiği	23
Şekil 3.5 : Elektroliz hücresi.....	25
Şekil 3.6 : Fotoliz ünitesi sistem yapısı	27
Şekil 3.7 : Foto-biyolojik sistemin yapısı	27
Şekil 3.8 : Cam mikroküreleri	29
Şekil 4.1 : Benzin ile çalışmada devire bağlı tork değerleri karşılaştırması.....	32
Şekil 4.2 : Benzin ile çalışmada devire bağlı özgül yakıt tüketimi karşılaştırması ...	33
Şekil 4.3 : Benzin ile çalışmada devire bağlı HC emisyonları karşılaştırması.....	33
Şekil 4.4 : Benzin ile çalışmada devire bağlı CO emisyonları karşılaştırması.....	33
Şekil 4.5 : Dizel ile çalışmada devire bağlı tork değerleri karşılaştırması	36
Şekil 4.6 : Dizel ile çalışmada devire bağlı özgül yakıt tüketimi karşılaştırması.....	36
Şekil 4.7 : Dizel ile çalışmada devire bağlı HC emisyonları karşılaştırması.....	36
Şekil 4.8 : Dizel ile çalışmada devire bağlı CO emisyonları karşılaştırması.....	37
Şekil 4.9 : Sistemin araba motoruna uygulanışı	41
Şekil 4.10: Madur GA-21 emisyon ölçüm cihazı	43
Şekil 5.1 : M/V Petra F gemi resmi	48
Şekil 5.2 : Elektroliz sistem şeması	50
Şekil 5.3 : Sistemin türbin emme tarafına bağlantısı	50
Şekil 5.4 : Makine dairesi planı üzerinde sistemin uygulanışı	51
Şekil 5.5 : Netpas Distance 3.2 program ara yüzü.....	52
Şekil 5.6 : Yıllık yakıt tüketimi miktarları karşılaştırması	57
Şekil 5.7 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre yıllık CO ₂ emisyonu miktarı	58
Şekil 5.8 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre yıllık NO _x , SO ₂ , CO ve PM emisyon miktarları	59
Şekil 5.9 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre geminin yıllık yakıt maliyetleri.....	60

HİDROJEN KARIŞIMLI YAKITLARIN GEMİLERE UYGULANABİLİRLİĞİNİN VE EMİSYON SALINIMLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüz koşullarında ülkelerin en önemli problemleri enerji ihtiyacı ve çevre kirliliğidir. Ülkelerin, enerji ihtiyaçlarını karşılarken yenilenebilir enerjilerden çok, maliyeti daha ucuz ve uygulanabilirliği daha kolay, fosil yakıtlara yönelmesi, çevre kirliliğine yol açmakta ve küresel ısınmanın hızlanmasına neden olmaktadır. Küresel ısınmanın hızlanmasının ve buna bağlı iklim değişikliklerinin en önemli nedeni sera gazlarının oluşturduğu hava kirliliğidir. Hava kirliliği insan sağlığını tehdit etmekte, insan yaşam kalitesini düşürmekte, diğer taraftan bitki ve hayvan yaşamlarını da tehdit etmektedir.

Ülkeler bu kötü gidişatı kontrol altına almak ve doğaya salınan emisyon oranlarını azaltmak için Birleşmiş Milletler olarak Kyoto Protokolünü imzalamış ve ilk adımı atmışlardır. Birleşmiş Milletler altında çalışan Uluslararası Denizcilik Örgütü de denizcilik sektöründe, gemilerden kaynaklı çevre kirliliğini engellemek için Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi çerçevesi altında, Ek VI bölümünde hava kirliliği ile ilgili çalışmalar yapmış, SO_x, NO_x ve CO₂ gazları için kurallar oluşturmuş ve sınırlamalar getirmiştir. SO_x emisyonları için Emisyon Kontrol Bölgeleri oluşturulmuş, bu bölgelere giriş yapacak olan gemiler düşük sülfürlü yakıt kullanmak mecburiyetinde olacaklardır. NO_x emisyonları için, sözleşmeye uygun emisyon oranlarına uygun makinelerin üretilmesi ve gemilerde kullanılması zorunlu koşullu olmuştur. CO₂ emisyonları için 1 Ocak 2013'te yürürlüğe giren EEDI ile emisyonlar gemi henüz yapım aşamasında iken kontrol altına alınmaya başlanmış, SEEMP ile gemi operasyonları denetlenerek emisyonların azaltılması sağlanmıştır.

IMO'nun belirlediği SO_x, NO_x ve CO₂ emisyon limitlerine, gemi emisyonlarının indirgenebilmesi için çeşitli sistemler ve yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Bu sistemler, Egzoz Gazı Resirkülasyonu, Seçici Katalitik Azaltma, SO_x Filtreleme Sistemi, silindir içine su püskürtme yöntemi, atık ısı kazanımı, skavenç havası nemlendirme, Miller çevrimi ve LNG çift yakıt sistemidir. Uygulanan bu sistemlerin, SO_x, NO_x ve CO₂ gazlarına çeşitli etkileri olsa da, hem bütün emisyonlara etkisi olmayıp, hem de makineye yük yükleyerek, yakıt tüketimini arttırmaktadırlar. Ayrıca bu sistemlerin maliyetlerinin yüksek olması ve boyutları ve sistem ekipman fazlalıkları nedeni ile her gemiye uygun olmayışı da dezavantajlarıdır. Bütün emisyonları azaltabilecek ve yakıt tüketimini arttırmayarak tam tersine azaltacak ekipmanın olmayışı, tez çalışmasında yenilenebilir bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen üzerine çalışmamı ve kara tesislerinde ve araçlarında uygulamaları olan hidrojen gazını üretecek alkalın elektroliz sisteminin bir gemi üzerinde uygulanmasının, geminin yakıt tüketimine ve emisyon oranlarına etkilerinin araştırılması ve maliyet analizi yapılarak toplam maliyetlerin belirlenmesi üzerine yoğunlaştırmıştır.

Bu çalışmada, öncelik ile hidrojen elde etme yöntemleri incelenmiş, gemi üzerinde uygulanabilmesi mümkün olan yöntem olarak alkalın elektrolizi metodu belirlenmiştir. Ayrıca hidrojeni depolama yöntemleri de incelenerek, gemi üzerinde hidrojen depolamanın zorlukları ve ek kural gereklilikleri oluşacağı belirlenerek, gemi üzerinde alkalın elektroliz metodunun uygulanması ile hidrojen depolama sıkıntısının oluşmayacağı incelenmiştir. Alkalın elektroliz sisteminin uygulanabilme şartlarını ve sistem esaslarını incelemek üzere M/V Petra F isimli, 2.130 dwt'lik, günlük MDO yakıt tüketimi 2,5 mt olan 908/268 devirde 595 kw güç üreten Wartsila Vasa Diesel 6R22MD ana makineye sahip gemi seçilmiştir. MDO yakıtı kullanan bir geminin seçilme nedeni, günümüze kadar yapılan çalışmaların dizel yakıt ile çalışan motorlar üzerinde yapılmış olması, denizcilik sektörü ile ilgili bir çalışma olmadığından, HFO yakıtı kullanan motorlar üzerinde çalışma yapılmamış olmasıdır. Seçilen gemiye uygun alkalın elektroliz sistemi kapasitesi, ana makine toplam silindir hacmine göre belirlenmiş ve piyasada bulunan sistemlerden 2 adet 6 lt/dk H₂ gazı üreten sistemin uygun olacağı belirlenmiştir. Sistemin, makine dairesindeki yerleşimi planlanmış, sistem şeması çizilmiş ve ana makineye bağlantısı belirlenmiştir. Sistem ana makineye, türbin emme tarafından nozul ile bağlanacak ve H₂ gazı buradan emme manifolduna geçtikten sonra ana makinenin silindirlerine verilecektir. Verilen H₂ gazının enerji eşleniği kadar dizel yakıt, governör vasıtası ile azaltılacak ve tüketilen dizel yakıtta azalma olacaktır. Buna bağlı olarak hem eklenen H₂ gazının daha iyi ve homojen yanma özelliklerinden dolayı hem de azalan dizel yakıttan dolayı emisyon oranlarında azalma meydana gelecektir. Yakıt tüketiminde oluşabilecek azalma aralığını belirlemek için literatür taramasında daha önceki çalışmalar incelenmiş ve dört adet çalışma seçilmiş, ayrıca 2012 model Nissan Qashqai 1.5 dizel motora sahip araç üzerinde yapılan çalışma da dahil edilerek yakıt tasarruf değerleri tablosu oluşturulmuştur. Seçilen geminin ana makinesinde uygulanacak sistemin uygulanışı ile aynı olan önceki çalışmalardan, %6,73 ve %14 yakıt tasarrufunun elde edildiği çalışmalar seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucu elde ettiğim %12,53 yakıt tasarruf oranı da eklenmiştir. Bu değerler hesaplamalarda kullanılmak üzere en az, orta ve en fazla olarak isimlendirilmiştir. Seçilen geminin Ocak 2012'den Ocak 2013'e kadarki uğrak limanları çıkarılmış ve seyir günü sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan gün sayısına göre önce sistem kullanılmadan sadece MDO ile gemi seyir yaptığında ne kadar yakıt harcamı yaptığı belirlenmiş, aynı şekilde en az, orta ve en fazla olarak isimlendirilmiş oranlar için de hesaplamalar yapılmıştır. Buna bağlı NO_x, SO₂, CO₂, CO ve PM emisyon değerleri hesaplamalar ile bulunmuştur. Sistemin harcadığı elektrik, saf su tüketimi, kimyasal kullanımı değerleri de bulunarak maliyet analizi yapıp sonuçlar ile ilgili yorumlamalar yapılmıştır.

INVESTIGATING HYDROGEN BLEND FUELS APPLICABILITY ON SHIPS AND EFFECTS ON EMISSIONS

SUMMARY

In today's conditions, countries' main problem are energy need and environmental pollution. Countries prefer fossil fuels which are cheaper and easy to apply to the systems, to renewable energies. This choice causes environmental pollution and expedites global warming. The main cause of expedition of global warming and related to global warming, climate changes, is air pollution occurs from green house gases. Air pollution threatens humans life, decreases human health quality, on the other hand also threatens plants and animals life.

Countries began their first step and signed The Kyoto Protocol to take under control the poor conduct, and decrease emission ratios which were released to the atmosphere. Kyoto Protocol was entered into force at 2005 with the joining of Russia after 8 years from the first talks. Kyoto Protocol aims to decrease CO₂, NO_x, CH₄, O₃ CFCs and water vapor emissions which are the cause of green house effect. International Maritime Organisation which works under United Nations, has worked related to air pollution in the frame of The International Convention for The Prevention of Pollution from Ships and released rules and determined limits about SO_x, NO_x and CO₂ gases to decrease emissions from ships. On 19 May 2005, Annex VI, Prevention of Air Pollution from Ships was entered into force. Annex VI includes such as regulations, applications, emission limits, survey and inspection procedures for the ships from building of the ship to the operation of the ship. Annex VI, regulation 13 is about nitrogen oxides. NO_x limits are tier I, tier II and tier III. Tier I was entered into force at 2000. It is 17,0 g/kwh for $n < 130$, $45 \cdot n^{-0,2}$ g/kwh for $130 \leq n \leq 2000$ and 9,8 g/kwh for $n \geq 2000$. Tier II was entered into force at 2011. It is 14,4 g/kwh for $n < 130$, $44 \cdot n^{-0,23}$ g/kwh for $130 \leq n \leq 2000$, and 7,7 g/kwh for $n \geq 2000$. Tier III will be entered into force at 2016. It will 3,4 g/kwh for $n < 130$, $9 \cdot n^{-0,2}$ g/kwh for $130 \leq n \leq 2000$, and 1,96 g/kwh for $n \geq 2000$. Regulation 14 is about sulphur oxides. Sulphur limit at fuels had been % 4,5 until 1 January 2012. After that date, it has been % 3,5. It will be % 0,5 after 1 January 2020. At Emission Control Areas, sulphur content at fuels were % 1,5 until 1 January 2010. Between 1 January 2010 to 1 January 2015, it is % 1, and after 1 January 2015 it will be % 0,1. Recent study about CO₂ emissions is Energy Efficiency for Ships which was entered into force on 1 January 2013. With this regulation, Energy Efficiency Design Index, and Ship Energy Efficiency Management Plan terms were produced. It is mandatory to conform EEDI of new building ship to the required EEDI value. Also all existing ships have to have SEEMP onboard to control ship board operations.

Varied systems and methods have been improved and started to apply to decrease ship emissions to designated SO_x , NO_x and CO_2 limits by IMO. These systems are Exhaust Gas Recirculation, Selective Catalytic Reduction, SO_x Scrubber, spraying water in to the cylinder, waste heat recovery, scavenge air humidification, Miller cycle and LNG dual fuel. In the study, mentioned systems and methods were compared, and effects on emissions and fuel consumption were noted. Applied these systems have variable effects on SO_x , NO_x and CO_2 gases, but they do not have effects on all the emissions, in addition to this, these systems add additional loads to the main engine and increases fuel consumption. Also these systems have disadvantages of high costs, large dimensions and needs additional equipments that can not be suitable for all the vessels. There are not any equipment that can decrease all the dirty emissions and can not increase the fuel consumption, contrary decreases it. For that reason it is preferred to focus on renewable energy carrier, hydrogen, and production method of hydrogen, alkaline electrolysis system which has applications at land based facilities and vehicles, but has not have at maritime sector at my thesis. Affects of alkaline electrolysis system at ships, to the fuel consumption and emission ratios will be investigated and cost analysis will be done.

Alkaline electrolysis system produces hydrogen gas from distilled water with catalyst. Mostly potassium hydroxide is used as catalyst at alkaline electrolysis. Alkaline electrolysis' product, hydrogen, is renewable fuel, and does not have carbon and hydrocarbon products like fossil fuels. With the burning of hydrogen, main burning product is water, due to lack of carbon element, CO_2 , CO, HC, SO_x and organic acids are not formed, exclude NO_x . Hydrogen has high ignition ratio, high flame velocity, minimum burning energy, high diffusability, and lack of carbon element in its' structure. These specifications of hydrogen are able to increase combustion efficiency of fossil fuel when hydrogen is added as an additional fuel, and also with the addition of hydrogen, main engine governor will decrease fossil fuel amount which will delivered to the cylinders. It is resulted with lower emission levels.

To prove hydrogen's effect on fuel consumption, experiment was done on 2012 Nissan Qashqai 1.5 diesel SUV. An alkaline electrolysis system was mounted on to the engine. Working procedure and parts of the system was explained. Driving tests were done when the system was working and also system was not working. Fuel consumption values were compared, and it was proved that hydrogen has positive impact on fuel consumption.

At this study, firstly, hydrogen production methods were reviewed. Alkaline electrolysis method was determined to be suitable for onboard use at vessels. In addition to this, hydrogen storage methods were reviewed, and it seemed to be hard to store hydrogen onboard and also there will be additional regulations to be applied. With alkaline eletrolysis method, there are not any storage difficulty, because hydrogen is delivered directly to the engine. To investigate applicability terms and system essentials of alkaline electrolysis method on the vessel, M/V Petra F with 2.130 dwt is choisen, which has Wartsila Vasa Diesel 6R22MD main engine with 2,5 mt MDO consumption, 908/268 rpm and 595 kw power. The purpose to choice vessel working with MDO is studies until today have been done with engines work with diesel.

There are not any study have been done with engines work with HFO, because there have not any study at maritime sector. Alkaline electrolysis system capacity which is suitable to the choisen vessel, was determined according to main engine total cylinder displacement. Two pieces of alkaline electrolysis system with capacity of 6 lt/min H₂ gas production is determined to be suitable for the vessel's main engine.

System's placement at engine room plan, system scheme and system connection to the main engine was shown. Alkaline electrolysis cells were placed close to the main engine with electronic control unit which controls hydrogen amount which is delivered to the cylinders. Distilled water tank with 1 m³ capacity was placed suitable free area at the engine room, and connection lines were shown on the engine room plan. System applied to the main engine from suction side of the turbocharger with nozzle attachments, and H₂ gas passes to the scavenge air receiver and then to the cylinders.

Diesel fuel amount equals to H₂ gas energy is decreased by main engine governor and with that there is reduction at fuel oil consumption. Depends on that, because of better burning characteristics of hydrogen and reduction of fossil fuel consumption, there is emission reduction as a result. To determine the fuel saving limits, previous studies were checked and four studies were selected. Also my study was added, and a table was formed with four previous studies. Value of 2,79 % was not selected, because it is way below from other values, and if it was selected, this study would not be meaningful. Value of 11,03 % was not selected, because this value was not found by alkaline electrolysis, but was found by supplying hydrogen from hydrogen cylinder. Values of 6,73 % and 14 % were selected from previous studies, and my study with 12,53 % fuel saving value was added. These values were named as the least, middle and the most for to use at calculations, because these three studies are nearly same application with the application to be applied to the vessel. In addition these studies were done at laboratuary conditions. Vessel's voyages between January 2012 to January 2013 were noted, and voyage days were calculated with Netpas Distance 3.2 voyage calculation program. According to calculated voyage days, vessel's fuel consumption was calculated for only MDO fuel, and with hydrogen addition with a result of fuel saving levels, at least, middle and the most. NO_x, SO₂, CO₂, CO and PM emission rates were calculated, depend on fuel consumption of the vessel at normal condition with only MDO, the least, middle and the most conditions. Additionally, system's electric, distilled water and chemical consumption were calculated and cost analysis was done with final comments.

1. GİRİŞ

21. Yüzyılın en önemli iki büyük problemi enerji ihtiyacı ve çevre kirliliğidir. Enerji, ülkelerin ve insanlığın gelişmesi için en önemli etkidir, çok büyük maliyetlere sebep olmaktadır ve enerji üretiminde çoğunlukla fosil yakıtlar kullanıldığından çevre kirliliğine yol açmaktadır.

Çevre kirliliğinin en önemli kısmını hava kirliliği oluşturmaktadır. Günümüzde hava kirliliği, doğrudan ve dolaylı etkileri ile insan sağlığına ve çevreye ciddi tehdit oluşturmaktadır. İnsanlarda, en basitinden yaşam standartlarının düşmesine, ciddileşerek solunum yolu hastalıklarına, kansere ve daha bir sürü hastalığa sebep olmakta; çevre açısından bakılacak olunursa, gıda ürünlerinin kalitesizleşmesine, verimsiz ürünlerin oluşmasına, sera gazlarının oluşumu ile beraber küresel ısınmanın hızlanmasına, Dünya'nın atmosfer ısını arttırarak buzulların erimesine neden olmaktadır.

Çevre kirliliğinin önemli boyutlara ulaşması ve önlem alınmaz ise daha da büyük boyutlara ulaşacağıının öngörülmesinden dolayı ülkeler, Birleşmiş Milletler (BM) çatısı altında görüşmelere ve çalışmalara başlamış, Kyoto Protokolü ile bu çalışmalar resmîyet kazanmıştır.

Kyoto Protokolü, 1997 yılında imzalanan ancak 2005 yılında yürürlüğe giren, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) içinde imzalanan, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleye yönelik uluslararası tek protokoldür [1]. Kyoto Protokolü'nün amacı atmosferdeki sera gazlarının belirli bir seviyede tutulmasını sağlamaktır [2]. Bu protokolün yürürlüğe girebilmesi için, onaylayan ülkelerin 1990 yılındaki emisyonlarının yeryüzündeki toplam emisyonun % 55'ini bulması gerektiğinden, Rusya'nın katılımı ile 8 yıl sonra 2005 yılında yürürlüğe girebilmiştir. Protokolün imzalanması ile ülkeler, sera etkisine neden olan karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), su buharı, metan (CH₄), ozon (O₃) ve kloroflorokarbonların (CFCs) salınımını azaltmayı kararlaştırmışlardır. Kyoto Protokolü, 160 ülkeyi ve yeryüzündeki sera gazı salınımlarının % 55'inden

fazlasını kapsamaktadır. Sözleşme çerçevesine göre, salınan sera gazları miktarı % 5'e çekilecek, endüstriyel sektörden, motorlu taşıtlardan, ısıtmadan kaynaklanan sera gazı miktarını azaltmaya yönelik mevzuat düzenlenecek, daha az enerji ile daha fazla işin yapıldığı teknoloji sistemlerinin kullanılması yaygınlaştırılacak, fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynaklarına yönelinecek, yenilenebilir enerjiler ön plana çıkarılacaktır [1]. Sözleşmeye göre, ek-I üyesi olarak kabul edilen ülkeler, birbirleri arasında emisyon ticareti yapabilecek, kendi emisyon hakkını başka ülkelere satabilecek veya başka bir üye ülkeden emisyon hakkı satın alabilecektir, ancak Dünya toplam emisyon miktarında herhangi bir değişiklik yapılmayacaktır [2]. Sözleşmede belirtilen ek-I üye ülkeleri ve bu ülkelerin emisyon salınım hakları artı değerler ile, emisyon azaltma hedefleri eksi değerler ile Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Kyoto Protokolü Ek I'de belirtilen üye devletlerin emisyon azaltma hedefleri ve maksimum emisyon limitleri [2].

Ek I Üyeleri	Emisyon Limit Hakları veya Zorunlu Azaltma Oranları
Avusturya Belçika, Bulgaristan, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Estonya, Avrupa Topluluğu, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, İrlanda, İtalya, Letonya, Liechtenstein, Litvanya, Lüksemburg, Monako, Hollanda, Portekiz, Romanya, Slovakya, Slovenya, İspanya, İsveç, İsviçre, Birleşik Krallık, Kuzey İrlanda	- 8 %
Amerika Birleşik Devletleri	- 7 %
Kanada, Macaristan, Japonya, Polonya	- 6 %
Hırvatistan	- 5 %
Yeni Zelanda, Rusya, Ukrayna	0
Norveç	1 %
Avustralya	8 %
İzlanda	10 %

1.1 Denizcilik Sektöründe Yürürlükte Olan Hava Kirliliği İle Alakalı

Uluslararası Kurallar

Gemilerden kaynaklı kirletici emisyonları genel olarak, NO_x, SO_x, CO₂, HC ve PM emisyonları oluşturmaktadır. Gemilerin, 2007 yılında, ulusal ve uluslararası seyiri sırasında açığa çıkardığı NO_x emisyon miktarı 25 milyon ton, SO_x emisyon miktarı

15 milyon ton, PM emisyonları miktarı 1,8 milyon ton, CO emisyon miktarı 2,5 milyon ton ve CO₂ emisyon miktarı 1.050 milyon tondur. Gemilerden salınan CO₂ emisyonu dünyadaki toplam CO₂ emisyonunun %3,3'ünü oluşturmaktadır. Orta vadeli emisyon senaryolarına bakıldığında, eğer emisyon azaltmaya yönelik kurallar olmazsa, 2050 yılındaki karbon emisyon değerleri, 2007 yılındaki emisyon değerlerinin iki veya üç katı olacaktır [3]. 2007 yılında, Deniz ve arkadaşlarının Çandarlı Körfezin'nde yapmış oldukları çalışmada, 7520 adet gemi takip edilmiş ve yıllık 631,2 ton NO_x, 573,6 ton SO₂, 33.848,9 ton CO₂, 32,3 ton HC ve 57,4 ton PM emisyonu açığa çıkardıkları belirtilmiştir [4]. Çalışma sonucunda elde edilen bu değerler dünya üzerindeki gemilerden kaynaklı emisyon miktarlarının boyutlarını anlayabilmek için bir referans olmaktadır. Gemilerden kaynaklı, büyük boyutlardaki emisyon miktarlarından dolayı BM bünyesinde yapılan bütün sektörleri ilgilendiren genel çalışmalar dışında, denizcilik sektörüne özel hava kirliliğini önlemeye yönelik çalışmalar yapılmış, BM'lerin alt kuruluşu olan, Uluslararası Denizcilik Organizasyonu (IMO) tarafından, 19 Mayıs 2005 tarihinde, Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi (MARPOL) çerçevesinde, Ek-VI, Gemilerden Kaynaklı Hava Kirliliğini Önlemeye Yönelik Yönetmelik yürürlüğe sokulmuştur. Bu yönetmelik, gemi dizaynını ve gemi operasyonlarını kapsayan maddeler içermektedir [5]. MARPOL Ek-VI'da geminin yapım aşamasından, gemi operasyonlarında dikkat edilmesi gereken hususlara kadar çeşitli alanlarda kurallar, uygulamalar, emisyon sınırları, sörvey ve denetleme yöntemleri gibi konular bulunmaktadır. MARPOL Ek-VI Yönetmeliğinin kapsadığı konular Çizelge 1.2'de belirtilmiştir.

MARPOL Ek-VI, bütün gemilere, sabit ve yüzer petrol ve diğer platformlara uygulanır, ancak gereklilikler gemi boyutlarına ve inşa tarihlerine göre farklılık göstermektedir. Gemilerinin tonajı 400 gros ton (GRT) ve üstü olan ve uluslararası seyir yaptıran ülkeler ile bu ülke bayrağına bağlı gemilerin, Ek-VI'ya göre, Uluslararası Hava Kirliliğini Önleme Sertifikası (IAPP) almış olması gerekmektedir [5].

Çizelge 1.2 : MARPOL Ek-VI maddeleri [5].

Maddeler	Açıklamalar
Madde 12	Soğutma Sistemlerinden ve Yangın ile Mücadele Ekipmanlarından Salınan Ozon Tüketici Maddeler
Madde 13	Dizel Makinelerden Kaynaklı Azot Oksit (NO _x) Emisyonları
Madde 14	Gemilerden Kaynaklı Sülfür Oksit (SO _x) ve Partikül Madde Emisyonları
Madde 15	Tanker Kargo Tanklarından Kaynaklı Uçucu Organik Bileşik Emisyonları
Madde 16	Gemi Çöp Fırınlarından Kaynaklı Emisyonlar
Madde 18	Yakıt Kalitesi

Hava kirliliğini oluşturan en önemli gazlar NO_x, SO_x ve CO₂'dir. Bu gazlar ile alakalı ayrı ayrı kurallar yürürlüğe sokulmuştur.

1.1.1 NO_x gazları ile ilgili çalışmalar

Havada bulunan N₂ ve O₂, makineye emilen emme havasında bulunmakta, O₂, makinedeki yanma işlemi sırasında hava/yakıt oranı kadar tüketilmekte, geriye kalan O₂ miktarı, yanma sırasında reaksiyona girmemiş N₂ ile beraber silindir yanma mahalinde bulunmaktadır. Ancak bu iki gazın belli bir kısmı, yanma mahalindeki sıcaklık ile orantılı bir şekilde oksidasyon reaksiyonu ile beraber, nitrik oksit (NO), azot dioksit (NO₂) gibi çeşitli NO_x gazları oluşturmaktadır. Yanma sıcaklığı arttıkça, maksimum yanma basıncı yükseldikçe, sıkıştırma basıncı fazlaştıkça ve silindire yüksek yakıt miktarı gönderildiğinde NO_x oluşumu artacaktır [6]. NO_x gazlarının çevreye olumsuz etkileri arasında asit yağmurları, ozon oluşumunu etkilemesi, besin zenginliğini yok etmesi ve insan sağlığına etkileri sayılabilir. Bu olumsuz etkiler göz önünde bulundurularak, MARPOL Ek-VI'ya Temmuz 2005 yılı MEPC 177(53) nolu toplantıda revizyon yapılarak, NO_x Teknik Kanunnamesi eklenmiş, bu konu ile ilgili değerlendirmeler 10 Ekim 2008 tarihli MEPC 177(58) nolu toplantıda sonuçlandırılarak yürürlüğe sokulmuştur [6]. NO_x Teknik Kanunnamesi'nin uygulanma kapsamı:

- Kızağa yerleştirilme tarihi 1 Ocak 2000 ve sonrası olan gemilerdeki 130 kw ve üstü dizel makineler,
- Kızağa yerleştirilme tarihi 1 Ocak 1990 ve 1 Ocak 2000 arası olan gemilere koyulan dizel makineler,
- Gemilere 1 Ocak 2000 ve sonrası koyulan çöp yakıcı kazanlar [5].

NO_x Teknik Kanunnamesi'nin amacı gemilerde kullanılan dizel makinelerin, testleri, sürveyleri ve sertifikasyon süreci ile alakalı zorunlu prosedürleri belirlemek; makine üreticilerini, gemi sahiplerini ve bayrak devletlerini bilgilendirmek; Ek-VI Madde 13'te bahsedilen bu kanunnameye uygun emisyon limitlerinde dizel makine üretilmesini, kullanılmasını ve sertifikalandırılmasını sağlamaktır. NO_x Teknik Kanunnamesi kapsamında, gemide bulunan dizel makinelere NO_x limitlerine uygun olduğunu belirten Makine Uluslararası Hava Kirliliğini Önleme Sertifikası (EIAPP) verilmektedir [6]. Kanunnamede belirtilen emisyon limitleri Çizelge 1.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 : NO_x teknik kanunnamesi emisyon limitleri [7].

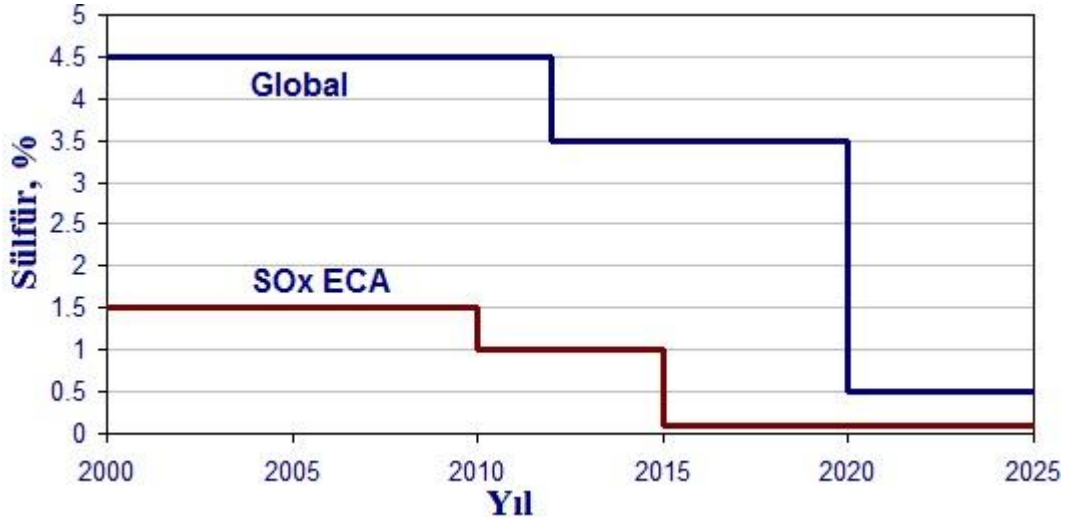
Tier	Yürürlüğe Giriş Tarihi	NO _x Limitleri, g/kwh		
		n < 130	130 ≤ n ≤ 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17,0	45. n ^{-0,2}	9,8
Tier II	2011	14,4	44. n ^{-0,23}	7,7
Tier III*	2016	3,4	9.n ^{-0,2}	1,96

*Emisyon kontrol alanlarında uygulanır, ECA dışındaki alanlarda Tier II limitleri uygulanır.

1.1.2 SO_x gazları ile ilgili çalışmalar

MARPOL Ek-VI kapsamında gemilerden kaynaklı SO_x emisyonları için çalışmalar yapılmış ve Madde 14, Gemilerden Kaynaklı SO_x ve Partikül Madde(PM) Emisyonları, altında bu emisyonlar hakkında kurallar oluşturulmuştur. SO_x ve PM emisyonları, yakıtlardaki sülfür(S) miktarını belli bir limitte tutarak kontrol altına alınmaktadır [5]. Madde 14'te belirtilen, yıllara göre yakıt içinde bulunması gereken maksimum S yüzdesi, Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

Şekil 1.1'de belirtilen değerlere göre, 1 Ocak 2012 tarihine kadar, yakıtlardaki S içeriği % 4,5 iken, 1 Ocak 2012 tarihinden sonra % 3,5 , 1 Ocak 2020 tarihinden sonra % 0,5 kadar olacaktır. Emisyon Kontrol Alanı (ECA) olarak kabul edilen Baltık Denizi ve Kuzey Denizi'nde ise S oranı 1 Ocak 2010 tarihine kadar % 1,5 , 1 Ocak 2010-2015 arasında % 1, 1 Ocak 2015 yılından sonra ise % 0,1 oranında olacaktır. Dünya'da uygulanan ve gelecekte uygulanması düşünülen Emisyon Kontrol Alanları Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : MARPOL Ek-VI madde 14, yıllara göre yakıtlarda bulunması gereken maksimum S yüzdeleri [8].

Dünya'da uygulanan ve gelecekte uygulanması düşünülen Emisyon Kontrol Alanları Şekil 1.2'de gösterilmektedir.

MARPOL Ek-VI'ya ek olarak Avrupa Birliği(AB)'nde düşük sülfürlü yakıt uygulamaları yapılmaktadır. Avrupa Komisyonu tarafından yürürlüğe sokulan 1999/32/EC sayılı, 2005/33/EC sayı ile revize edilmiş Avrupa Birliği Direktifi'ne göre;



Şekil 1.2 : Emisyon kontrol alanları [9].

- MARPOL Ek-VI'nın uygulanmaya başlamasından itibaren bütün gemiler, Baltık Denizi'nde, Kuzey Denizi ve Kanalı'nda % 1,5 maksimum S oranına

sahip yakıt kullanacaktır. 19 Mayıs 2006 tarihinden itibaren bütün Avrupa Birliği ülkesi sınırlarında sadece % 1,5 S oranına sahip dizel yakıtın ikmal edilmesi sağlanacaktır [10].

- 19 Mayıs 2006 tarihinden itibaren AB'ne üye ülkelerin limanları arasında seyir yapan yolcu gemileri maksimum % 1,5 S oranına sahip yakıt kullanacaktır [10].
- 1 Ocak 2010 tarihinde yürürlüğe sokulan kanun ile AB üyesi ülkelerin limanlarına gelecek olan ve ülkelerin iç denizlerinde seyir yapacak olan bütün gemilerin, ana makinede, yardımcı makinelerde ve kazanlarda kullanacağı bütün yakıt çeşitlerinin S oranı maksimum % 0,1 olacaktır [11].

1.1.3 CO₂ gazları ile ilgili çalışmalar

IMO, gemilerden kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltmak ve gemilerde enerji verimliliği konusunu kendi koyacağı limitler ile kontrol altına alabilmek amacı ile bir çok çalışma yapmış ve ilk sözleşme olarak, 1997 yılında, Gemilerden Kaynaklı CO₂ Emisyonları'nı yayınlamıştır [12]. IMO, CO₂ emisyonları ile ilgili en güncel çalışmasını, 15 Temmuz 2011 tarihli MEPC.203(62) nolu toplantıda MARPOL Ek-VI Bölüm 4'e, Gemiler İçin Enerji Verimliliği Sözleşmesi'ni ekleyerek tamamlamış, ve bu sözleşme ile beraber Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi (EEDI) ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) kabul edilmiştir. Bu sözleşme 1 Ocak 2013 tarihinde yürürlüğe girmiş ve 400 GRT'dan büyük, dizel-elektrik makineli, buhar türbinli ve hibrit itme donanımına sahip gemiler hariç, tüm yeni inşa gemiler ile yüzer ve sabit platformlara uygulanmaktadır [13].

EEDI, IMO tarafından yeni inşa gemilerde yeni teknolojilerin ve buluşların geliştirilmesini teşvik amaçlı oluşturduğu teknik ölçüttür. MARPOL Ek-VI'ya ilave edilen EEDI, 400 GRT üstü, 7 farklı gemi tipini kapsamaktadır [14]. EEDI ile gemilerden kaynaklı CO₂ emisyon miktarı, g.CO₂/ton.deniz mili olarak yeni inşa edilecek gemilerin dizayn sürecinde hesaplanacak ve yeni inşaya başlamadan CO₂ emisyonları sınırlandırılarak, kontrol altına alınacaktır. EEDI'nin kapsadığı 7 farklı gemi tipi için, sözleşmede Erişilen ve Zorunlu EEDI tanımları ve değerleri belirtilmiştir. Erişilen EEDI, MARPOL Ek-VI Bölüm 4 Madde 20'de belirtilen, bir geminin tasarım sonucunda ulaşacağı değeri belirten indekstir. Zorunlu EEDI ise aynı bölümün Madde 21'inde belirtilen, gemi tipi ve boyutlarına göre, geminin kural

gereği olması gereken maksimum değerini belirten indekstir [15]. EEDI kontrolü klas kuruluşları tarafından ilk olarak dizayn sürecinde, daha sonra seyir testi esnasında yapılır. Dizayn sürecinde yapılan kontroller EEDI formülü yardımı ile hesaplanarak, gemiye özel dizayn indeksi bulunur. Yapılan kontroller sonucu, gemilerin dizayn indeksi, zorunlu dizayn indeksinin altında kalmış ise gemiye Uluslararası Enerji Verimliliği Sertifikası (IEE) verilmektedir.

EEDI dışında, gemi sahipleri tarafından sahip oldukları yeni inşa olmayan gemiler için her gemiye özel, SEEMP oluşturmaları yönetmelik tarafından istenmiştir. Verimlilik yönetim planının bayrak devleti veya klas kuruluşları tarafından onayı istenmemek ile beraber gemide bulundurulması ve bu yol ile gemi operasyonlarının belli bir düzene sokulması, enerji verimliliği sağlanması ve CO₂ emisyonlarında azalma sağlanması hedeflenmiştir.

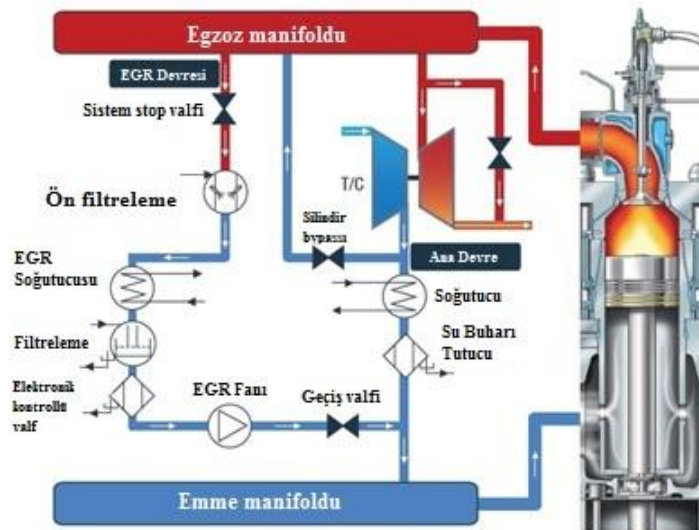
2. GEMİLERDEN KAYNAKLI EMİSYONLARI AZALTMAK İÇİN KULLANILAN SİSTEMLER

Gemilerden kaynaklı emisyonları oluşturan ana unsurlar, NO_x , SO_x ve CO_2 gazlarıdır. NO_x ve SO_x emisyonlarını azaltmak için ana makine üzerine veya ana makine egzoz çıkışına çeşitli sistemler ve yöntemler uygulanırken; CO_2 emisyonlarını azaltmak için ana makine verimliliğini arttırıcı veya atık enerjiyi kullanma üzerine yöntemler kullanılır.

2.1 Egzoz Gazı Resirkülasyon Sistemi (EGR)

EGR sisteminin, 2016 yılından itibaren ECA'ya giren bütün yeni inşa gemilere uygulanmaya başlanacak Tier III NO_x sınırlamasını karşılayabileceği ispatlanmıştır [16]. EGR sistemi, silindirde yanma sonucu oluşan egzoz gazlarının bir kısmının ayrı bir devre ile alınarak, gazların soğutulması ve temizlenmesi işlemlerinden sonra, süpürme havası manifolduna gönderilerek tekrardan silindire verilmesi işlemidir. Bu sistem ile beraber, manifolda alınacak olan havanın hacmi azalacağından, süpürme havasındaki O_2 'nin bir kısmı egzoz gazındaki CO_2 ile değişmiş, süpürme havasının ısı kapasitesi artış göstermiş ve maksimum yanma basıncının azalması ile beraber NO_x gazları oluşumu azaltılmış olur [17]. EGR sisteminin, sistem şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

EGR sistemi makine performansına ve duman emisyonlarına negatif olarak etki etmektedir. Haşımoğlu, C. ve arkadaşları tek silindirli dizel motor üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, motora %10, 20 ve 30 oranlarında EGR uygulamış ve etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda NO_x emisyon oranlarının gözle görülür şekilde azaldığı, ancak özgül yakıt tüketiminde artış, makine gücünde azalma; duman emisyonlarında artış oluştuğunu belirtmişlerdir [18].

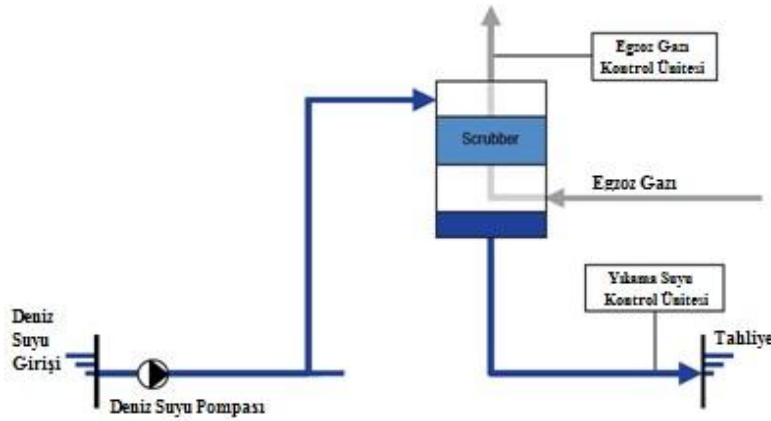


MAN B&W 6S80ME-9.2, 27060 kw'lık ana makine üzerinde uygulanan EGR sistemi neticesinde ortalama 56,1 kg/saat, 112,3 ton/yıl yakıt tüketimi artışı oluşmuştur. Ayrıca EGR sisteminin, egzoz gazı yıkama ünitesi 90kwh/saat, 181 Mwh/yıl; EGR bloveri 189,8 kwh/saat, 379,7 Mwh/yıl elektrik harcamı yapmaktadır [17].

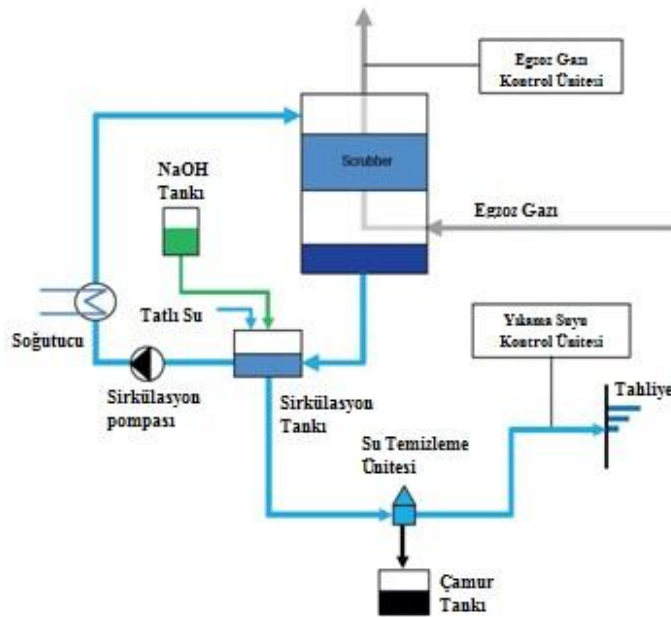
2.2 Seçici Katalitik Azaltma (SCR)

SCR sistemi, egzoz bacasına bağlanarak kimyasal işlem vasıtası ile NO_x gazlarını azaltır. NO_x gazları SCR reaktöründe amonyak (NH_3) ile reaksiyona girerek, N ve suya dönüşür. SCR sisteminin SO_x 'leri azaltma özelliği yoktur. NH_3 belli bir sıcaklığın altında S ile reaksiyona girerek sistemde tıkanma yapar, bu nedenle sistem o sıcaklığın üstünde tutularak S ile reaksiyona girmesi engellenir [17]. Sistem için uygun çalışma koşulları sağlandığında, %85 oranında NO_x gazlarını tutma özelliğine sahiptir [19]. SCR sistem şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

beraber sistemin altına çökmesi sağlanır. Ancak bu sistemde verimlilik geminin çalıştığı denizdeki alkalın(ph) oranına bağlıdır. Alkalın oranı çok düşük ise SO_x gazlarını temizleme performansında düşüş olacaktır [20]. Şekil 2.3'te açık devre SO_x filtreleme sisteminin sistem şeması gösterilmiştir. Tatlı sulu scrubberlar, egzoz gazlarını yıkamak için genelde tatlı su ile beraber sodyum hidroksit (NaOH) kullanırlar. Bu sistemde egzoz gazları tatlı sulu NaOH çözeltisi ile yıkanarak SO_x ve CO_2 gazları NaOH ile reaksiyona girerek sistemde tutulur, PM emisyonları da yıkama ile oluşan nem ile sistemin altına çöker. Kapalı devre SO_x filtreleme sisteminin sistem şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Açık devre SO_x filtreleme sistemi sistem şeması [17].



Şekil 2.4 : Kapalı devre SO_x filtreleme sistemi sistem şeması [17].

Alfa Laval firmasının üretmiş olduğu sistemlerden 5MW'lık ana makine kapasitesine sahip sistemlerinden açık devre olanı 59 kw, kapalı devre olanı 31 kw; 25MW'lık ana makine için üretilen açık devre sistemi 296 kw, kapalı devre sistemi 154 kw; 50 MW'lık ana makine için üretilen açık devre sistemi 593 kw, kapalı devre sistemi 308 kw elektriğe ihtiyaç duymaktadır [20]. MAN B&W 6S80ME-9.2, 27060 kw güce sahip ana makine üzerinde uygulanan sistemde %75 MCR'da 10 kg/saat, %100 MCR'da 14 kg/saat yakıt tüketimi artışı; açık devre sistem olursa %75 MCR'da 124 kwh/saat, kapalı devre sistem olursa 52 kwh/saat; %100 MCR'da açık devre sistem olursa 165 kwh/saat, kapalı devre sistem olursa 69 kwh/saat elektrik harcamı oluşmaktadır [17].

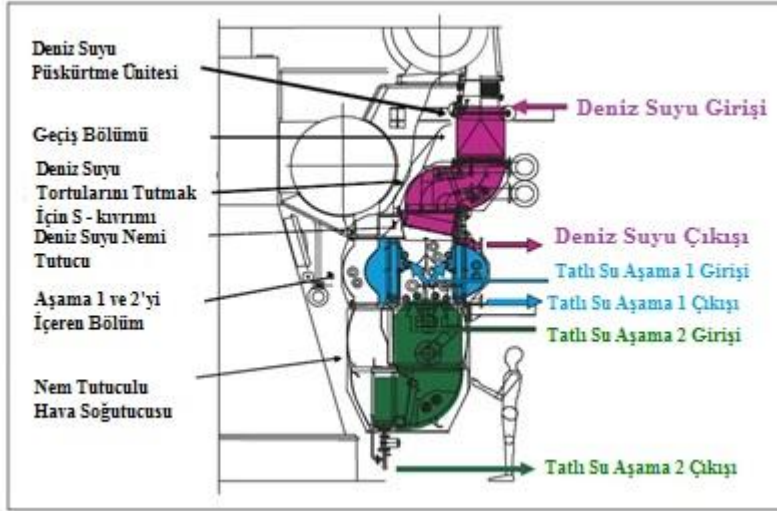
SO_x scrubber sistemleri, SO_x düzenlemelerinde belirtilen %0,5 ve %1 S sınırlamalarını karşılamaktadır, ancak henüz %0,1 S oranı sınırlamasını tam olarak karşılayamamaktadır. Bu sistemlerde atık suların depolanması ve dışarı verilmesi sorun oluşturmaktadır. Ayrıca sistemin büyüklüğü uygulama zorluklarını da ortaya çıkarmaktadır [20].

2.4 Silindir İçine Su Püskürtme

Silindir içine su püskürtülmesi, yanma sıcaklıklarının azalmasına neden olur ve bu sayede NO_x gazlarının azalmasını sağlar. Su, silindir içine direk enjeksiyon, nemlendirme veya yakıt/su karışımı şeklinde verilir. Yakıt/su karışımı duman miktarlarını azaltırken, silindirin nemlendirilmesi duman oranlarında artma oluşturur [21].

2.5 Skavenç Havası Nemlendirme (SAM) Yöntemi

SAM yönteminde silindire verilecek olan skavenç havası, türbin emme tarafındayken deniz suyu ile nemlendirilip soğutularak silindire verilir. Bu yöntem sayesinde maksimum yanma sıcaklıkları azaltılıp NO_x emisyonlarının oluşumu engellenmeye çalışılmaktadır. Deniz suyu skavenç havasına püskürtüldüğünde yaklaşık %100 nemlilik sağlamaktadır [22]. Ana makineye uygulanan SAM yönteminin sistem şeması Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

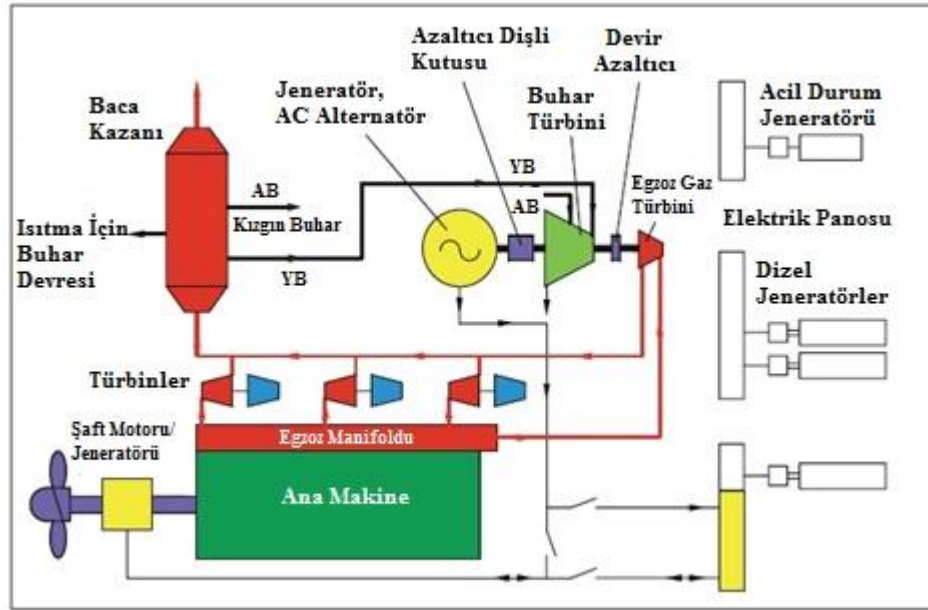


Şekil 2.5 : SAM sistem şeması [22].

SAM yönteminde bulunan deniz suyu skavenç havasına püskürtülürken, tatlı su, havaya karışabilecek olan tuz partiküllerini yıkama vasıtası ile yok etmek için sistem içerisinde bulunmaktadır. SAM yöntemi NO_x gazlarını azaltmakta, ortalama verimliliği arttırmakta, yakıt tüketiminde bir miktar artışa neden olmaktadır. Ancak yöntem henüz tam olarak ticari uygulamalarda kullanılmamış, deniz suyunun ana makineye uzun vadedeki etkileri gözlemlenmemiştir [22].

2.6 Atık Isı Kazanım Sistemi

Atık ısı kazanım sistemi, egzoz manifoldundan ayrı bir devre ile alınan bir miktar egzoz gazının alternatöre bağlı bir egzoz türbinini döndürerek, turbo-jeneratör sistemi olarak elektrik üretmesi; üretilen elektriğin ana makine şaftına bağlı bir motor vasıtası ile pervaneye güç olarak iletilmesi veya üretilen elektriğin gemi elektriği olarak kullanılmasıdır. Diğer bir sistem olarak, baca kazanına gönderilen egzoz gazlarının burada hem gemi ısıtma sistemleri için kullanılması hem de kazanda kızgın buhar üretilip, sistemde alternatöre bağlı buhar türbini döndürülerek elektrik üretilmesi, üretilen elektriğin şafta iletilerek ana makineye yardımcı olması veya üretilen elektriğin gemi elektriği olarak kullanılmasıdır. Atık ısı kazanım sistemi ile toplam sistem verimliliği artırılarak, CO_2 emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmaktadır [22]. Sistemin şeması Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Atık ısı kazanım sistemi şeması [22].

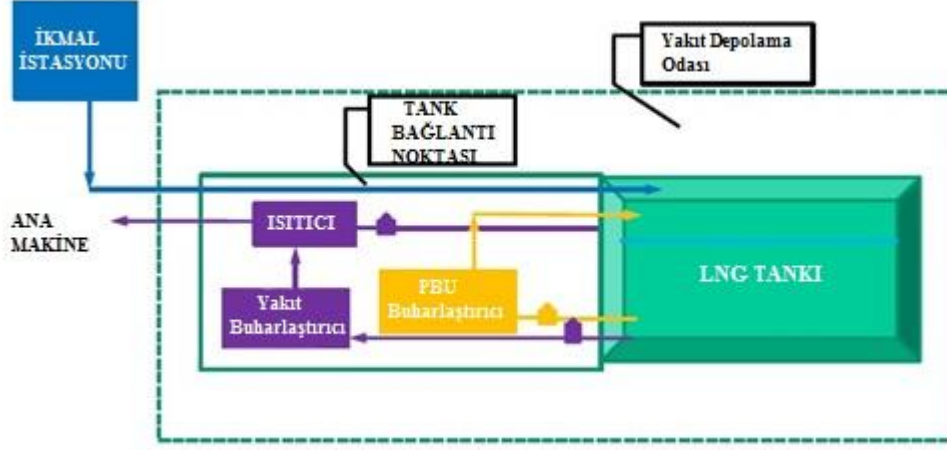
2.7 Miller Çevrimi

Miller Çevrimi, emme valfinin kapanma zamanının erkene alındığı bir yöntemdir. Emme valfi, piston alt ölü noktaya gelmeden önce kapanır ve silindire girmiş olan emme havasının genişleyip soğumasına neden olur. Emme havası sıcaklığının düşük olması, maksimum yanma sıcaklıklarının azalmasını sağlayacağından oluşacak NO_x emisyonlarını azaltacaktır. Ancak bu yöntem, NO_x emisyonlarını azaltırken PM emisyonlarını arttırmaktadır [23].

2.8 LNG Çift Yakıt Sistemi

LNG Çift Yakıt Sistemi, LNG'nin depolanmasına olanak sağlayan özel tanklardan, çift cidarlı boru devrelerinden, sızdırmaz valflerden oluşan devre ile gaz enjektörleri ile ana makine kaverlerinden doğalgazın silindire püskürtülmesini ve HFO veya dizel yakıt ile beraber yakılmasını sağlayan sistemdir. Bazı sistemlerde ana makine sadece doğalgaz ile de çalıştırılabilir. HFO ile karşılaştırıldığında doğalgaz daha temiz, düşük S içeren veya hiç içermeyen bir yakıttır. Bu neden ile SO_x emisyon oranları ihmal edilecek düzeydedir. Ayrıca PM, NO_x ve CO_2 emisyon oranlarında da azalma sağlar [22]. LNG sisteminin negatif yanları, yeni denenen bir sistem olması, her limanda LNG ikmali yapılacak tesisin olmayışı, sistemin içeriğinde bulunan ekipman fazlalığı ve LNG tankının koyulacak yerin belirlenmesi, LNG tankı, tank

bağlantı bölgesi, makine dairesi için özel sistem özellikleri ve güvenlik prosedürlerinin olmasıdır [24]. Sistemin, ana makine besleme devresi şeması Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : LNG besleme devresi şeması [25].

Gemilerden kaynaklı emisyonları engellemeye yönelik varolan sistemler incelendiğinde, bütün sistemlerin artı ve eksi yanlarının olduğu, LNG Çift Yakıt Sistemi dışında, NO_x , SO_x , CO_2 ve PM emisyonlarının hepsini tek bir sistemde azaltacak ve aynı zamanda yakıt tüketimini de arttırmayacak bir sistemin bulunmadığı görülmüştür. Çizelge 2.1'de gemilerde kullanılan sistemlerin emisyonlara ve yakıt tüketimine etkileri belirtilmiştir. LNG Çift Yakıt Sistemi'nin yeni yeni ticari olarak gemilerde kullanılmaya başlanması, sistemin kurulum maliyetleri, LNG ikmal zorlukları, gemide uygulanması gereken güvenlik prosedürleri ele alındığında uygulanması, özellikle varolan gemiler için günümüzde maliyetli ve uğraş verici olarak görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Gemilerde kullanılan sistemlerin emisyonlara ve yakıt tüketimine etkileri.

	NO _x Emisyonlarına Etkisi	SO _x Emisyonlarına Etkisi	CO ₂ Emisyonlarına Etkisi	PM Emisyonlarına Etkisi	Yakıt Tüketimine Etkisi
EGR	Azalma	Yok	Artış	Artış	Artış
SCR	Azalma	Yok	Artış	Yok	Artış
SO _x Scrubber	Yok	Azalma	Artış	Azalma	Artış
Silindire Su	Azalma	Yok	Artış	Azalma	Artış
Püskürtme					
SAM	Azalma	Yok	Artış	Yok	Artış
Atık Isı Kazanımı	Yok	Yok	Azalma	Yok	Azalma
Miller Çevrimi	Azalma	Yok	Yok	Artış	Yok
LNG	Azalma	Azalma	Azalma	Azalma	Yok

3. HİDROJEN KULLANIMI İLE EMİSYONLARIN AZALTILMASI

Hidrojen, yenilenebilir, fosil yakıtlardaki gibi karbon ve hidrokarbon ürünlerini bünyesinde bulundurmeyen bir yakıttır. Hidrojenin, temiz yanma karakteristiği ve fosil yakıtlara göre daha iyi bir yanma performansı sağlaması, hidrojen üzerine yapılan çalışmaları yoğunlaştırmıştır. Hidrojenin, yanması ile ana yanma ürünü olarak su çıkmakta, bünyesinde C içeren bir yakıt olmadığından, NO_x dışında; CO₂, CO, HC, SO_x ve organik asitler oluşmamaktadır [26]. Hidrojenin özelliklerinin dizel yakıt ile karşılaştırılması Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Gemilerde uygulanan emisyon azaltmaya yönelik sistemler incelendiğinde, tek bir sistemin toplam emisyon bileşiminde bulunan çeşitli kirletici gazların tamamını azaltmayı sağlayamadığı; bazı uygulamalarda iki veya üç sistemin ana makineye birlikte uygulandığı gözlemlenmiştir. Bu durum göz önüne alındığında, hidrojenin temiz yanma karakteristiği, iyi yanma performansı ve içeriğinde C elementi içermemesi özellikleri, hem hidrojenin ana makinelerde ek yakıt olarak kullanılması ile silindire gönderilen fosil yakıtın yanma verimini arttırmasını hem de silindirlere gönderilecek fosil yakıt miktarında azalma oluşması ile oluşacak kirletici emisyonların azalmasına olanak sağlayacaktır.

Çizelge 3.1 : Dizel yakıt ve hidrojenin özelliklerinin karşılaştırılması [27].

	Dizel Yakıtı	Hidrojen
Tutuşma sıcaklığı (K)	530	858
Minimum tutuşma enerjisi (mJ)	-	0,02
Yanma limitleri (havadaki %)	0,7 - 5	4 - 75
Hava-yakıt kütle karışım oranı	14,5	34,3
Yanma limitleri (eşitlik oranı)	-	0,1 - 7,1
16 C ve 1,01 bar'da yoğunluk (kg/m ³)	833 - 881	0,0838
Net ısı değeri (MJ/kg)	42,5	119,9
Alev hızı (cm/s)	30	265 - 325
Havadaki difüzyonu (cm ² /s)	-	0.63
Oktan no (RON /MON)	30 / -	130 / -
Setan no	40 - 55	-

3.1 Hidrojenin Yanma Özellikleri

Hidrojenin, temiz yanma karakteristiği ve fossil yakıtlara göre daha iyi ve homojen bir yanma oluşturmalarının sebepleri, aşağıda belirtilmiştir.

3.1.1 Geniş alev alma aralığı

Alev alma aralığı, diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında, hidrojen, havada % 4 ile % 75 hacimsel oranda bulunduğu alev alırken, dizel yakıtı % 0,7 ile % 5 hacimsel oranında iken alev alabilir. Bu durum çok çeşitli yakıt-hava karışımlarının oluşturulabilmesine, zayıf yakıt-hava karışımlarının bile rahatlıkla oluşturulabilmesine olanak sağlar. Makinelerin, zayıf karışımlar ile çalıştırılması, tam yanma oluşacağından yakıt ekonomisinin yapılmasını sağlar. Ayrıca, düşük yanma sıcaklığı oluşacağından, NO_x gibi bazı kirlenici gazların oluşumunu azaltır [26,27].

3.1.2 Alev hızı

Hidrojenin alev hızı diğer yakıtlara göre çok daha yüksek olduğundan, daha verimli ve ideal bir yanma gerçekleşmiş olur. Dizel yakıtın alev hızı 30 cm/s iken, hidrojenin alev hızı 265 - 325 cm/s arasında değişmektedir [26,28].

3.1.3 Minimum tutuşma enerjisi

Minimum tutuşma enerjisi, yakıt-hava karışımının bir kaynak vasıtası ile tutuşturulması için gereken minimum enerjiye verilen addır. Hidrojenin tutuşması için gereken minimum enerji 0,02 mJ, benzinin 0,24 mJ'dur. Bu da hidrojenin çabuk tutuşturulabilmesine olanak tanır [28,29].

3.1.4 Yüksek difüzyon hızı

Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi, hidrojenin diğer yakıtlara göre yüksek difüzyon hızı bulunmaktadır, bu özelliği ile hidrojenin yanmada kullanımı iki avantaj sağlar. İlk olarak yüksek difüzyon ile yanma mahalinde daha iyi bir yakıt-hava karışımı oluşturularak, daha verimli bir yanmanın oluşmasını sağlar. İkinci olarak da sistemde bir hidrojen kaçağı olduğunda, yüksek uçuculuğu sebebi ile, parlama - patlama gibi tehlikeli olayların olması en aza indirgenmiş olur [28,30].

3.1.5 Yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı

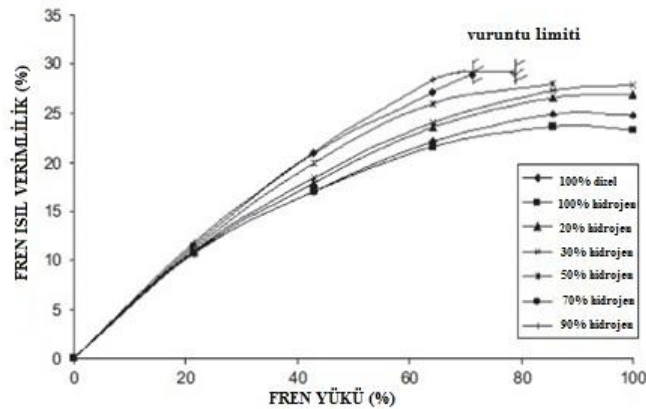
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, bir yakıtın dış kaynaklar olmadan kendi kendine yanmaya başlayabileceği sıcaklığa verilen addır. Hidrojenin, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı oldukça yüksektir, 858 K (585°C). Bu da hidrojen-hava karışımının dışarıdan bir ateşleme desteği olmadan yanmasını zorlaştırmaktadır [28,30].

3.1.6 Stokiyometrik hava - yakıt oranı

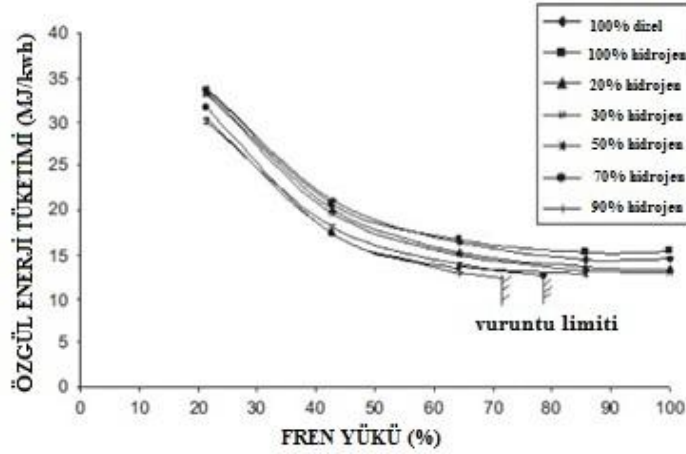
Stokiyometrik hava - yakıt oranı, yakıtın kimyasal olarak oksijen ile yakılması için gereken karışım oranına denilmektedir. Hidrojen ile petrol ürünlerinin stokiyometrik hacimleri karşılaştırıldığında hidrojenin % 29,52 iken petrol ürünlerinin % 1,76 civarındadır, bu oranlar hava-yakıt karışımının enerji içeriğinin karşılaştırılmasına olanak sağlar. Normal basınç ve sıcaklık şartlarında hidrojenin yoğunluğu 0,09 kg/m³tür, bu nedenle düşük ısı değeri petrol ile karşılaştırıldığında, 120 MJ/kg'a, 44MJ/kg olmasına rağmen birim hacim enerji içeriği petrole göre düşüktür [28,29].

3.2 Hidrojenin Dizel Motorlarda Yanma Etkileri

Hidrojenin sahip olduğu yüksek difüzyon hızı ve hızlı yanma özelliği nedeni ile, silindir içine verilen hidrojen miktarı arttıkça makine fren ısı verimliliğini arttırmakta, özgül enerji tüketimini azaltmaktadır [31]. Saravanan ve Nagarajan'ın dizel motor üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda elde ettikleri, silindire verilen hidrojen oranına göre oluşan fren ısı verimliliği ve özgül enerji tüketimini gösteren grafikler, Şekil 3.1 ve 3.2'de belirtilmiştir.

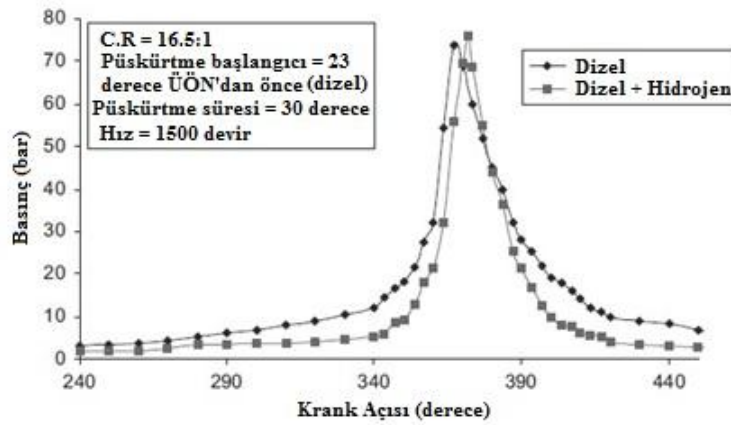


Şekil 3.1 : Silindire verilen hidrojen miktarı - fren ısı verimliliği grafiği [31].



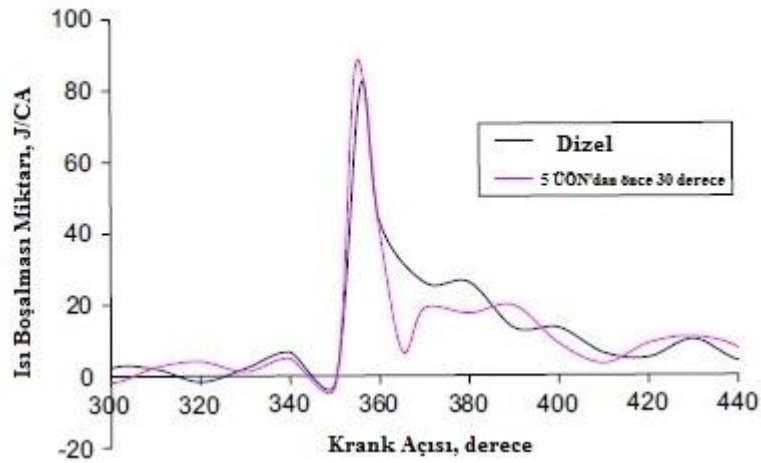
Şekil 3.2 : Silindire verilen hidrojen miktarı - özgül enerji tüketimi grafiği [31].

Saravanan ve Nagarajan, yaptığı çalışmalar sonucunda silindire %30 hacimsel oranda hidrojen verildiğinde yanma ve emisyon değerlerinin vuruntu oluşmadan en iyi seviyede olduğunu belirlemişlerdir. Silindirin %30 hacimsel oranında hidrojen ile zenginleştirilmesi ile maksimum yanma basıncının, motor sadece dizel ile çalıştırıldığı durumdan 5° krank açısı geç olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak, hidrojenin tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı, kendiliğinden tutuşmadığından, dizel yakıt püskürtülüp sıkıştırıldıktan sonra tutuşup yanmaya başlaması olarak belirtmişlerdir [31]. Tutuşan hidrojen, hidrojenin alev hızı ve hızlı yanma özelliklerinden dolayı çabuk bir yanma gerçekleştirerek tutuşma gecikmesi zamanını azaltır [27]. Krank açısına göre, sadece dizel yakıt ve hacimsel olarak %30 oranında hidrojen ile zenginleştirilmiş durumun silindir basınç grafiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Krank açısı - silindir basınç grafiği [31].

Saravanan ve arkadaşları yapmış oldukları deneylerde, hidrojenin sahip olduğu alev hızı ve difüzyon özellikleri, yakıtın hava ile karışımını homojen ve çabuk bir şekilde sağladığından dolayı, silindire hidrojen verildiğinde maksimum yanma basıncı dizel yakıt ile yapılan deneylerde 82,2 bar iken 82,7 bara yükselmiştir. Ayrıca makinedeki ısı yükselme hızı da hidrojen verilmiş operasyonda 81,5 J/krank açısından, 87,67 J/krank açısına yükselmiştir [27]. Krank açısına göre silindirdeki ısı boşalması grafiği Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Krank açısına göre sadece dizel ve dizel-hidrojen karışımli operasyonların ısı boşalması grafiği [27].

3.3 Hidrojenin Elde Edilme Yöntemleri

Hidrojen, doğalgaz, kömür gibi fosil kaynaklardan; güneş ışığı, rüzgar, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerjileri kullanarak, biyokütle ve sudan elde edilebilir. Kimyasal, biyolojik, elektrolitik, fotolitik ve termokimyasal işlem teknolojileri ile de hidrojen elde edilmektedir. Her teknolojinin gelişim aşaması, sağladığı avantajlar ve karşılaşılan zorluklar birbirinden farklıdır [32].

3.3.1 Hidrojenin fosil yakıtlardan üretimi

Sanayide kullanılan hidrojenin büyük bir kısmı, doğalgaz, petrol ürünleri kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Hidrojen üretimi için doğalgazın katalitik buhar ıslahı, petrolün kısmi oksidasyonu, buhar - demir işlemi ve kömür gazlaştırılması gibi yöntemler kullanılır.

Bu yöntemler dışında hidrojenin yan ürün olarak çıktığı klor-alkaliden karışık klor üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve margarin sanayisinde kimyasal hidrojenasyon işlemleri bulunmaktadır [33].

Hidrojenin doğalgazdan üretilmesi, üç farklı kimyasal işlem ile olabilir. Bunlar buhar ıslahı (buhar-metan ıslahı), kısmi oksidasyon ve ototermal ıslahıdır. Buhar ıslahı, CH_4 ve su buharının endotermik reaksiyon ile H ve CO dönüştürülmesidir, CO diğer bir kimyasal işlem ile CO_2 ve H dönüştürülür. Bu kimyasal reaksiyonlar $700 - 850^\circ \text{C}$ ve $3 - 25$ bar aralığında gerçekleşir. Kısmi oksidasyonda doğalgaz kısmi olarak yakılarak reaksiyon sonucunda CO ve H_2 gazı elde edilir. Bu işlem ekzotermiktir, dışarıdan ısı kaynağına gerek yoktur. Ototermal ıslah, buhar ıslahı ve kısmi oksidasyonun birleşiminden oluşan bir kimyasal işlemdir. İşlemin toplamı ekzotermiktir, reaksiyon sonucu çıkan ısı $950 - 1100^\circ \text{C}$ arasında ve gaz basıncı 100 bar kadardır [32].

Hidrojenin kömürden üretilmesi, kömürün gazlaştırılması işlemi ile gerçekleşmektedir. Bu işlem için ısı gerekmektedir, oluşan kimyasal reaksiyonlar doğalgaz ile hidrojen üretimindekiler ile hemen hemen aynıdır. Ancak kömürden hidrojen üretimi ticari olarak kullanılır olsa da doğalgazdan hidrojen üretimine göre daha kompleks ve masraflıdır [32].

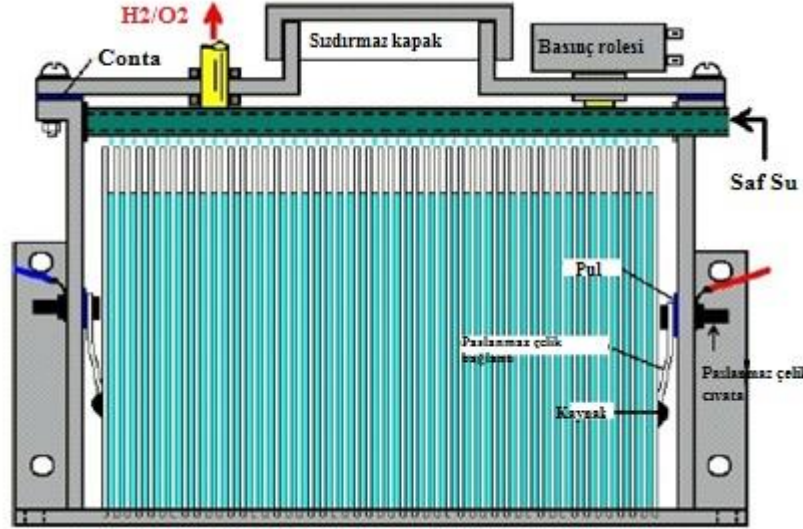
3.3.2 Hidrojenin suyun elektrolizi ile üretimi

Hidrojenin, suyun elektrolizi ile üretimi üç farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar alkalın elektroliz, polimer perde elektrolit elektroliz ve yüksek ısılı elektrolizdir.

3.3.2.1 Alkalın elektroliz

Hidrojenin üretimi için uygulanan ve karmaşık olmayan, en basit yöntemdir. Elektroliz işleminde doğru akım kullanılarak, saf su, H_2 ve O_2 'e ayrıştırılır. Elektroliz işleminin elemanları, elektroliz hücresi içinde düzlem bir metal veya karbon plakalar (elektrotlar) ve bu elektrotların içinde bulunduğu elektrolit diye adlandırılan sıvıdır [33]. Elektroliz hücresi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlanır ve akım, iletken sıvı içinde artı elektrottan, eksi elektrota doğru geçer. Bunun sonucunda elektrolit içindeki su, katottan H_2 ve anottan O_2 gazının çıkması ile ayrılır. Saf su iletken olmadığından iletkenliği sağlayacak ve kimyasal

reaksiyonu hızlandıracak, katalizör madde, potasyum hidroksit (KOH) veya NaOH gibi bileşikler suda çözündürülür [33]. Alkalın elektroliz uzun süreden beri kullanılan, olgunlaşmış bir teknolojidir [32].



Şekil 3.5 : Elektroliz hücresi [34].

Alkalın elektroliz işlemi esnasında elektrolitte, katotta ve anotta ayrı ayrı kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Elektrolitte meydana gelen kimyasal reaksiyon, (3.1) numaralı formül, katotta meydana gelen kimyasal reaksiyon, (3.2) numaralı formül, anotta meydana gelen kimyasal reaksiyon, (3.3) numaralı formül ve net kimyasal reaksiyon, (3.4) numaralı formül ile belirtilmiştir.



Alkalın elektroliz işleminde kullanılmak üzere deniz suyu üzerine de araştırmalar yapılmıştır, ancak elektrolit sıvısı içinde çözünmeyen partiküller oluşturması, bu partiküllerin zamanla elektrot yüzeylerine yapışması ve verimliliği etkilemesi, deniz suyunda bulunan NaCl bileşiğindeki Cl'un, OH'dan daha aktif olmasından dolayı, anottaki reaksiyonda, öncelikli olarak NaCl bileşiğinin ayrıştırılmaya çalışılması daha sonra OH'in ayrıştırılması ve bu reaksiyon sonucu çevreye zararlı, tahriş edici

klorin gazının salınması sorun oluşturduğundan vazgeçilerek, korozyon özelliği olmayan, hiçbir yan ürün içermeyen ve çevreye zararı olmayan saf su üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır [35].

3.3.2.2 Polimer perde elektrolit elektrolizi (PEM)

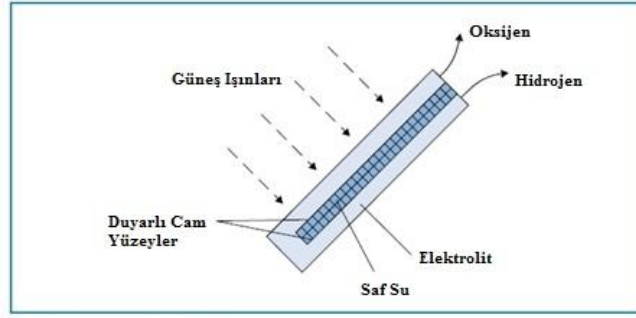
PEM elektrolizinde sıvı elektrolit bulunmamaktadır, sıvı elektrolitin yerine asidik polimer perdeler kullanılmaktadır. PEM elektroliz sistemleri yüzlerce bar basınçta çalışabilmektedir, ancak kullanılan elektrolit perdelerin ömrü sınırlıdır. Sıvı elektrolit olmadığından alkaline elektrolize göre daha güvenli ve kompakt bir yapıda olmasına rağmen, yüksek fiyatlı oluşu, düşük kapasite, düşük verim ve kısa ömre sahip olması, ticari uygulamalarda şu an için bu sistemin kullanılamamasına neden olmuştur. Perde elektrolit materyal araştırmaları ve elektroliz hücre dizaynı üzerine daha çok araştırma yapılması gerekmektedir [33].

3.3.2.3 Yüksek ısıli elektroliz

Yapılan araştırmalar neticesinde, elektroliz kabının ısısı artırıldıkça aynı miktardaki hidrojeni üretmek için gereken elektrik enerjisi miktarının azaldığı anlaşılmıştır. Bu bilgi ışığında, yüksek ısıli elektroliz işleminde, sistem 700 - 1000° C'de çalıştırılır ve elektrot reaksiyonlarının daha az elektrik enerjisi ile gerçekleşmesi sağlanır. Bu teknolojiye yardımcı olacak teknolojiler üzerinde çalışılmaktadır. Çalışmalarda elektroliz için gereken elektrik enerjisinin bir kısmını jeotermal, güneş veya doğalgaz kaynaklarından sağlanması amaçlanmaktadır [33].

3.3.3 Hidrojenin foto-elektroliz (Fotoliz) ile üretimi

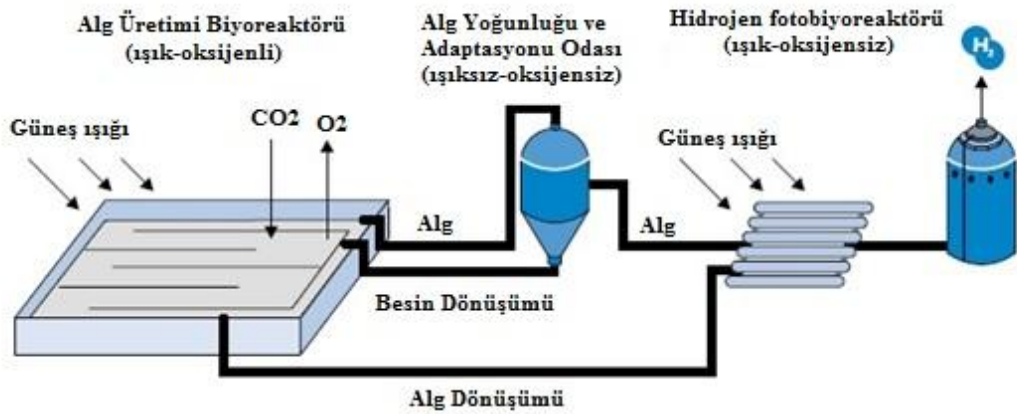
Fotoliz sistemlerinde, saf su güneş ışığı vasıtası ile H₂ ve O₂'e ayrıştırılır. Sistemde güneş ışığını emip elektrotlara elektrik olarak ileten, fotoelektrot materyalleri henüz geliştirilme aşamasında olduğundan, daha çok araştırma yapılmalı, yüksek performanslı, korozyon dayanıklılığı yüksek materyaller bulunmalı ve sistem tasarımı üzerine geliştirmeler yapılmalıdır [33]. Sistemin yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Fotoliz ünitesi sistem yapısı [33].

3.3.4 Hidrojenin foto-biyolojik işlem ile üretimi

Hidrojenin foto-biyolojik yol ile üretimi iki aşamada olur. İlk aşama fotosentez, ikinci aşama hidrojenездir. Fotosentez işlemi ile su hidrojen iyonlarına ve oksijene ayrıştırılır; hidrojenез işleminde ise iyon halindeki hidrojenler fotosentez işleminde açığa çıkan elektronlar ile reaksiyona sokularak hidrojen gazı elde edilir. Bu işlemler için yeşil algler ve fotosentetik bakteriler kullanılmaktadır. Bu yöntem gelecek için düşünülen bir yöntemdir ve üzerinde halen çalışılmaktadır. Ancak uzun dönemde hidrojenin yenilenebilir enerjilerden üretilmesinde önemli bir rol oynayacaktır [33]. Sistemin yapısı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Foto-biyolojik sistemin yapısı [33].

3.3.5 Hidrojenin yüksek ısı ile bozunma işlemi ile üretimi

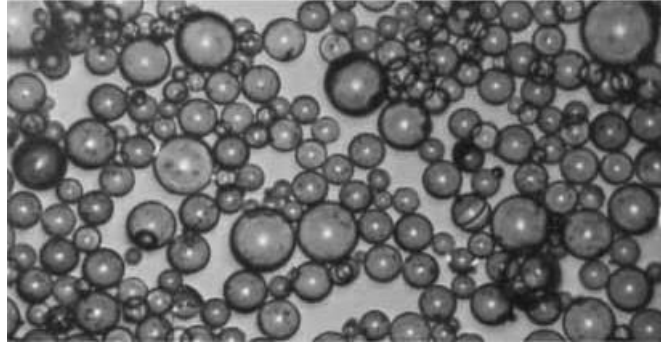
Yüksek ısı ile bozunma yönteminde, suyun yapısının yüksek ısı ile bozunması sağlanarak hidrojen elde edilmeye çalışılmaktadır. Suyun yüksek sıcaklıklar ile ayrışması 3000° C'de meydana gelmektedir. Bu sıcaklıkta suyun %10'u ayrışırken, %90'ı tekrar kullanılabilir halde bulunmaktadır. Bu işlem geliştirilme aşamasındadır ve yüksek ısıya dayanıklı materyalin bulunması, yüksek ısı ile çalışmanın yapılacağı

işlem ünitesinin dizaynı, ısıyı kontrol altında tutacak soğutucu kapasitesi gibi teknik sorunlar bulunmaktadır [33]. Bahsedilen hidrojen elde etme yöntemleri dışında, suyun termokimyasal olarak ayrıştırılması, biyokütleden hidrojen üretilmesi gibi çeşitli yöntemler de bulunmaktadır, ancak bu sistemler henüz geliştirilme aşamasındadır ve çözülmesi gereken önemli teknik sorunları bulunmaktadır. Başlıklar halinde belirtilen hidrojen elde etme yöntemlerine bakıldığında, kanıtlanmış bir teknoloji olduğundan ve uygulamaları geçmişten günümüze kadar devam ettiğinden, sistem sorunları en aza indirgendiğinden, yüksek sıcaklık, yüksek basınç gibi gemi üzerinde uygulaması zor ve yüksek enerji ihtiyacı olmayan bir sistem olduğundan, alkalın elektroliz sistemi gemi üzerinde uygulanabilirliği olan bir hidrojen üretme yöntemidir.

3.4 Hidrojeni Depolama Yöntemleri

Hidrojenin depolanmasında en çok kullanılan yöntem, gaz halinde çelik kompozit tanklarda saklanmasıdır. Kompozit tanklar, düşük ağırlığa sahip, ticari olarak piyasada bulunan, iyi dizayn edilmiş, güvenlik testleri yapılmış ve uzun zaman önce kullanımına başlanmıştır. Ancak bu tanklar büyük fiziksel hacim gerektirmekte, fiyatları yüksek olmakta ve hidrojenin silindire yüksek basınçta sıkıştırılması için enerji gerekmektedir. Hidrojen gazının kriyojenik sıcaklık değerlerine yaklaştırılmış şekilde kompozit tanklarda saklanması da diğer bir yoldur. Bu sayede hacimsel enerji yoğunluğunda artış sağlanmış olur. Hidrojen gazının en yeni depolanma yöntemi yüksek basınç altında cam mikrokürelerinde hidrojenin depolanmasıdır [32]. Cam mikrokürelerinin görseli Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Bu yöntemde, oyuk olan cam mikroküreleri yüksek basınçta (250 - 700 bar) ve yüksek sıcaklıkta (300° C) hidrojen ile doldurulur. Sonrasında mikroküreler oda sıcaklığına kadar soğutulur ve düşük basınçlı odada bekletilir [32].



Şekil 3.8 : Cam mikroküreleri [32].

Kullanım sırasında mikroküreler 300°C 'ye ısıtılarak depolanan hidrojenin kontrollü olarak çıkışı sağlanır. Bu yöntemdeki problemler, düşük hacimsel yoğunluk elde edilmesi, dolum yapmak için yüksek basınç gerekliliği, oda koşullarında mikrokürelerin sızdırma yapabilme ihtimali, dolum yaparken mikrokürelerde kırılma olabilmesi ve ani olarak verilen 300°C sıcaklığın kontrolünün zor olmasıdır [32].

Hidrojen sıvı halde de depolanabilir. Depolanırken en çok kullanılan yol, hidrojeni kriyojenik sıcaklıklara (-253°C) soğutarak saklamaktır. Hidrojeni başka sıvılar içinde çözerek tutmak da diğer yöntemlerden biridir. Hidrojenin depolanması için yapılan çalışmalardan başka biri de hidrojenin katı maddeler içinde çözdürerek veya reaksiyona sokulması ile depolanmasıdır. Güvenli ve verimli bir yöntem olarak görünse de henüz geliştirme aşamasındaki bir yöntemdir [32].

Belirtilen depolama yöntemlerine bakıldığında, gemi üzerine uygulanacak olan depolama sistemi ile beraber hem alan kaybı olacak hem ekstra maliyet oluşacak hem de ek güvenlik önlemlerinin alınması ve uluslararası kuralların gemi personeli tarafından uygulanması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı, gemide hidrojenin depolanmasını düşünmemekte; üretilen hidrojenin anında, direk olarak ana makineye verilmesinin, hem alan kaybı oluşturmayacağını, hem daha az maliyete mal olacağını hem de güvenlik önlemlerinin daha alt seviyede olacağını düşünmekteyim.

Hidrojen elde etme ve depolama yöntemleri birlikte ele alınıp değerlendirildiğinde, karada uygulamaları olan, makine verimine, yakıt tüketimine ve emisyon değerlerine olumlu etkileri olan hidrojen elektroliz hücre sistemi gemilerde uygulanabilecek bir sistem olarak ön görülmektedir.

4. HİDROJENİN YAKIT OLARAK KULLANIMI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

4.1 Saf Hidrojen İle Çalışmalar

Hidrojen ile ilgili çalışmalar, ilk olarak 1807 yılında, Issac de Rivas tarafından yapılmıştır. Çalışmasında H_2 - O_2 gaz karışımını yakıt olarak kullanan ilkel bir içten yanmalı motor üretmiştir. Bu motorda H_2 - O_2 gaz karışımı manuel olarak elektrik kıvılcımı ile tutuşturulmuştur [36]. Tasarımda, silindirde sıkıştırma işlemi, günümüz dizel motorlarındaki hareketli parçalar bulunmamaktadır. Bu tasarım, verimsiz ve başarısız bir tasarım olmasına rağmen, ilk üretilecek içten yanmalı benzinli motordan 50 yıl önce üretilmiştir [37].

1920 yılında, Alman mühendis, Rudolf Erren, çalışmasında iki zamanlı, buji ateşlemeli, H_2 gazı ile çalışan motor üretti. Bu motor, Almanya'da 1929 yılında, daha sonra da İngiltere'de patent altına alındı. Erren, çalışmasını binin üzerindeki sayıda motorda denedi [38].

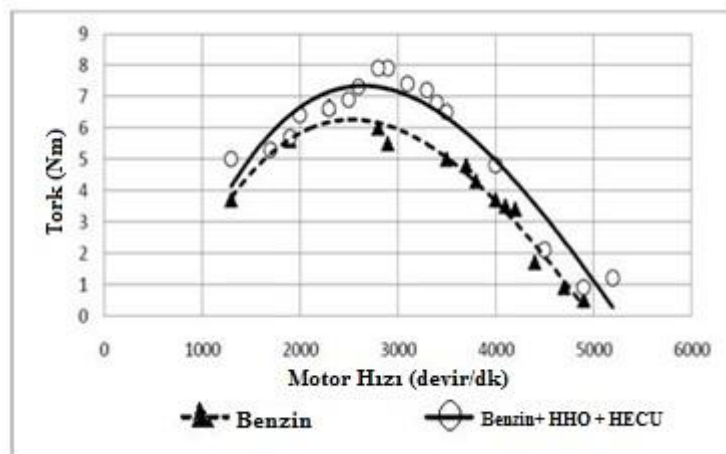
Karaman tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde, laboratuvar ortamında TOFAŞ tarafından Fiat lisanslı olarak üretilen, 60 beygir güce sahip benzinli 124 motoru üzerinde yapılan deneylerde, motorun farklı devirlerinde sadece benzin ve sadece 3 barlık hidrojen gazı ile çalışması gözlemlenmiştir. 3000 devirde alınan değerlerde, motorun ürettiği güç, benzinle çalışmada 6,9 kw iken hidrojen ile çalışmada 6,0 kw olmuş, termal verimlilik %15,3 iken %25,5'e çıkmış ve ortalama endike basınç 231 kPa iken 199 kPa'a düşmüştür. Emisyon değerlerinde de azalma meydana gelmiştir, NO_x emisyonu 10 kat azalmış, CO, CO_2 ve HC emisyon değerleri önemsenecek seviyelere inmiştir. Önemsenecek miktarda olan bu emisyonların nedeninin silindirde yakılan yağlama yağı kaynaklı olduğu belirtilmiştir [39].

4.2 Benzin - Hidrojen Karışımı ile Çalışmalar

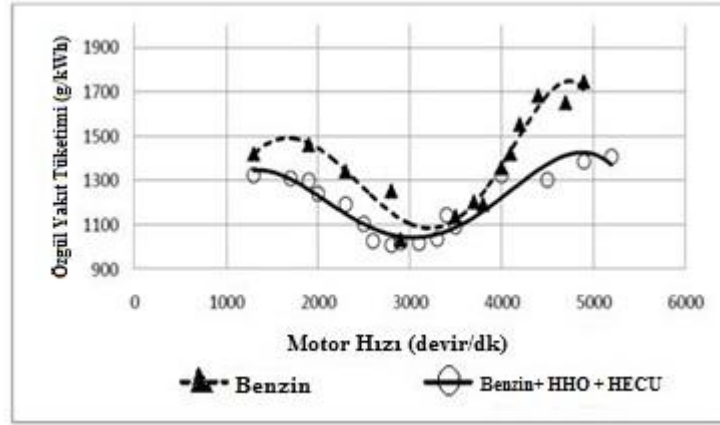
Ji ve Wang, H_2 - benzin hibrid motoru üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, hidrojenin geniş tutuşma aralığı ve çabuk yanma hızının, düşük CO, CO_2 ve HC emisyonları sağladığını belirtmişlerdir [40].

Dülger ve Özçelik, ürettikleri elektroliz sistemi ile saf sudan hidrojen üretilip, bu hidrojeni buji ateşlemeli ve dizel motorlarda ek yakıt olarak uygulayabilmışlerdir. 1993 model Volvo 940 ve 1996 model Mercedes 280 otomobiller üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, Volvo 940'ın yakıt tüketimi 10,5 lt/100 km iken 6 lt/100 km'ye düşmüş (%43); Mercedes 280'de ise 11 lt/100 km iken 7 lt/100 km'ye (%36) düşmüştür. Yakıt tasarrufuna ek olarak, CO, CO_2 ve HC emisyonlarında motor tipine bağlı olarak %40-50 arasında azalma gözlemlenmiştir [41].

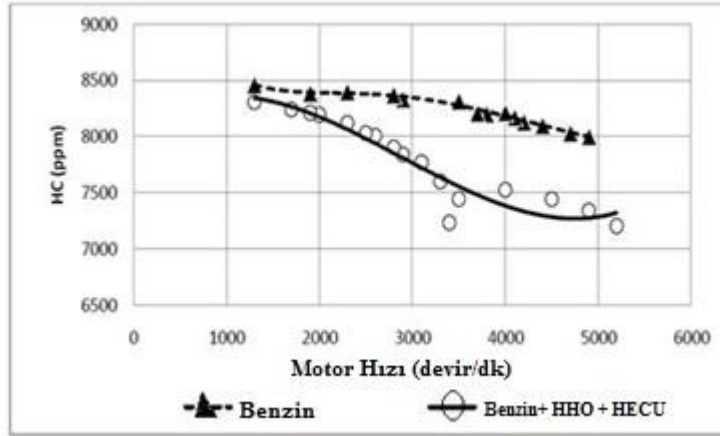
Yılmaz, 2010 yılında hazırlamış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, yapmış olduğu testlerin bir kısmını tek silindirli, 3000 devir/dk'da 10,6 torka sahip benzinli motor üzerinde gerçekleştirmiştir. Elektroliz hücresi, maksimum 5 lt/dk H_2 gazı üretmektedir. Hazırlamış olduğu elektroliz hücre sisteminin, motorların düşük devirlerinde uygun miktarda hidrojen gönderebilmesi için elektronik kontrol ünitesi (HECU) tasarlayıp, sisteme eklemiştir. Yapılan testler sonucunda motorda ortalama %32,4 oranında tork kazancı elde etmiştir. Özgül yakıt tüketimi %16,3 oranında, HC emisyonu %6,7 oranında ve CO emisyonu da %14,4 oranında azalma göstermiştir [42]. Bu testlere ait devire bağlı tork grafiği Şekil 4.1'de, devire bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği Şekil 4.2'de, HC emisyonları Şekil 4.3 ve CO emisyonları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



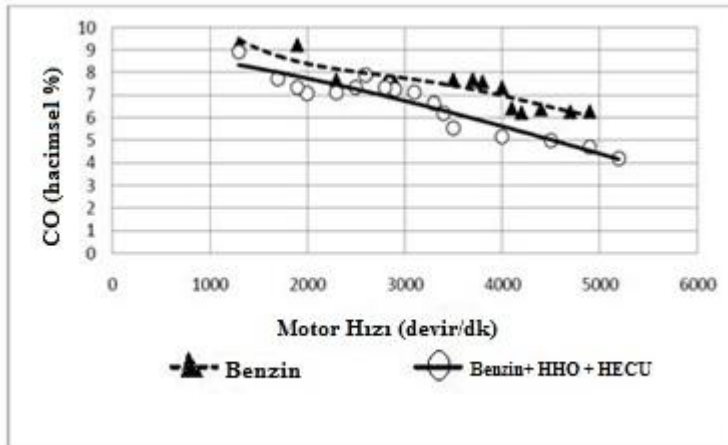
Şekil 4.1 : Benzin ile çalışmada devire bağlı tork değerleri karşılaştırması [42].



Şekil 4.2 : Benzin ile çalışmada devire bağlı özgül yakıt tüketimi karşılaştırması [42].



Şekil 4.3 : Benzin ile çalışmada devire bağlı HC emisyonları karşılaştırması [42].



Şekil 4.4 : Benzin ile çalışmada devire bağlı CO emisyonları karşılaştırması [42].

4.3 Dizel - Hidrojen Karışımı İle Çalışmalar

Alperstein ve arkadaşları, 1941 yılında Pennsylvania Eyalet Üniversitesi'nde dizel motorlarda yapmış oldukları çalışmalarda, dizel motorların emme manifoldlarından çeşitli ek yakıtlar vererek denemeler yapmışlardır. Bu çalışmalarda ek yakıt olarak, heksan, heptan, değişik dizel çeşitleri, benzin, hidrojen peroksit, benzol peroksit, metil alkol, benzen, setan ve dietil eter gibi maddeler kullanmışlardır [43].

Saravanan ve arkadaşları, çalışmalarında emme manifoldundan verdikleri %30 oranındaki hidrojen sonucunda dizel motorun tüm yüklerinde ortalama %27,9 oranında verim kazancı elde ettiklerini belirtmişlerdir [27].

Varde ve arkadaşlarının 1985 yılında yapmış olduğu çalışmalarda hava ile beraber H_2 gazını motor emme manifoldundan silindire vererek, PM emisyonlarını azaltmayı planlamışlardır. Dizel - hidrojen karışımında enerji miktarı olarak %10 civarında H_2 gazı kullanıldığında yarı yüklerde duman emisyonlarının gözle görülür şekilde azaldığı, ancak tam yükte çok az miktar düşüş gözlemlendiği belirtilmiştir [43].

Masood ve arkadaşlarının 2006 yılında, tek silindirli, 4 zamanlı, 1500 devir/dk'da 3,7 kw güç üreten Kirloskar AV1 dizel motor üzerinde yapmış oldukları deneylerde, H_2 gazı motora enjektör ile püskürtülerek ve emme manifoldundan olmak üzere iki farklı şekilde verilerek, her iki durumun değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda fren ısı verimliliğinde, hidrojenin silindire verilmesi ile beraber artış meydana gelmiştir, ancak hidrojenin emme manifoldundan verildiği uygulamadaki verim, enjektörden püskürtme uygulamasındaki verime nazaran %19 daha fazladır. Bunun nedeni, emme manifoldundan verilen atmosfer basıncındaki hidrojenin silindirde dizel yakıt ve hava ile beraber daha homojen şekilde karışması ve tam bir yanma gerçekleştirmesidir. Test sonuçlarına göre NO_x emisyonlarında hidrojenin silindire verilmesi ile düşüş olmuştur, ancak hidrojenin emme manifoldundan verildiği uygulamadaki NO_x emisyonu miktarı, enjektörden püskürtme uygulamasındaki NO_x emisyon miktarına göre bir miktar fazladır [44].

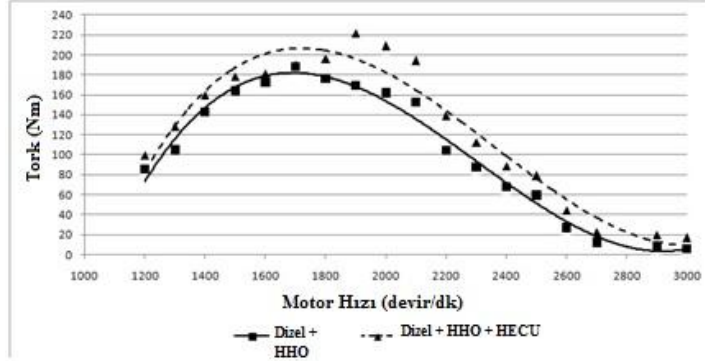
Erman, 2007 yılında hazırlamış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında ek yakıt olarak eklenen H_2 gazının dizel motorlara olan etkilerini incelemiş, dizel motor olarak New Holland traktörlerde kullanılan 55 beygirlik, 4 zamanlı, doğal emişli, 2500devir/dk'ya sahip motoru kullanmıştır. Hidrojen miktarı en az 1500 cm^3/dk , silindir içindeki doldurulabilir hacmin %2'si olduğunda güç ve tork değerlerinin

arttığı ve özgül yakıt tüketiminin azaldığı belirtilmiştir. Yine yapmış olduğu çalışmada, motora 3500 cm³/dk H₂ gazı verdiklerinde, motorun düşük çalışma devirlerinde %18 daha fazla duman koyuluğu yaptığı, yüksek devirlerde önemli bir değişiklik olmadığı, NO_x emisyonlarında, motorun her devrinin emisyon ortalaması alındığında %6,4 artış ile karşılaştıklarını belirtmiştir. NO_x emisyonlarındaki bu artışı, silindire giren dizel yakıt miktarında değişiklik yapılmamasına, aynı zamanda ek olarak hidrojenin silindire verilmesi ile silindir içinde sadece dizel yakıt ile çalışmadaki duruma göre daha fazla yakıtın yanma reaksiyonuna girmesini neden olarak açıklamışlardır [45].

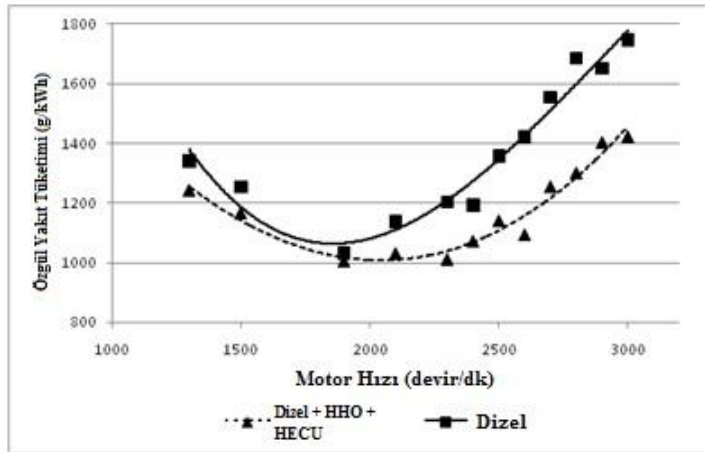
Saravanan ve arkadaşlarının 2008 yılında, tek silindirli, 4 zamanlı, 1500 devir/dk'da 3,78 kw güç üreten dizel motor üzerinde yaptığı çalışmalarda, dizel motor önce sadece dizel yakıt ile çalıştırılmış daha sonra dizel yakıt hacim oranı %90, %80, %70, %50, %30 ve %10 olacak şekilde ayarlanarak motor 1500 devir/dk'ya gelene kadar hidrojen miktarı arttırılmıştır. Fren ısı verimlilik değerlerinde, motorda vuruntu yapmadan en yüksek verimlilik %30 H₂ gazı zenginleştirmesi ile %27,9 olmuştur, sadece dizel ile çalıştırılmada verimlilik %22,8'dir. Özgül enerji tüketimi, hidrojenin artışı ile beraber düşmüştür. %65 yükte, %90 hidrojen zenginleştirmesi ile özgül enerji tüketimi 12,7 MJ/kwh iken sadece dizel yakıt ile çalışmada 16,7 MJ/kwh'dır. Tam yükte %30 hidrojen zenginleştirmesi ile özgür enerji tüketimi 14,5 MJ/kwh'dan 12,9 MJ/kwh'e düşmüştür. NO_x emisyonlarının %10 ve %20 hidrojen zenginleştirmesi durumlarında sadece dizel yakıt ile çalışma durumunda yüksektir, ancak %30 hidrojen zenginleştirmesinde emisyon azalmıştır. Duman yoğunluğu, kötü yanma ile alakalı olduğundan, hidrojen zenginleştirmesi ile yanma iyileştiğinden duman yoğunluğu azalmıştır. PM ve HC emisyonları C ile alakalı olduğundan, hidrojenle C bulunmadığından azalma göstermiştir. PM emisyonları %90 hidrojen zenginleştirmesinde 4 g/kwh'dan 1 g/kwh'a; HC emisyonları da %30 hidrojen zenginleştirmesinde tam yükte en düşük değer olan 56 ppm'e düşmüştür [31].

Yılmaz, 2010 yılında yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında benzinli motorda yapmış olduğu çalışmaya ek olarak, 4 zamanlı, 4 silindirli, 255 tork ve 1800 devir/dk özelliklerine sahip dizel motor üzerinde de çalışmalar yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmada maksimum 5 lt/dk H₂ gazı üreten elektroliz hücresinden motor emme manifolduna H₂ gazı göndermiş ve bu testler sonucunda %19,1 oranında tork artışı

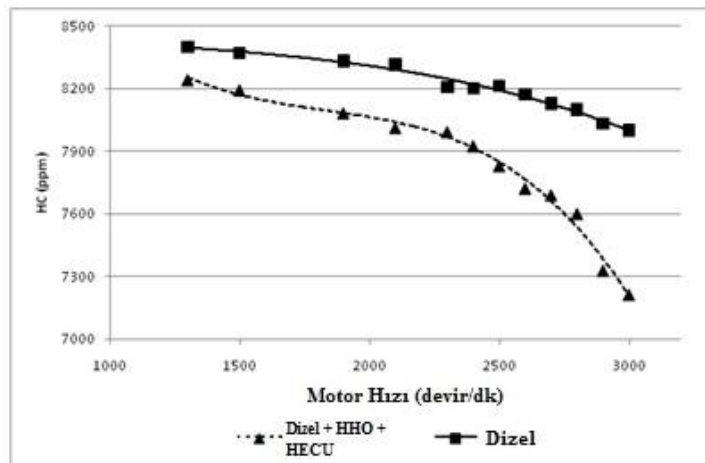
elde etmişlerdir. Özgöl yakıt tüketimi %14, HC emisyonunda %5, CO emisyonunda %13,5 oranında azalma gözlemlemiştir [42]. Bu testlere ait devire bağlı tork grafiği Şekil 4.5'te, özgöl yakıt tüketimi Şekil 4.6'da, HC emisyonları Şekil 4.7'de ve CO emisyonları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



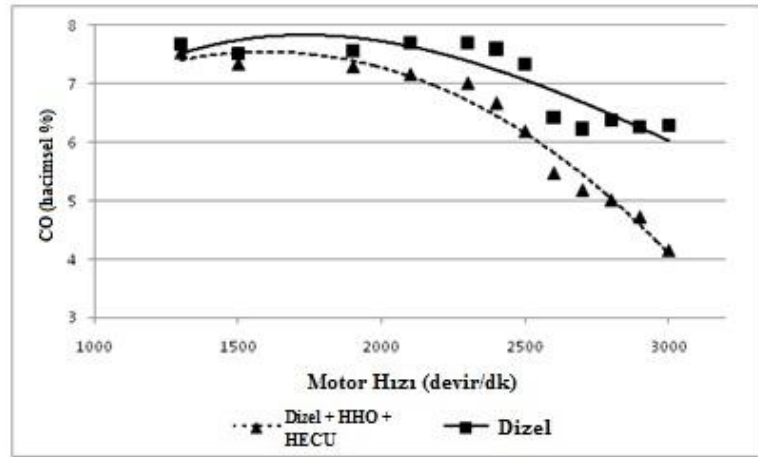
Şekil 4.5 : Dizel ile çalışmada devire bağlı tork değerleri karşılaştırması [42].



Şekil 4.6 : Dizel ile çalışmada devire bağlı özgöl yakıt tüketimi karşılaştırması [42].



Şekil 4.7 : Dizel ile çalışmada devire bağlı HC emisyonları karşılaştırması [42].



Şekil 4.8 : Dizel ile çalışmada devire bağlı CO emisyonları karşılaştırması [42].

Bari ve Mohammed Esmail, 2010 yılında yaptıkları çalışmada 1500 devir/dk'da 38 kw güç üreten 4 silindirli, Hino WO4D dizel motoru üzerinde testler yapmışlardır. Testler sonucunda, motora yüklenen yük durumuna bakılmaksızın, H_2/O_2 karışımı silindirlere verildikçe fren ısı verimliliğinin arttığı belirtilmiştir. 19 kw yükte maksimum ısı verimlilik %32'den %34,6'ya, 22 kw yükte %32,9'dan %35,8'e ve 28 kw yükte %34,7'den %36,3'e yükselmiştir. H_2/O_2 karışımı silindire verildiğinde motorun yüküne bakılmaksızın fren özgül yakıt tüketiminde azalma gerçekleşmiştir. 19 kw yükte %6,1 dizel yakıt enerji eşitliğinde H_2/O_2 karışımı verildiğinde fren özgül yakıt tüketimi %7,3; 22 kw yükte %6 dizel yakıt enerji eşitliğinde H_2/O_2 karışımı verildiğinde %8,1 ve 28 kw yükte %4,8 dizel yakıt enerji eşitliğinde H_2/O_2 karışımı verildiğinde %4,8 azalmıştır. HC emisyonları 19 kw yükte 187 ppm'den 85 ppm'e, 22kw yükte 189 ppm'den 93 ppm'e ve 28 kw yükte 192 ppm'den 97 ppm'e düşmüştür. CO_2 emisyonları 19 kw yükte 2,06 ppm, 22 kw yükte 3,17 ppm ve 28 kw yükte 3,54 ppm olmuştur. CO emisyonları 19 kw yükte %0,26'dan %0,005'e, 22 kw yükte %0,24'ten %0,012'ye ve 28 kw yükte %0,26'dan %0,021'e düşmüştür. NO_x emisyonları H_2/O_2 karışım miktarı arttıkça artmıştır. 19 kw yükte 220 ppm'den 280 ppm'e, 22 kw yükte 232 ppm'den 307 ppm'e, 28 kw yükte 270 ppm'den 339 ppm'e artmıştır [46].

Wang ve arkadaşlarının, 2011 yılında 6 silindirli, 4 zamanlı, 2500 devir/dk'da 118 kw güç üreten Cummins B5.9-160 dizel motorda yapmış oldukları deneyde elde edilen sonuçlarda fren ısı verimlilik sadece dizel yakıt ile çalışmada %31,1 iken 10 lt/dk H_2/O_2 karışımı eklendiğinde %31,4 olmuş, 70 lt/dk H_2/O_2 karışımı eklendiğinde %39,9 olmuştur. Fren özgül yakıt tüketimi sadece dizel yakıt ile çalışmadan 70 lt/dk

H₂/O₂ karışımı eklenmiş hale kadar sırası ile 254,74 g/kwh, 262,06 g/kwh, 262,75 g/kwh, 260,42 g/kwh, 263,80 g/kwh, 246,51 g/kwh, 229,56 g/kwh ve 228,01 g/kwh olmuştur. HC emisyonları sadece dizel yakıt ile çalışmada 3,6 ppm iken 70 lt/dk H₂/O₂ karışımı eklendiğinde 3,25 ppm'e, CO emisyonları 26 ppm'den 24 ppm'e, CO₂ emisyonları 7906 ppm'den 7523 ppm'e düşmüş, NO_x emisyonları 60,05 ppm'den 67,22 ppm'e artış göstermiştir [47]. NO_x emisyonları miktarındaki artışın sebebi dizel yakıtta azaltma yapılmadan, hidrojenin eklenmesidir.

Hidrojen teknolojileri üzerine araştırmalar yapan İngiliz, Impact Global Emission Solutions Ltd. (IGES) firması, Antwerp Limanı, Mediterranean Shipping Company (MSC) Terminali'ndeki 30 liman içi konteyner taşıma kreyni ve 1 mobil kreyn üzerine kendilerinin ürettiği alkalın elektroliz sistemini monte etmiş, yakıt tasarrufu ve emisyon değerlerinde azalma gözlemlemişlerdir. Scania DC12 52A, liman içi konteyner taşıma kreynlerindeki uygulamalar sonucunda, CO₂ emisyonları %5,4 iken %4,4'e (%19), NO_x emisyonları 1823 mg/Nm³'ten 1481 mg/Nm³ (%19), CO emisyonları 199 mg/Nm³'ten 176 mg/Nm³'e (%12) ve PM emisyonları 10,5 mg/Nm³'ten 1,6 mg/Nm³'e (%85) düşmüştür. Cummins KTA-36, mobil kreyn üzerinde yapılan testler sonucunda da rölanti çalışmada %26, yüklü çalışmada %16 oranında yakıt tasarrufu sağlanmıştır [48]. Yapılan çalışmalar sonucunda ekipmanlardan 1 yılda elde edilmiş emisyon kazançları Çizelge 4.1 ve 4.2' de belirtilmiştir.

IGES firmasının, Cummins KTA50-M2 deniz tipi dizel makineye uyguladığı elektroliz hücre sistemi ile CO₂ emisyonlarında ortalama %37, CO emisyonlarında %45 ve NO_x emisyonlarında %36 oranında azalma gözlemlemişlerdir. Deniz tipi, CAT 3512 dizel makineye uygulanan sistem sonucunda ise CO₂ emisyonlarında ortalama %20, CO emisyonlarında %11,78 ve NO_x emisyonlarında %12,09 oranında azalma gözlemlemişlerdir [50].

Hidrojenin saf halde, benzin veya dizel ile karıştırılarak kullanılması dışında farklı kullanım şekilleri de olabilir. Kumar ve arkadaşları, 2003 yılında tek silindirli, 4 zamanlı 1500 devir/dk'da 3,7 kw güç üreten Kirloskar AV1 marka modele sahip dizel motor üzerinde yaptıkları deneylerde bitkisel Jatropha yağı ile beraber H₂ gazını çeşitli oranlarda kullanarak motor üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda en verimli H₂ oranı toplam yakıt kütlesinin %7'si kadar verildiğinde olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumda fren ısı verimlilik sadece

jatropha yağı ile çalışırken %27,3 iken %29,3'e yükselmiş, duman oranı 4,4 BSU'dan 3,7 BSU'ya düşmüş, HC emisyonları 130 ppm'den 100 ppm'e, CO emisyonları %0,26'dan %0,17'ye düşmüş; sadece NO miktarı 735 ppm'den 875 ppm'e yükselmiştir [51].

Çizelge 4.1 : Antwerp Limanı MSC Terminali'ndeki Scania DS12 Liman içi konteyner taşıma kreyni bir yıllık emisyon kazancı [49].

Ölçüm Tipi	Hidrojenli Kullanım	Hidrojenli Kullanım	Fark Oranı, %	Yıllık Emisyon Azalması*
CO ₂ (%)	6,4	5,3	17,19	33 ton/yıl
CO (mg/Nm ³)	228,5	205	10,28	35,75 kg/yıl
NO _x (mg/Nm ³)	2.156	1.775	17,67	582,9 kg/yıl
PM (mg/Nm ³)	8,2	1,6	80,49	8,13 kg/yıl

*Yılda 2500 saat çalışma baz alınmıştır.

Çizelge 4.2 : Antwerp Limanı MSC Terminali'ndeki Cummins KTA-38-Gottward mobil kreynin bir yıllık emisyon kazancı [49].

Ölçüm Tipi	Hidrojenli Kullanım	Hidrojenli Kullanım	Fark Oranı, %	Yıllık Emisyon Azalması*
CO ₂ (%)	4,6	2,3	50,00	159 ton/yıl
CO (mg/Nm ³)	679	504	25,77	828 kg/yıl
NO _x (mg/Nm ³)	1.645	1.332	19,03	1.773 kg/yıl
PM (mg/Nm ³)	187	41,2	77,97	447 kg/yıl

*Yılda 2500 saat çalışma baz alınmıştır.

4.4 Hidrojenin Dizel Yakıt ile Beraber Kullanımına İlişkin Deneysel Çalışma

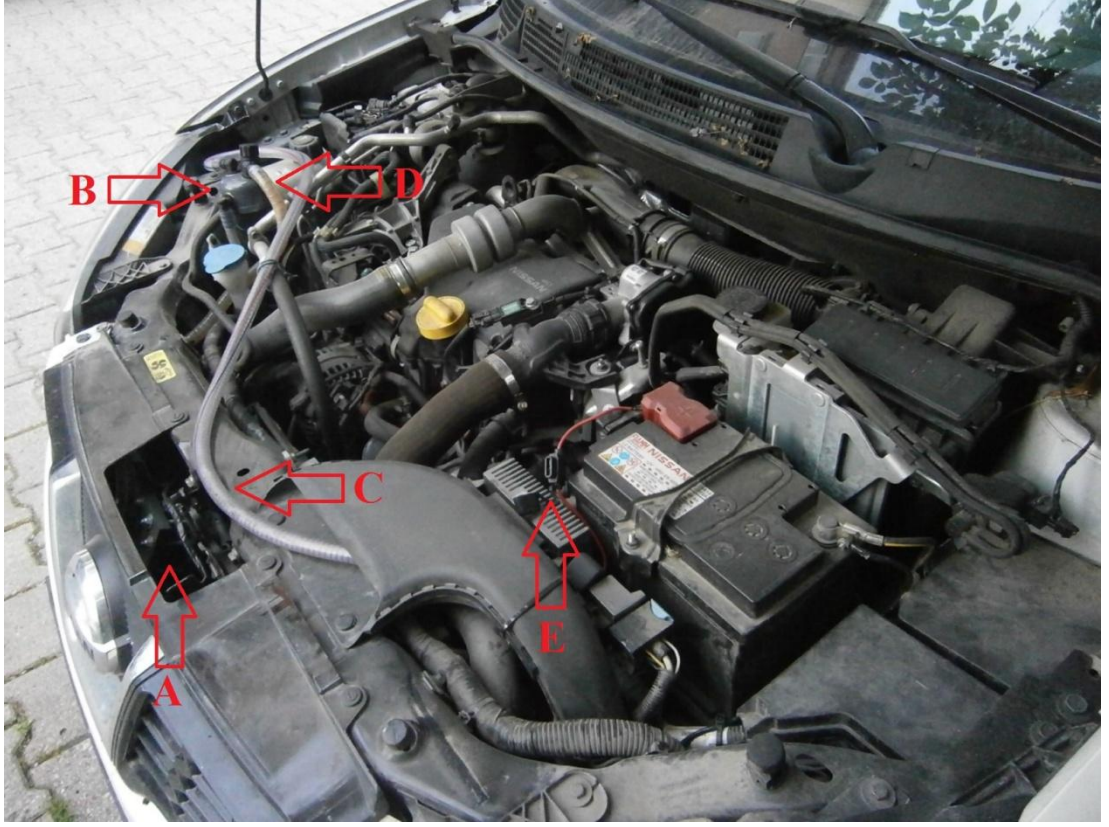
2012 model 1,5 lt dizel motora sahip Nissan Qashqai üzerinde uygulanan, 1,05 lt/dk hidrojen üretme kapasitesine sahip alkalin elektroliz sistemi ile yol testleri yapılmıştır. Aracın motor özellikleri Çizelge 4.3'te, uygulanan alkalin elektroliz sistemine ait özellikler ve parçalar Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Sistemin, araba motoruna uygulanışı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Aracın motor özellikleri [52].

Özellikler	Değerler
Motor hacmi (cc)	1461
Motor gücü (ps/dd)	110/4000
Maksimum tork (Nm/dd)	240/1750
Silindir sayısı	4
Emisyon normu	Euro 5

Çizelge 4.4 : Alkalın elektroliz sistemi özellikleri ve parçaları [53].

Sistem Parçaları	Özellikler
	Elektroliz hücresi Ölçüler: 140 x 220 x 60 mm 316L paslanmaz çelik 11 adet plaka H ₂ üretimi: 1,05 lt/dk
	Saf su tankı Ölçüler: 270 x 63 mm Sıkıştırılmış plastik
	Kontrol rolesi 30 A - 12/24V DC
	Sistem sigortası 20A
	Bağlantı hortumu Tel spiralli plastik



Şekil 4.9 : Sistemin araba motoruna uygulanışı.

Şekil 4.9'da alkalın elektroliz sisteminin motora uygulanışı gösterilmektedir. A ile belirtilen alkalın elektroliz hücresi, B ile belirtilen saf su tankı, C ile belirtilen, üretilen hidrojenin motor emişine gönderilmesini sağlayan hortum, D ile belirtilen alkalın elektroliz hücresinde ayrılan H_2 ve O_2 gazlarının, saf su tankına gönderildiği hortum, E ile belirtilen sistem sigortası ve elektrik bağlantılarıdır.

Aküye bağlı E ile gösterilen sigorta ve rolenin bulunduğu bağlantıdan elektrik alan A ile gösterilen alkalın elektroliz hücresi, yükseklik farkı ile saf su tankının altındaki hortumdan elektroliz hücresinin içine kadar ilerlemiş KOH çözeltili saf suyu, H_2 ve O_2 gazlarına ayrıştırarak ayrılmamış saf su ile beraber, D ile belirtilen hortum vasıtası ile saf su tankına göndermektedir. Üstte gaz halinde bulunan H_2 ve O_2 gazları saf su tankından, motor emişine C hortumu ile gönderilmektedir. Bu sistemde O_2 gazı dışarı verilmeden H_2 gazı ile beraber motora gönderilmektedir.

Alkalın elektroliz sistemi arabaya uygulandıktan sonra ilk olarak şehirler arası yolda, İstanbul - Şile arasındaki 65 km'lik mesafede, 100 km/h ortalama hız ile sistem çalıştırılarak gidilmiştir. Bu durumda, 4,7 lt/100 km yakıt harcamı oluşmuştur.

Daha sonra aynı mesafe, yine 100 km/h ortalama hız ile sistem çalıştırılmadan gidilmiş ve 5,3 lt/100 km yakıt harcamı elde edilmiştir. İki durum karşılaştırıldığında % 11,32 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

İkinci deneme olarak Kavacık - Tuzla arası 45 km'lik mesafe otoban kullanılarak, 80 km/h ortalama hız ile iki sefer hem sistem çalıştırılarak hem de çalıştırılmadan gidilmiştir. Sistem çalışırken, motora hidrojen verilmesi ile beraber gidildiğinde 4,2 lt/100 km; sistem kapatılarak gidildiğinde 5,0 lt/100 km yakıt tüketimi elde edilmiştir. Sonuç olarak ortalama % 16 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Üçüncü deneme olarak, tekrardan Kavacık - Tuzla mesafesi iki kere sistem çalıştırılarak gidilmiş ve 4,6 lt/100 km yakıt harcamı; aynı güzergah sistem çalıştırılmadan gidildiğinde 5,6 lt/100 km yakıt harcamı elde edilmiştir. Deneme sonucunda ortalama % 17,85 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Şehir içi denemelerde, 60 km çeşitli güzergahlarda 100 km/h ortalama hız ile sistem çalıştırılarak gidilmiş ve 8,6 lt/100 km yakıt harcamı elde edilmiş; aynı güzergah boyunca aynı hız ortalaması ile sistem çalıştırılmadan gidilmiş ve 9,1 lt/ 100 km yakıt harcamı elde edilmiştir. Ortalama % 5,49 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Şehir içindeki ikinci denemede, Kavacık - Tuzla arasındaki 40 km'lik mesafe 90 km/h ortalama ile sistem çalıştırılarak gidilmiş ve 3,8 lt/100 km yakıt harcamı; sistem çalıştırılmadan aynı mesafe ve ortalama hız ile gidildiğinde 4,4 lt/100 km yakıt harcamı oluşmuştur. % 13,63 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Şehir içindeki üçüncü deneme, Kavacık - Tuzla - Kavacık güzergahında, 85 km'lik toplam mesafede, 90 km/h ortalama hız ile sistem çalıştırılarak 4,4 lt/100 km yakıt harcamı ile; sistem çalıştırılmadan, aynı mesafe ve aynı ortalama hız ile 4,8 lt/100 km yakıt harcamı elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak % 8,33 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Şehir içindeki son denemede, kısa mesafe kullanımında sistemin etkileri denenmiş, 10 km'lik yol ortalama 30 km/h ortalama hız ile sistem çalıştırılarak 7,4 lt/100 km; sistem çalıştırılmadan gidildiğinde 8,6 lt/100 km yakıt harcamı ile karşılaşılmıştır. %13,95 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

Bu denemeler sonucunda 220 km'lik şehir içi kullanımda, yakıt tüketimi 6,72 lt/100 km'den 6,05 lt/100 km'ye, ortalama % 9,97 oranında; 480 km'lik şehirler arası kullanımda, yakıt tüketimi 5,3 lt/100 km'den 4,5 lt/100 km'ye, ortalama % 15,09 oranında, toplamda ortalama % 12,53 oranında düşmüştür.

Aracın, rölantide ve vites boşa iken 2000 devir/dk'da emisyon değerleri ölçülmüştür. Ölçüm cihazı olarak, Şekil 4.10 ile gösterilen, Madur GA-21 emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.10 : Madur GA-21 emisyon ölçüm cihazı.

Rölanti durumunda araç hidrojeniz olarak çalışırken CO emisyonları 1720 mg/m³, NO emisyonları 348 mg/m³ ve toplam NO_x emisyonları 563 mg/m³ iken; hidrojenli çalışma durumunda CO emisyonları 1305 mg/m³, NO emisyonları 257 mg/m³ ve toplam NO_x emisyonları 415 mg/m³'e düşmüştür. Araç vites boşa, 2000 devir/dk'da hidrojeniz olarak çalışırken CO emisyonları 3018 mg/m³, NO emisyonları 123 mg/m³ ve toplam NO_x emisyonları 199 mg/m³ iken; hidrojenli çalışma durumunda CO emisyonları 2270 mg/m³'e düşmüş, NO ve toplam NO_x emisyonları 126 mg/m³ ve 203 mg/m³'e yükselmiştir. NO ve NO_x emisyonlarının artmasının sebebi, araçta kullanılan sistem ile H₂ ve O₂ gazlarının birlikte motora gönderilmesi ve silindirlere gönderilen ek O₂ ile silindirlerde oluşan toplam NO_x miktarının artmasıdır.

5. ALKALİN ELEKTROLİZ METODUNUN GEMİLERE UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Hidrojeni elde etme yöntemleri incelenmiş ve Çizelge 5.1'de karşılaştırmalar yapılmıştır. Hidrojeni elde etme yöntemleri incelendiğinde, fosil yakıtlardan hidrojen üretilmesinde, genelde dışarıdan yüksek ısı ve basınç sağlanması gerektiğinden gemilerde uygulanabilmesi için 700 -850° C sıcaklık ve 3 - 25 bar basınç sağlayacak sistemin kurulması gerekmektedir. Bu sistemin gemi bünyesine kurulması, hem yer sıkıntısı nedeni ile hem de güvenlik sorunları nedeni ile zordur. Ayrıca gemiye koyulacak bu sistem sayesinde hidrojen elde etmek için gemide taşınacak yakıtı ek olarak doğalgaz veya kömür taşınması gerekecektir. Bu da gemideki yük hacminden feragat etmek anlamına gelmektedir. Ayrıca depolanacak doğalgaz için de özel bir tank ve buna bağlı uyulması gereken IMO kuralları eklenecektir. Maliyet ve enerji ihtiyacı bakımından bakıldığında eklenecek ekipmanlar ile hem maliyeti yüksek olacak, hem de yüksek ısı ve basınç gerektiğinden enerji ihtiyacı fazla olacaktır. Bu yöntem değerlendirmeye alındığında gemilerde kullanılması mümkün görülmemektedir.

PEM yönteminde, hidrojen üretmek için yüksek basınç gerekmektedir. Bu sistem yeni yeni denenmeye başlanmış ve düşük kapasitede çalışmaktadır. Sistemin kısa ömürlü olması gemilerde kullanım açısından bir dezavantajdır. Ayrıca yüksek basınç gerekliliği de gemilerde güvenlik tehditi oluşturabileceğinden, gemilerde kullanılması, uyulması gereken ekstra IMO kurallarını oluşturur. Yüksek basınç gerekliliğinin doğuracağı enerji ihtiyacı da sistemin gemilerde kullanılması için ek bir dezavantajdır.

Yüksek ısılı elektroliz yönteminde, özel olarak imal edilmiş elektroliz hücresine 1000° C ısı verilmektedir. Gemi üzerinde bu miktarda bir sıcaklığın verilmesi imkansız ve tehlikelidir. Bu neden ile gemilerde kullanımı mümkün değildir.

Fotoliz, foto-biyolojik ve yüksek ısı ile bozunma işlemleri henüz deneme aşamasında olan, deneysel yöntemlerdir ve ticari denemeleri bulunmamaktadır. Bu neden ile gemi üzerinde uygulamaları yapılamayacaktır.

Çizelge 5.1 : Hidrojen elde etme yöntemleri karşılaştırması.

Hidrojen Üretim Yöntemleri	Operasyon Şartları	Sistemin Kullanım Sıklığı	Gemilere Uygulanabilirliği	Maliyet & Enerji İhtiyacı
Fosil yakıtlardan üretim	Yüksek sıcaklık ve basınç gereklidir, bazı yöntemlerde ısı gerekmez	Kara tesislerinde kullanılmaktadır	Yüksek sıcaklık ve basınç gerekliliği olduğundan gemilerde güvenlik sorunu oluşturabilecektir.	Maliyeti yüksek, operasyon için ısı ve basınç gerektiğinden enerji ihtiyacı yüksektir
Alkalın elektroliz	Oda şartları	Kara tesislerinde ve araçlarında sıkça kullanılmaktadır	Operasyon öncesi ve sonucunda herhangi bir güvenlik sorunu oluşturmamaktadır	Maliyeti yüksek değildir, sadece elektrik ve su tüketimi bulunmaktadır.
PEM	Yüksek basınç	Düşük kapasiteli olanları kara tesislerinde kullanılıyor, geliştirme aşamasında	Yüksek basınç gerekliliği, gemilerde güvenlik sorunu oluşturabilir	Maliyeti yüksek, yüksek basınç için enerji ihtiyacı yüksektir.
Yüksek ısıli elektroliz	Yüksek sıcaklık	Kara tesislerinde kullanılmaktadır	Yüksek sıcaklık gerekliliği gemilerde güvenlik sorunu oluşturabilir	Yüksek sıcaklık gerekliliği nedeni ile yüksek enerji ihtiyacı olacaktır
Fotoliz	Güneş ışığı	Geliştirme aşamasında	Gemilerde uygun bölgelere güneş paneli yerleştirilmesi gerekmekte	Güneş panellerinin maliyeti yüksektir
Foto-biyolojik	Güneş ışığı, algler, bakteriler	Geliştirme aşamasında	Ticari uygulaması yoktur	Maliyeti ve enerji ihtiyacı bilinmiyor
Yüksek ısı ile bozunma	Yüksek sıcaklık	Geliştirme aşamasında	Ticari uygulaması yoktur	Maliyeti ve enerji ihtiyacı bilinmiyor

Yapılan incelemeler sonucunda, hidrojen elde edilme yöntemlerinden suyun alkalin elektrolizinin, kolay uygulanabilir olması, daha önceden çeşitli sektörlerde kullanılmış olması ve gemi üzerinde kullanımında yüksek sıcaklık, yüksek basınç gibi gemi güvenliğini tehlikeye atabilecek bir yapıya sahip olmadan, gemide depolanabilecek olan saf su ile çalışmasından dolayı gemi üzerinde uygulanabileceği ön görülmüştür. Hidrojenin depolanma yöntemlerine bakıldığında, depolama işleminin zorlukları, yüksek enerji ihtiyacı ve güvenlik nedenleri sebebi ile gemide hidrojenin depolanmasının sorun oluşturacağı görülmüştür. Bu nedenle hidrojenin suyun alkalin elektrolizi ile elde edildiği yöntemde hidrojenin depolanmasına ihtiyaç duyulmadan direk olarak ana makineye verilebileceği ön görülmüştür. Literatür taraması yapıldığında, hidrojenin saf olarak dizel veya buji ateşlemeli motorlarda kullanımının denendiği, ayrıca hidrojenin benzin veya dizel ile karışım halinde dizel veya buji ateşlemeli motorlarda uygulandığı, hem yakıt tüketiminde hem de kirletici emisyon gazları oranlarında azalma meydana geldiği incelenmiştir.

Gemilerde, günümüzde kullanılan emisyon azaltma yöntemleri incelendiğinde, tek bir sistemin tüm kirletici emisyonları azaltmaya yönelik olmadığı, bazı uygulamalarda birkaç sistemin birlikte uygulandığı görülmüştür. Bu sistemlerin boyutlarının büyük olduğu, ekstra ekipman ve buna bağlı bakım masraflarının arttığı, bu sistemlerin ilk kurulum masraflarının çok yüksek olduğu incelenmiştir.

Yapılan literatür taramasında, alkalin elektroliz sistemi üzerine yapılan testlerin ve çalışmaların karada bulunan çeşitli motorlara ve araçlara uygulandığı, gemi üzerindeki bir uygulama üzerine değerlendirme yapıp sonuçların alınmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, literatür taraması sonucunda elde edilecek bilgilerin ışığında, karada uygulamaları olan alkalin elektroliz sisteminin bir gemiye uygulanabilme şartları ve sistem esaslarını incelemek, varolan emisyon azaltıcı sistem ve yöntemlere alternatif bir sistemin uygulanabileceğini belirtmek olacaktır. Çalışmada, seçilecek uygun bir gemiye sistemin kurulması, geminin bir senelik seyiri boyunca elde edebileceği yakıt tasarruf miktarını hesaplama, azalacak kirletici emisyon miktarlarını bulma, sistem ilk kurulum ve işletme maliyetlerini analiz etme ve dünya denizciliğine yapacağı katkılarının yorumlanması konularından bahsedilecektir.

5.1 Sistemin Kurulumu

Alkalin elektroliz sisteminin uygulanabilme şartları ve esasları, 1 Ocak 2012 ve 1 Ocak 2013 yılları arasında SEAHORSE Denizcilik ve Mühendislik Tic. Ltd. Şti. bünyesinde bulunan M/V Petra F isimli gemi üzerinde incelenmiştir. M/V Petra F isimli geminin resmi Şekil 5.1'de, gemi bilgileri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. MDO yakıtı tüketen bu geminin seçilme nedeni, hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalarda, dizel yakıt ile çalışan motorların kullanılmış olmasıdır. Denizcilik sektöründe, hidrojenin makinelerde kullanımı üzerine araştırmalar yapılmadığından, HFO yakıtı ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmada, üretilen alkalin elektroliz sistemlerinden gemi ana makinesinin kapasitesine uygun olanı seçilecek, makine dairesine yerleşimi ve ana makineye bağlantısı gösterilecek ve geminin 2012-2013 yılları arasındaki 1 yıllık seyri boyunca elde edilecek yakıt tasarrufu ve emisyon azalması tespit edilecektir.



Şekil 5.1 : M/V Petra F resim [54].

Çizelge 5.2 : M/V Petra F gemi bilgileri.

Gemi İsmi	Gemi Tipi	Çağrı İşareti	IMO Numarası	Sefer Tipi
M/V Petra F	Karışık yük gemisi	3FPX3	8500408	Tüm dünya
L.O.A	L.B.P	Genişlik	Derinlik	DWT
81,19 m	77,40 m	11,30 m	5,4 m	2.130 mt
GRT	NRT	Bayrak Devleti	Bağlama Limanı	Yapımcı & Yapım Yeri
1.567 mt	703 mt	Panama	Panama	Arminiuswerft GmbH, Badenwerder, Almanya
Yapım Tarihi	Yüklü Maksimum Hız	Balastlı Maksimum Hız	Ana Makine Bilgileri & Yakıt Tüketimi	Yardımcı Makine Bilgileri & Yakıt Tüketimi
27.12.1985	9 knot	10 knot	Wartsila Vasa Diesel 6R22MD 908/268 devir 595 kw & 2,5 mt	1 MAN D2566 MLE 2 DEUTZ KHD F4 L 912 & 0,2 mt

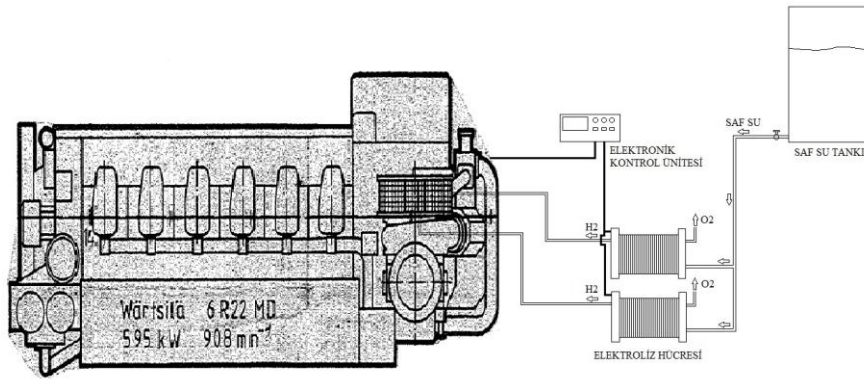
Alkalın elektroliz sistemleri araştırıldığında, sistem kapasitelerinin makine toplam silindir hacimlerine göre sınıflandırıldığı görülmüştür. Piyasadaki alkalın elektroliz sistemleri, 1200 cc'ye kadar, 1200 cc'den 4300 cc'ye kadar, 4300 cc'den 7900 cc'ye kadar, 7900 cc'den 12900 cc'ye kadar, 12900 cc'den 16000 cc'ye kadar, 16000 cc'den 32000 cc'ye kadar ve 32000 cc üstü olarak kapasiteler bulunmaktadır [55]. M/V Petra F gemisinin ana makine bir silindirinin hacmi 9,12 lt'dir [56]. Ana makinenin toplam hacmi 54720 cc'dir. Bu neden ile kapasitenin yeterli olması için 6 lt/dk H₂ gazı üreten 32000 cc üstü alkalın elektroliz sisteminden 2 adet kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Sistemin elektroliz hücresi Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Alkalın elektroliz hücresi [57].

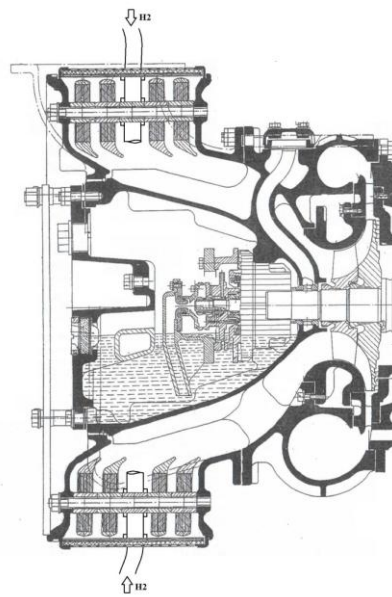
Özellikler

Ölçüler: 220 x 140 x 375 mm 316L paslanmaz çelik 61 adet plaka H ₂ üretimi: 6,0 lt/dk

Sistemin elektroliz hücresinde üretilen H_2 gazı hortum vasıtası ile ana makine türbininin emme tarafından ana makineye verilir. Hortumun, türbin emme tarafına bağlantısı emiş fitresinin olduğu bölüme nozul bağlantısı ile yapılabilecektir. Elektroliz hücresinde üretilen O_2 gazı ortama verilir. H_2 gazı üretilmesinde kullanılacak olan saf su, bir tanktan gravite ile sağlanacaktır. Saf su, tek başına iletken olmadığından, kimyasal reaksiyonu oluşturmak ve iletkenliği sağlamak için oluşacak kimyasal reaksiyonlar sonucunda bozulmadan reaksiyondan çıkacak olan KOH bileşiği saf suya katılacaktır Sistemde üretilen H_2 miktarı elektronik kontrol ünitesi ile manuel veya makine yüküne göre ayarlanabilecektir. Sistemin şeması Şekil 5.2'de, sistemin türbine bağlantısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Elektroliz sistem şeması. Ana makine çizimi alıntıdır [58].

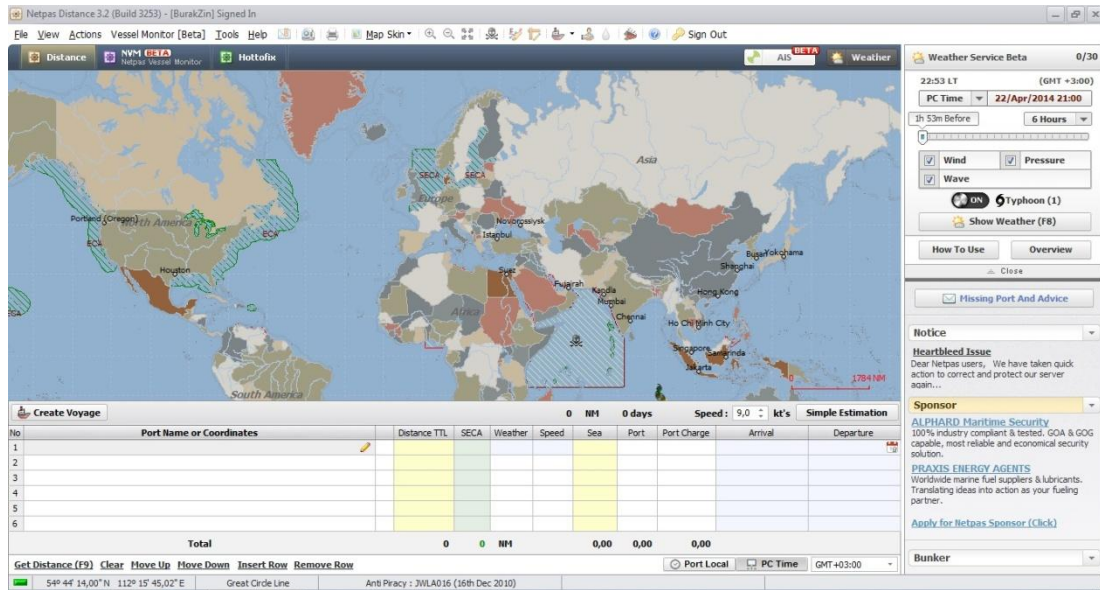


Şekil 5.3 : Sistemin türbin emme tarafına bağlantısı [59].

This technical schematic illustrates the layout of a ship's engine room. The central feature is a large Wärtsilä 6 R22 MD engine (595 kW, 908 mm). To its left is a 245 kVA generator and a 60 kVA generator, both with associated starter batteries. The room is filled with various tanks: Trinkwassertank (drinking water), Fäkalientank (waste water), Lecköltank (oil spill), Gasöl-Tages- and -Vorratstank (daily and storage fuel oil), and Schmieröl-Vorratstank (lubricating oil storage). Pumps include the Fäkalienpumpe, Seewasserpumpe, and various fuel and oil pumps. A complex piping system with numerous valves and connections is shown. Other components include a Wellengenerator, Unterseilungsgetriebe, and a Bilgenentläser. The diagram is labeled with various German terms and includes a scale bar at the bottom left.

51

M/V Petra F isimli geminin, 2012 yılında yapmış olduğu sefer gün sayısı, Netpas Distance 3.2 programı kullanılarak, uğrak limanları arasındaki mesafe, geminin yüklü hızı, 9 knot, baz alınarak hesaplanmıştır. Netpas Distance 3.2 programı kendini sürekli güncelleyerek, kişilere en doğru şekilde sefer hesaplamaları yapmalarını sağlayan sefer hesabı programıdır. Şekil 5.5'te gösterilen ara yüze geminin kalkış - varış limanları ve gemi hızı girilerek programın sefer rotasını çizmesi ve sefer gün sayısını belirlemesi sağlanmaktadır. Bu program ile yapılan hesaplamalar sonucunda M/V Petra F gemisine ait 2012 yılı sefer gün sayısı 141,81 gün olarak bulunmuştur. Gün sayısına manevra zamanları dahil edilmemiş ve hesaplamalara katılmamıştır. Bulunan gün sayısı referans alınarak tükettiği yakıt miktarı ve yakıt masrafı, sistemin tüketeceği elektrik miktarı, sistemin tüketeceği saf su miktarı, sistem sayesinde elde edilebilecek yakıt tasarruf miktarı, geminin ürettiği emisyon miktarı ve sistem sayesinde elde edilecek emisyon azalma miktarları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara yardımcı makinelerin tükettiği yakıt miktarı dahil edilmemiştir.



Şekil 5.5 : Netpas Distance 3.2 program ara yüzü [60].

5.2 Geminin Tükettiği Yakıt Miktarı ve Yakıt Masrafı

Geminin tüketmiş olduğu yakıt miktarı, (5.1) nolu formülde, ana makinenin günlük yakıt tüketimi ve geminin seyir günü sayısı girilerek hesaplanmaktadır. Sonuç olarak 354,53 mt yakıt tüketimi bulunmuştur.

$$F_{MEY} = F_{MED} \cdot V \quad (5.1)$$

Formülde F_{MEY} , ton bazında yıllık yakıt tüketimini, F_{MED} , ton bazında günlük yakıt tüketimini, V , seyir günü sayısını belirtmektedir.

Yakıt masrafını hesaplamak için 2012 yılına ait aylık en düşük ve en yüksek MDO fiyatları alınmış ve (5.2) nolu formüle yerleştirilerek, aylık ortalama yakıt fiyatı değerleri elde edilmiştir [61]. Daha sonra (5.3) nolu formül uygulanarak ortalama yıllık yakıt fiyatı 921 \$/mt olarak bulunmuştur.

$$FP_{Ma} = \left(\frac{FP_{Mm} + FP_{Ml}}{2} \right) \quad (5.2)$$

$$FP_Y = \frac{\sum FP_{Ma}}{12} \quad (5.3)$$

Formüllerde FP_{Mm} , M ayındaki ton bazında en yüksek yakıt fiyatını, FP_{Ml} , M ayındaki ton bazında en düşük yakıt fiyatını, FP_{Ma} , M ayındaki ortalama yakıt fiyatını, FP_Y , ton bazında yıllık ortalama yakıt fiyatını belirtmektedir.

Geminin 2012 yılındaki yakıt masrafı, (5.4) nolu formülde geminin yıllık yakıt tüketimi ve yıllık ortalama yakıt fiyatı yerlerine koyularak hesaplanmış ve 326.522 \$ olarak bulunmuştur.

$$FE_Y = F_{MEY} \cdot FP_Y \quad (5.4)$$

Formülde, FE_Y , geminin yıllık yakıt masrafını belirtmektedir.

5.3 Sistemin Tüketeceği Elektrik Miktarı

İyi hazırlanmış bir elektroliz sistemi ile, %80-94 arasında verim sağlanabilir, bu durumda 1 gr H_2 gazının yanma enerjisi 130 kj olduğundan, elektroliz ile elde edilebilmesi için 1/0,94 katı, 138,3 kj enerji gereklidir [62]. H_2 gazının 1 molü 2 gr ve teorik olarak 1 mol H_2 gazının hacmi normal şartlarda 22,4 lt'dir. M/V Petra F gemisinin ana makinesine uygun elektroliz sisteminin kapasitesi 2 adet, dakikada 6 lt H_2 gazı üretimi olacağından, sistem dakikada 1,07 gr H_2 gazı üretmiş olacaktır. 1 gr H_2 gazı üretimi için gerekli enerji 138,3 kj ise 1,07 gr H_2 gazı üretimi için gerekli enerji 147,98 kj yani 41,1 watt/dk olarak bulunmuştur. Sistemin kullanacağı elektrik miktarı saatte 2,46 kw, günde 59,04 kw, seyir gün sayısı ile çarpıldığında geminin 1 yıllık seyri boyunca 348,85 kw olacaktır.

5.4 Sistemin Tüketeceği Saf Su Miktarı

Elektroliz işleminin kimyasal reaksiyonu olarak belirtilen (5.5) ile belirtilmiş formüle bakılacak olursa 1 mol H₂O karşılığında 1 mol H₂ gazı açığa çıktığı görülmektedir.



H atomunun ağırlığı 1 gr, O atomunun ağırlığı 16 gr olduğundan 1 mol, yani 18 gr, H₂O'ya karşılık; 1 mol, yani 2 gr H₂ gazı açığa çıkmaktadır. M/V Petra F gemisinin ana makinesine uygulanacak olan elektroliz sistemi ile dakikada 1,07 gr H₂ gazı üretileceğinden; 1 mol, 2 gr, H₂ gazı ile oranlandığında 0,54 mol/dk üretim olacaktır. Bu durumda 0,54 mol/dk H₂O reaksiyona girmiş olur. 0,54 mol/dk H₂O, 1 mol H₂O'nun gram ağırlığı ile oranlandığında 9,74 gr/dk H₂O kullanılmış olur. Saatte 583,2 gr H₂O, günde 13.996,8 gr yani yaklaşık 14 kg H₂O tüketilecektir. Geminin seyir günü ile çarpıldığında 1.985,34 kg, yani 1,98 ton H₂O tüketilir.

Saf suyun 1 lt'sinin piyasadaki fiyatı ortalama 2 tl kabul edilirse, sistemin kullanacağı saf suyun maliyeti 3.960 tl olacaktır.

Saf su ile beraber iletkenliği sağlaması için KOH bileşiği de saf su tankına eklenecektir. En iyi çözelti oranının, KOH bileşiğinin, çözeltinin toplam kütlesinin %25-30'unu oluşturduğu durumda olduğu belirtilmiştir [63,64]. Gemi üzerinde saf suyun depolanacağı 1 tonluk tank koyulur ise, bu durumda 750 lt suya 250 kg KOH bileşiği oranı olacaktır. KOH bileşiği elektroliz reaksiyonlarından bozulmadan çıkacağından bir kere eklendikten sonra saf suyun içinde sürekli kalacaktır.

KOH bileşiğinin 1 kg'su piyasada yaklaşık 14,28 avrodur [65]. Sistemin ilk kullanımında eklenecek ve sürekli kullanılmaya devam edilecek KOH bileşiğinin maliyeti 3.570 avro olacaktır.

5.5 Sistem Sayesinde Elde Edilebilecek Yakıt Tasarruf Miktarı

Yakıt tasarruf miktarı aralığını belirleyebilmek için, yapılan literatür taraması sonucunda incelenilen çalışmalardan dört adet yakıt tasarruf oranı, kendi yaptığım çalışmadan elde ettiğim deneyimden de yakıt tasarruf oranı alınmıştır. Toplanan bu veriler Çizelge 5.4'te belirtilerek tablo oluşturulmuştur.

Çizelge 5.4 : Alkalın elektroliz yöntemi ve tüpten hidrojen beslemesi ile çalışmalarda elde edilen yakıt tasarruf oranları.

Çalışmayı Yapan Araştırmacılar	Yakıt Tasarrufu Oranı	Çalışma Yılı
Wang ve arkadaşları	% 2,79	2011
Bari ve Mohammed	% 6,73	2010
Saravanan ve arkadaşları	% 11,03	2008
Zincir	% 12,53	2014
Yılmaz	% 14,00	2010

Elde edilen verilerden, Wang ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneyde, kullandıkları dizel motora 10 lt/dk'dan 70 lt/dk kapasiteye kadar H₂ gazı göndermiş ve her bir kapasite için farklı yakıt tasarruf değerleri elde etmişlerdir [47]. Çalışmamdaki kapasiteye yakın olduğu için 10 lt/dk H₂ gazı kapasitesindeki durum baz alınarak, % 2,79 oranındaki yakıt tasarruf değeri tabloya eklenmek üzere seçilmiştir. Ancak diğer değerlerin birbirine daha yakın olması, yapılacak çalışmalar sonucunda anlamlı değerler elde edilebilmesi için bu oran hesaplamalarda kullanılmamıştır.

Bari ve Mohammed Esmail'in yapmış olduğu çalışmada, dizel motora 19 kw, 22 kw ve 28 kw yükler yüklenmiş ve 19 kw yükte % 6,1 H₂/O₂ karışımı verilerek % 7,3 yakıt tasarrufu, 22 kw yükte % 6 H₂/O₂ karışımı verilerek % 8,1 yakıt tasarrufu ve 28 kw yükte % 4,8 H₂/O₂ karışımı verilerek % 4,8 yakıt tasarrufu elde etmişlerdir [46]. Yapılacak hesaplama için tüm yüklerdeki yakıt tasarruf değerlerinin ortalaması alınıp, % 6,73 bulunarak hesaplamalar için kullanılabileceği belirlenmiştir.

Saravanan ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneyde, vuruntunun gerçekleşmediği % 30 H₂ gazı zenginleştirmesi durumunda enerji tüketimi 14,5 MJ/kwh'den 12,9 MJ/kwh'e, % 11,03 oranında düşmüştür [31]. Bu çalışmadaki H₂ gazı beslemesi hidrojen tüpünden sağlanmış alkalın elektroliz sistemi kullanılmamıştır. Bu oran hidrojen tüpünden elde edilen H₂ gazı ile elde edildiğinden gemide kullanımı incelenecek olan alkalın elektroliz hücresi ile karşılaştırılması yapılamayacağından bu değer kullanılması uygun bulunmamıştır.

Tez çalışmamda, 1,5 lt dizel 2012 model Nissan Qashqai üzerinde yapılan şehir içi ve şehirler arası yollardaki testlerin ortalaması sonucu % 12,53 oranında yakıt tasarrufu elde edilmiştir. Deneyimlediğimiz bir çalışma olduğundan, hesaplamalarda kullanılacak yakıt tasarrufu değerlerine eklenmiştir.

Yılmaz'ın hazırlamış olduğu yüksek lisans tezinde, kullanmış olduğu dizel motor üzerine 5 lt/dk H₂ gazı üretme kapasitesine sahip elektroliz sistemini bağlamış ve sonucunda % 14,00 oranında yakıt tasarrufu elde etmiştir [42]. Bu oranın hesaplamalar için kullanılması planlanmıştır.

Seçilen yakıt tasarruf değerleri, test motorlarında ve kara araçlarında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir; gemi üzerinde uygulanacak bir sistemin yakıt tasarrufuna etkileri, yakıt tasarrufu sonuçlarını etkileyebilecek çeşitli faktörler bulunduğundan aynı oranlarda olmayabilir. Bu faktörlerden bazıları, hidrojen gazı beslemesinin bağlanacağı türbinin egzoz tarafındaki zaman ile oluşan kirlenmenin türbin performansını düşürmesi, buna bağlı olarak makineye emilen hidrojen gazında azalma olması; makine dairesindeki sıcaklık değişimlerinin, makine dairesi sıcakken hidrojen üretimine olumlu, soğukken olumsuz yönde etki etmesi; sistemin en önemli unsuru olan elektrik beslemesinin, gemi elektriğindeki voltaj oynamalarından etkilenmesi ve elektroliz hücresinin hidrojen üretme kapasitesinde düşüşün meydana gelmesidir. Ancak bu faktörlerin sisteme ne kadar etki edeceği bilinmediğinden, tasarruf oranları kara uygulamalarındaki şekilde alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

Kullanılabilecek değerlerden % 6,73, en az; % 12,53, orta; % 14,00, en fazla olarak sınıflandırılarak, geminin sistem sayesinde elde edebileceği en az ve en fazla sınırları belirlenmiş, ek olarak ortalama bir değer de orta ile adlandırılmıştır. Alınan değerler Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Seçilen yakıt tasarruf oranlarının adlandırılması.

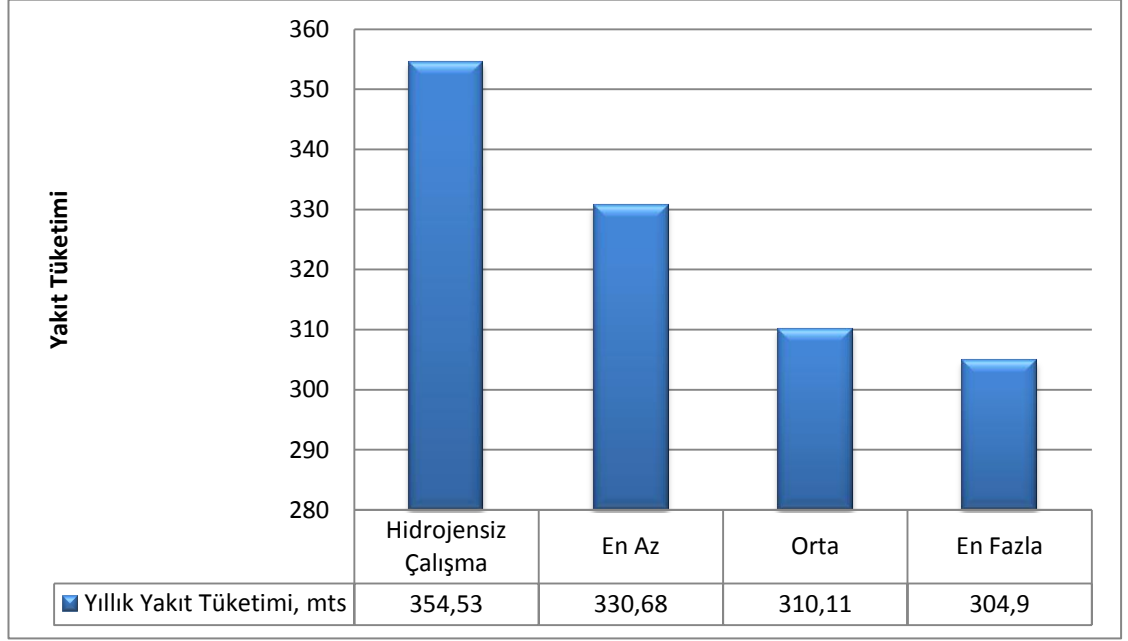
En Az	Orta	En Fazla
% 6,73	% 12,53	% 14,00

Seçilen tasarruf oranlarına göre yıllık yakıt tasarrufu miktarlarını ve maliyetlerdeki azalmayı hesaplamak için formül (5.6) kullanılmıştır.

$$F_{ME_{YFS}} = F_{ME_Y} \cdot R_{FS} \quad (5.6)$$

Formülde, F_{ME_Y} ana makinenin ton bazında yıllık yakıt tüketimini, R_{FS} yakıt tasarruf oranını, $F_{ME_{YFS}}$ ana makinenin ton bazında yıllık yakıt tasarrufu miktarını belirtmektedir.

Formül (5.6) ile yapılan hesaplamalarda, yıllık yakıt tüketimi ve yakıt tasarruf oranları yerlerine koyulduğunda, alkalın elektroliz sistemi ile yıllık en az seviyede yakıt tasarrufu elde edildiğinde, 23,85 mt, orta seviyede yakıt tasarrufu elde edildiğinde 44,42 mt, en fazla seviyede yakıt tasarrufu elde edildiğinde 49,63 mt yakıt kazancı bulunmuştur. Hesaplamalar sonucunda, en az, orta ve en fazla seviyelerine göre elde edilen yıllık yakıt tüketimleri Şekil 5.6 nolu grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Yıllık yakıt tüketim miktarları karşılaştırması.

5.6 Geminin Ürettiği Emisyon Miktarı

Geminin seyir halindeyken üreteceği emisyon miktarları, kullanılan yakıt miktarına ve emisyon faktörlerine bağlı olarak formül (5.7) ile hesaplanabilmektedir [66,67].

$$E_{ijk} = B_{jk} \cdot F_{ijk} \quad (5.7)$$

Bu formülde i, kirletici tipini; j, yakıt tipini; k, ana makine tipini; E_{ijk} , j yakıtını kullanan, k tipi bir ana makineye sahip geminin toplam i tipi toplam emisyonunu; B_{jk} , k tipi bir ana makineye sahip geminin yaktığı toplam j tipi yakıt miktarını; F_{ijk} , kirleticiler için emisyon faktörünü belirtmektedir. Emisyon faktörleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Emisyon hesaplamaları esnasında orta devirli makinelere ait emisyon faktörleri baz alınmıştır.

Hesaplamalar sonucunda, geminin 2012 yılındaki toplam seferleri sonucunda 20.208,21 kg NO_x, 19.144,62 kg SO₂, 2.623,52 kg CO, 1.123.860,1 kg CO₂ ve 425,43 kg PM emisyonu açığa çıktığı bulunmuştur.

Çizelge 5.6: Emisyon faktörleri, kg/ton - yakıt [66,67,68,69].

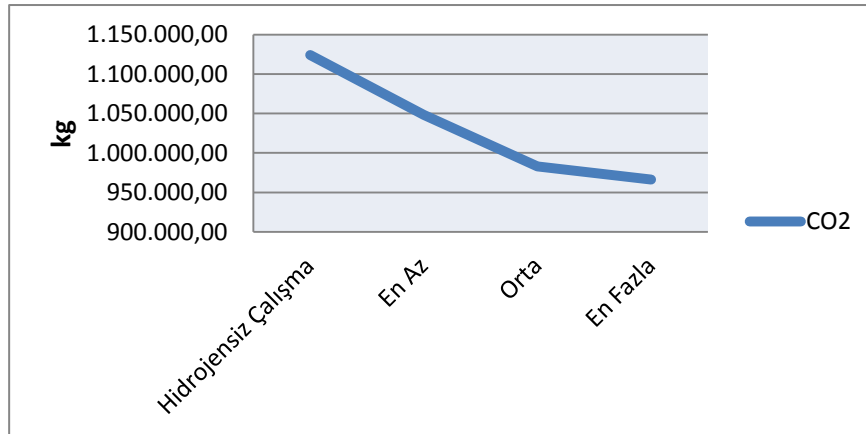
	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	PM
Yüksek Devirli Makineler	57	10	7,4	3.170	1,2
Orta Devirli Makineler	57	54	7,4	3.170	1,2
Düşük Devirli Makineler	87	54	7,4	3.170	7,6

Ana makineye hidrojen gazının verilmesi ile beraber fosil yakıt kullanımında azalma olacağından, emisyon miktarlarında da azalma olacaktır. Literatür çalışmalarından seçilen yakıt tasarrufu oranları ile elde edilen emisyon azalması miktarları Çizelge 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7: Yakıt tasarruf adlandırmasına göre emisyon azalma miktarları, kg.

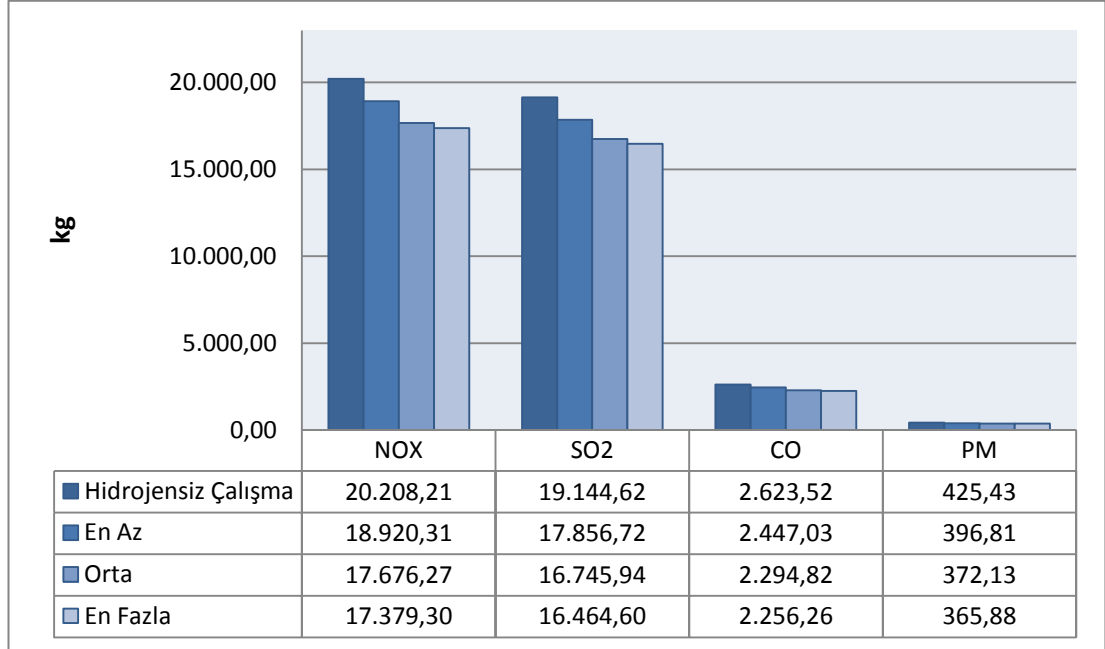
	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	PM
En Az	1.359,45	1.287,90	176,49	75.604,50	28,62
Orta	2.531,94	2.398,68	328,70	140.811,40	53,30
En Fazla	2.828,91	2.680,02	367,26	157.327,10	59,55

CO₂ emisyonu değerlerine bakıldığında hidrojenli çalışma durumunda senelik 1.123.860,1 kg açığa çıkarken, hidrojenli çalışmada en az elde edilecek verim değerinde 1.048.255,60 kg, orta derecede elde edilecek verim değerinde 983.048,70 kg, en fazla elde edilecek verim değerinde 966.533,00 kg emisyon açığa çıkacaktır. CO₂ azalmasına ait azalma grafiği Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre yıllık CO₂ emisyonu miktarı.

Uygulanan tasarruflar sonucunda, yakıt kullanımındaki azalmaya bağlı olarak oluşacak yıllık NO_x, SO₂, CO ve PM emisyonları Şekil 5.8'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre yıllık NO_x, SO₂, CO ve PM emisyon miktarları.

Elde edilen emisyon değerleri incelendiğinde, en dikkat çekici sonuçlar CO₂ emisyonundaki azalmada gözlemlenmiştir. Hidrojen kullanımının sağladığı yakıt tasarruf oranı artışına bağlı olarak CO₂ emisyonları da azalmıştır.

5.7 Maliyet Analizi

Yakıt tasarrufu miktarlarına göre yeni yakıt maliyetlerini hesaplayabilmek için formül (5.4)'te F_{ME_Y} , ton bazında yıllık yakıt tüketimi yerine, formül (5.6) ile hesaplanan $F_{ME_{YFS}}$, ana makinenin ton bazında yıllık yakıt tasarrufu miktarı koyularak (5.8) nolu formül oluşturulur. Daha sonra (5.9) nolu formül oluşturularak FE_{RFS} , yakıt tasarrufu oranına göre yıllık yeni yakıt maliyetleri hesaplanmıştır.

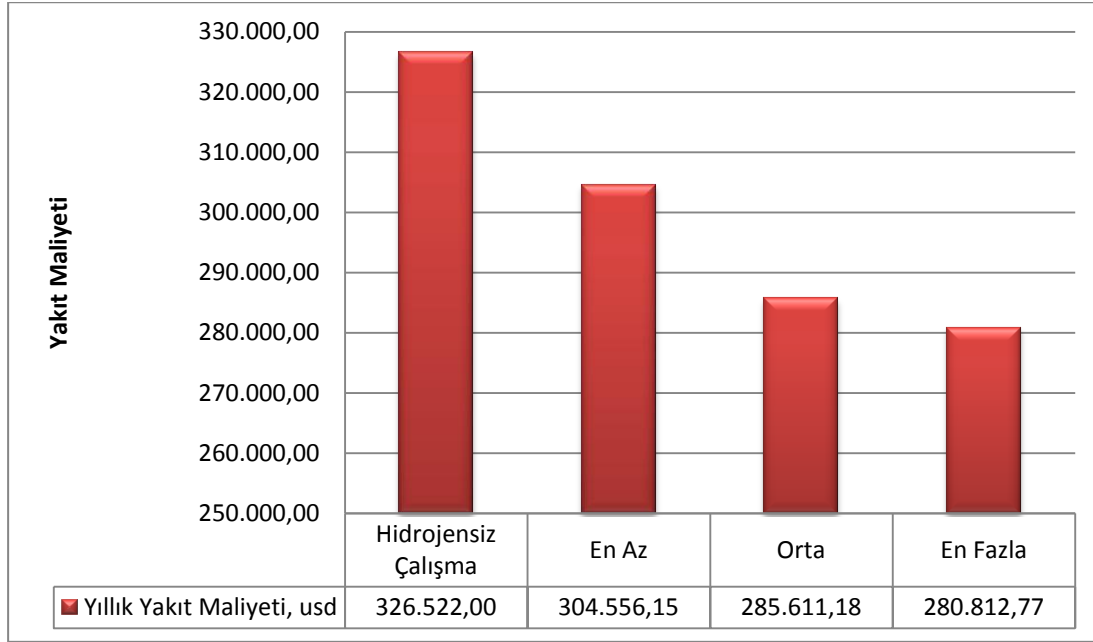
$$FE_Y = F_{ME_Y} \cdot FP_Y \quad (5.4)$$

$$FE_{FS} = F_{ME_{YFS}} \cdot FP_Y \quad (5.8)$$

$$FE_{RFS} = FE_Y - FE_{FS} \quad (5.9)$$

Hesaplamalar sonucunda, en az seviyede yakıt tasarrufunda 21.965,85 \$ maliyet azalması, orta seviyede yakıt tasarrufunda 40.910,82 \$ maliyet azalması, en fazla seviyede yakıt tasarrufunda 45.709,23 \$ maliyet azalması sağlanmıştır.

Çalışmada kullanılan yakıt tasarrufu oranlarına göre geminin senelik yakıt masrafları grafiği Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Yakıt tasarrufu oranlarına göre geminin yıllık yakıt maliyetleri.

Sistem maliyetlerinde, kurulum ve işletim maliyetleri bulunmaktadır. Kurulum maliyetlerinde elektroliz hücre sisteminin fiyatı 2.650 avro olarak belirlenmiştir [57]. Gemide kullanılmak üzere iki adet alınması gerektiğinden 5.300 avro, yani 7.309,76 usd maliyet oluşacaktır. İşletim maliyetlerinde, saf su gideri 3.960 tl, 1768,64 usd, saf su içine katılacak olan KOH bileşiğinin maliyeti 3.570 avro, 4.332,89 usd olarak hesaplanmıştır. Sistemin toplam maliyeti 14.002,14 usd olarak hesaplanmıştır. Maliyetler, Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Sistemin kullanılması sonucu elde edilen yakıt masraflarındaki azalma ile sistemin toplam maliyeti karşılaştırıldığında, en az yakıt tasarrufu durumunda senelik 21.965,85 usd, aylık 1.830,49 usd yakıt masrafında azalmaya karşılık, 12.233,5 usd sistem ilk kurulum masrafı, 1.768,64 usd senelik (147,39 usd aylık) işletim maliyetleri olacaktır.

Çizelge 5.8 : Elektroliz hücre sisteminin toplam maliyetleri.

	Sistem Kurulum Maliyetleri	Sistem İşletim Maliyetleri
Alkalın Elektroliz Sistemi (2 adet)	7.309,76 usd ⁽¹⁾	-
Saf Su Maliyeti	-	1.768,64 usd ⁽²⁾
KOH Maliyeti	4.923,74 usd ⁽¹⁾	-
Toplam Maliyet	12.233,50 usd	1.768,64 usd

(1) Merkez Bankası 21 Mart 2014 Euro/usd paritesi 1/1,3792 olarak alınmıştır. (2) Merkez Bankası 21 Mart 2014 TL/usd paritesi 2,239/1 olarak alınmıştır [70].

Formül (5.10) kullanılarak hesaplama yapıldığında, en az yakıt tasarrufu durumunda 7,2 ay sonra sistem kendini amorti etmiş ve kar sağlamaya başlamış olacaktır. Aynı şekilde orta yakıt tasarrufu durumunda senelik 40.910,82 usd, aylık 3.409,23 usd yakıt masrafında azalma, %14 yakıt tasarrufu durumunda senelik 45.709,23 usd, aylık 3.809,10 usd yakıt masrafında azalma oluşacaktır. Hesaplamalar yapıldığında orta yakıt tasarrufunda 3,8 ayda; %14 yakıt tasarrufunda 3,3 ayda sistem kendini amorti edip kar sağlamaya başlamış olacaktır.

$$\text{İlk Kurulum} + (\text{Aylık işletme gideri. Ay}) = \text{Yakıt masrafındaki aylık kazanç. Ay} \quad (5.10)$$

6. SONUÇ

Denizcilik sektöründe gemilerden kaynaklı emisyon miktarlarını azaltmaya yönelik SCR, EGR, SO_x filtreleme sistemleri gibi sistemler olmasına karşılık, bu sistemlerin ilk kurulum ve işletim maliyetleri yüksek, boyutları nedeni ile her gemiye uygulanabilirliği zor ve yakıt tüketimine az da olsa negatif etkileri bulunmaktadır. Yakıt maliyetlerini azaltacak çift yakıt sistemlerinden, LNG yakıt sistemleri gibi sistemler yaygınlaştırılmaya çalışılsa da bu sistemin de maliyeti yüksek, uzun seyirler için kapasitesi yetersiz ve gemide uygulanacak güvenlik önlemleri çok fazladır.

Denizcilik üzerine yapılan araştırmalarda ve denizcilik sektöründe, hem emisyon değerlerini azaltan hem de yakıt tasarrufu sağlayan sistem eksikliği görüldüğünden, bu tez çalışmasında karada birçok uygulaması olan alkalın elektroliz sisteminin, bir gemi ana makinesi üzerine uygulanabilme şartları, sistem esasları ve bu sistemin ana makine yakıt tüketimine ve emisyon değerlerine etkilerinin araştırılması yapılmıştır. Çalışma için M/V Petra F isimli, 4 zamanlı MDO yakıtı kullanan Wartsila Vasa 6R22MD ana makineye sahip gemi ele alınmış, geminin 2012 yılındaki uğrak limanları çıkarılmış, seyir rotaları belirlenmiş ve seyir gün sayısı hesaplanmıştır. Alkalın elektroliz hücre sisteminin, sistem şeması, ana makineye bağlantısı ve makine dairesi yerleşimi gösterilmiştir. Literatür taraması sonucu elde edilen dört ayrı çalışma ve araç üzerinde yapılan çalışma ile tablo oluşturulmuş, çalışmalar değerlendirilmiş, içlerinden üç çalışma seçilmiştir. Seçilen çalışmalar sonucunda % 6,73, % 12,53 ve %14 yakıt tasarrufu durumları ele alınmış ve en az, orta, en fazla olarak adlandırılmıştır. Seçilen geminin ana makine yakıt tüketimi ve bu tüketime bağlı emisyon değerleri adlandırılan bu üç oran ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda gemi, sistemi kullanmadan çalışırsa, 354,53 mt yakıt tüketirken, sistem kullanılıp elde edebileceği en az yakıt tasarrufunda 330,68 mt, orta yakıt tasarrufunda 310,11 mt ve en fazla yakıt tasarrufunda 304,9 mt yakıt tüketileceği belirlenmiştir.

Yakıt tüketimlerine bağlı olarak, NO_x emisyonları, hidrojeniz normal çalışmada 20,20 ton, en az sınırında 18,92 ton, orta seviyesinde 17,67 ton ve en fazla sınırında

17,37 ton olarak; SO₂ emisyonları, hidrojeniz normal çalışmada 19,14 ton, en az sınırında 17,85 ton, orta seviyede 16,74 ton ve en fazla sınırında 16,46 ton olarak; CO emisyonları, hidrojeniz normal çalışmada 2,62 ton, en az sınırında 2,44 ton, orta seviyede 2,29 ton ve en fazla sınırında 2,25 ton olarak; PM emisyonları, hidrojeniz normal çalışmada 0,42 ton, en az sınırında 0,39 ton, orta seviyede 0,37 ton ve en fazla sınırında 0,36 ton olarak; CO₂ emisyonları, hidrojeniz normal çalışmada 1.123,86 ton, en az sınırında 1.048,25 ton, orta seviyede 983,04 ton ve en fazla sınırında 966,53 ton olarak hesaplanmıştır. CO₂ emisyonuna bağlı enerji verimliliği konusunun gündemde olduğu günümüzde, alkaliz elektroliz sistemi, yeni inşa gemilerde, geminin EEDI hesaplama formülünde, verimlilik teknolojileri altında adlandırılabilir. EEDI formülünde, ana makine emisyonları, yardımcı makine emisyonları toplanıp, varsa verimlilik teknolojileri çıkarılarak, taşıma içine bölünerek dizayn indeksi bulunmaktadır. Bu sistem, formüldeki verimlilik teknolojileri bölümünde, ana makine yakıt tüketimini azaltarak, EEDI'in azalmasını sağlamaktadır. EEDI'ne ek olarak, mevcut gemilerde de SEEMP uygulamasında gemiye özel enerji verimliliği uygulamalarından biri olarak kullanılabilir ve mevcut gemilerde CO₂ emisyonları kontrol altına alınmış olacaktır.

2008 yılında revize edilmiş, MARPOL Ek-VI Madde 4 kısmında Denklik konusundan bahsedilmektedir. Bu bölüme göre ye bayrak devletleri, Madde 13 ve 14'te belirtilen emisyonları azaltacak ve standartları sağlayacak, ekipman, aparat, yeni prosedürler ve alternatif yakıtlara izin verebilecektir [5]. Bu madde, alkaliz elektroliz sisteminin, bir NO_x ve SO_x azaltma yöntemi olarak da gemilerde kullanılabilmesinin nn apmaktadır.

Sistem ilk kurulum ve işletim masrafları göz önüne alınarak maliyet analizi yapıldığında, en az yakıt tasarrufu durumunda 7,2 ayda; orta yakıt tasarrufu durumunda 3,8 ayda; en fazla yakıt tasarrufu durumunda 3,3 ayda sistemin kendini amorti edip kar sağlamaya başladığı belirlenmiştir.

Elde edilen bu veriler göstermiştir ki, kara tesislerinde ve araçlarında kullanımı olan alkaliz elektroliz hücre sisteminin, denizcilikte kullanılan yakıt miktarının az bir oranını oluşturan, MDO yakıtı kullanan bir gemi üzerinde kullanılabilirle şartları incelendiğinde, gözle görülür yakıt masrafı düşüşü ve emisyon oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bu neden ile alkaliz elektroliz hücre sisteminin denizcilik sektöründe de kullanılmaya başlanması, özellikle gemiler tarafından daha yoğun

olarak kullanılan HFO yakıtı üzerinde de çalışmalar yapılması gerekmektedir. Kullanımı daha fazla ve MDO yakıtına göre daha kalın bir yakıt olan HFO yakıtı ile dünya genelinde daha çarpıcı emisyon azalma oranları ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Çalışmalar sonucunda, HFO yakıtı ile çalışan gemiler üzerinde de uygulanabilirliği kabul edilirse, dünya denizlerinde seyir yapan çoğu gemiye uygulanabilecek bu sistem, her gemiye uygulanabilecek yeni bir emisyon azaltma ve enerji verimliliği sağlama sistemi olarak kabul görebilecektir. Sonraki çalışmalarda, MDO yakıtı ile çalışan deniz tipi motorlar üzerine alkalın elektroliz sistemi bağlanarak, makine performans değerlerinin ölçülmesi, bu sistemin makine emisyon değerleri üzerine etkilerinin gözlemlenmesi gerekmektedir. Ayrıca HFO yakıtı ile çalışabilecek motorlar üzerinde de bu sistem uygulanarak, hidrojen - HFO yakıtı karışımının yanma özellikleri, sistemin HFO yakıtı ile çalışan motorda sağladığı yakıt tüketimindeki azalma ve emisyon oranlarındaki değişim incelenmeli, HFO yakıtı ile çalışan makinelerde uygulanabilirliği belirlenip, gemilerde uygulanabilmesi için çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kyoto Protokolü.** (t.y). Wikipedia. Alındığı tarih: 20.12.2013, adres: https://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_protokol%C3%BC
- [2] **United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).** (2008), Kyoto Protocol Reference Manual, On Accounting of Emissions and Assigned Amount.
- [3] **International Maritime Organisation (IMO).** 2009. IMO GHG Study 2009.
- [4] **Deniz, C. , Kılıç, A. , Cıvkaroğlu, G.** 8 January 2010. Estimation of Shipping Emissions in Candarli Gulf, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, (2010)171:219-228
- [5] **Det Norske Veritas.** (t.y), MARPOL 73/78 Annex VI Regulations For The Prevention of Air Pollution From Ships, Technical and Operational Implications.
- [6] **International Maritime Organisation (IMO).** Resolution MEPC.177(58), Annex 14, Adopted on 10 October 2008, Amendments to The Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides From Marine Diesel Engines (NO_x Technical Code)
- [7] **NO_x Emissions.** (t.y.). Marine Wiki. Alındığı tarih: 06.01.2014, adres: http://marinewiki.org/index.php/Allowable_NOx_Emissions
- [8] **International: IMO Marine Engine Regulations.** (t.y). Diesel Net. Alındığı tarih: 06.01.2014, adres: <http://www.dieselnets.com/standards/inter/imo.php>
- [9] **ECA Haritası.** (t.y). DNV GL Blog. Alındığı tarih: 14.04.2014, adres: <http://www.blogs.dnvgl.com/lng/2011/02/lng-for-greener-shipping-in-north-america/>
- [10] **Official Journal of The European Union.** 25.06.2009. Directive 1999/32/EC of 26 April 1999 Relating to a Reduction In The Sulphur Content of Certain Liquid Fuels and Amending Directive 93/12/EEC
- [11] **Official Journal of The European Union.** 22.07.2005. Directive 2005/33/EC of The European Parliament and of The Council of 6 July 2005 Amending Directive 1992/32/EC
- [12] **Lloyd's Register.** May 2012. Implementing The Energy Efficiency Design Index (EEDI), Guidance For Owners, Operators and Shipyards
- [13] **International Maritime Organisation (IMO).** Resolution MEPC.203(62), Annex 19, Adopted On 15 July 2011, Amendments to The Annex Of The Protocol of 1997 to Amend The International Convention For The Prevention Of Pollution From Ships, 1973, As Modified By The

Protocol of 1978 Relating Thereto (Inclusion of Regulations On Energy Efficiency for Ships in MARPOL Annex VI)

- [14] **American Bureau of Shipping (ABS).** May 2011. Energy Efficiency for Ships, Improving Efficiency by Design, TX 05/11 1000 11140
- [15] **Hun-sung, J.** 14 December 2012. Korean Register of Shipping, Technical Information. No.2012-IMO-14
- [16] **Kristensen, H. O.** September 2012. Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines, Project no.2010-56, Emissionsbeslutingsstottesystem Work Package 2, Report no.05, Technical University of Denmark
- [17] **MAN Diesel.** (t.y). Emission Project Guide, MAN B&W Two Stroke Marine Engines
- [18] **Haşimoğlu, C. , İcingür, Y. , Öğüt, H.** (2002). Dizel Motorlarda Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 26(2002),127-135
- [19] **MAN Diesel.** (t.y). Selective Catalytic Reduction, D2366419EN
- [20] **American Bureau of Shipping (ABS).** (t.y). Exhaust Gas Scrubber Systems, Status and Guidance, TX02/13 5000 12319
- [21] **Goldsworthy, L.** (t.y). Design of Ship Engines for Reduced Emissions of Oxides of Nitrogen. Faculty of Maritime Transport and Engineering, Australian Maritime College
- [22] **MAN Diesel.** (t.y). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow, MAN B&W Two-Stroke Marine Diesel Engine
- [23] **MAN Diesel.** (t.y). Technology for Ecology, Medium Speed Engines for Cleaner Air
- [24] **American Bureau of Shipping (ABS).** 07 Mart 2014. LNG As Marine Fuel Seminar, Istanbul
- [25] **Gumpel, S.** 24 Şubat 2012. ABS, LNG Fuel Systems: Certification & Approval, Cleveland
- [26] **Gillingham K.** 2007. Hydrogen Internal Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or A Step in The Wrong Direction? Department of Management Science & Engineering Global Climate and Energy Project, Precourt Institute for Energy Efficiency, Stanford University, sf 1-28
- [27] **Saravanan, N. , Nagarajan, G. , Dhanasekaran, C. , Kalaiseluan, K. M.** 2007. Experimental Investigation of Hydrogen Port Fuel Injection in DI Diesel Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:4071-4080
- [28] **Ciniviz, M. , Köse, H.** 14 July 2011. Hydrogen Use in Internal Combustion Engine: A Review. Technical Education Faculty, Mechanical Education Department, Selcuk University

- [29] **Overand, E.** 1999. Hydrogen Combustion Engines. The University of Edinburgh School of Mechanical Engineering, sf:1-77
- [30] **College of Desert.**2001. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Course Manual Module:3 Hydrogen Use in Internal Combustion Engines, sf:1-29
- [31] **Saravanan, N. , Nagarajan, G.** 2008. An Experimental Investigation of Hydrogen-Enriched Air Induction in A Diesel Engine System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008)1769-1775
- [32] **International Energy Agency.** January 2006. Hydrogen Production and Storage R&D Priorities and Gaps. Hydrogen Implementing Agreement
- [33] **Kılıç, M. E.** (t.y). Hidrojen Enerjisi ve Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı
- [34] **Yakıt Tasarruf Cihazı.** (t.y). 320Volt Forum. Alındığı tarih: 10 Mart 2013, adres: www.elektronikprojeler.com/index.php?topic=931.390
- [35] **Kirk, D. W. , Ledas, A. E.** 1982. Precipitate Formation During Sea Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 7, No.12, pp.925-932
- [36] **Eckermann, E.** 2001. World History of The Automobile
- [37] **Taylor, C. F.** 1985. The International Combustion Engine in Theory and Practice. Cambridge: MIT Press
- [38] **Erren, R. A. , Campbell, W. H.** 1933. Hydrogen: A Commercial Fuel for Internal Combustion Engines and Other Purposes. *Journal of The Institute of Fuel*, 6:277-90
- [39] **Karaman, E.** Nisan 2005. Anaylsis of A Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine, Msc. Thesis. Izmir Institute of Technology
- [40] **Ji, C. , Wang, S.** 2009. Combustion and Emissions Performance of A Hybrid Hydrogen- Gasoline Engine at Idle and Lean Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1):346-355
- [41] **Dülger, Z. , Özçelik, K. R.** 2000. Fuel Economy Improvement by Onboard Electrolytic Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(2000)895-897
- [42] **Yılmaz, A. C.** 2010. Design and Applications of Hydroxy (HHO) System, Msc. Thesis, Cukurova University
- [43] **Antunes, J. M. G.** September 2010. The Use of Hydrogen As A Fuel for Compression Ignition Engines. Doctor of Philosophy Thesis, Newcastle University
- [44] **Masood, M. , Ishrat, M. M. , Reddy, A. S.** 7 November 2006. Computational Combustion and Emission Analysis of Hydrogen-Diesel Blends with Experimental Verification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2007)2539-2547
- [45] **Erman, C.** 2007. Inverstigation of The Additional Hydrogen Fuel on Diesel Engine, Msc. Thesis. Hacettepe University

- [46] **Bari, S. , Mohammed Esmaeil, M.** 2010. Effect of H_2/O_2 Addition in Increasing The Thermal Efficiency of A Diesel Engine. *Fuel*, 89(2010)378-383
- [47] **Hsin-Kai, W. , Chia-Yu, C. , Yuan-Chung, C. , Chung-Bang, C.** 14 November 2011. Effect of Regulated Harmful Matters From A Heavy-Duty Diesel Engine by H_2/O_2 Addition to The Combustion Chamber
- [48] **House, K.** 26-27 September 2013. Regional Capacity Building Workshop, Measurement of Inland Transport CO_2 Emissions and Mitigation Policies, IGES Silver Bullet on Transport Emission Reductions - European Experiences, Emission Reduction, Air Quality Improvement and Engine Efficiency Project Solutions. United Nations Conference Center
- [49] **Collijs, G.** 10 September 2013. Experiences with Innovative Solutions to Reduce Diesel Exhaust Emissions. Green Port Congress 2013
- [50] **Impact Global Emissions Ltd.** 2012. Product and Technology Presentation
- [51] **Kumar, M. S. , Ramesh, A. , Nagalingam, B.** 2003. Use of Hydrogen to Enhance The Performance of A Vegetable Oil Fuelled Compression Ignition Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003;28:1143-1154
- [52] **Nissan Qashqai motor özellikleri.** Nissan. Alındığı tarih: 01.05.2014, adres: <http://nissan.com.tr/araba-modelleri/qashqai/versiyon-donanim>
- [53] **Hydrogen HHO Kit F11.** (t.y). Hydrobullet. Alındığı tarih: 01.05.2014, adres: <http://hydrobullet.com/hho-kit/f11-hho-kit/>
- [54] **M/V Petra F Fotoğraf.** 07.06.2008. Marine Traffic. Alındığı tarih: 12.01.2014, adres:http://marinetraffic.com/tr/photos/of/ships/photo_keywords:8500408/ship_name:REGGAE#37461
- [55] **Hydrogen Separator Kit.** (t.y). Hydrobullet. Alındığı tarih: 18.03.2014, adres: <http://hydrobullet.com/hydrogen-separator-kit/>
- [56] **Wartsila Vasa Diesel R22 MD Engine Book.** sf: 01-1
- [57] **Hydrogen Separator Kit R61.** (t.y). Hydrobullet. Alındığı tarih: 18.03.2014, adres: <http://hydrobullet.com/hydrogen-separator-kit/r61-hydrogen-separator-kit-pro/>
- [58] **Arminiuswerft GmbH Bodenwerder/Weser.** M/V Petra F Makine Dairesi Planı, çizim no: 10491-500 Bl.1
- [59] **Brown Boveri (BBC) VTR 161-4 W3PS.** Türbin kitabı, çizim no.1
- [60] **Netpas Distance 3.2 programı**
- [61] **Bunker Index MDO.** (t.y). Bunkerindex. Alındığı tarih: 10.03.2014, adres: <http://bunkerindex.com/prices/bixfree>
- [62] **Altın V.** (t.y). *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*. Alındığı tarih: 05.07.2013, adres: http://biltek.tubitak.gov.tr/merak_ettikleriniz/index.php?kategori_id=6&soru_id=5188

- [63] **Petrov, Y. , Schosger, J. P. , Staynov, Z. , De Bruijn, F.** Hydrogen Evolution On Nickel Electrode İn Synthetic Tap Water - Alkaline Solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011;36(20):12715-24
- [64] **Mazlooni, S. K. , Sulaiman, N.** 05 May 2012. Influencing Factors of Water Electrolysis Electrical Efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2012)4257-4263
- [65] **Electrolyte.** (t.y). Hydrobullet. Alındığı tarih: 25.03.2014, adres: <http://hydrobullet.com/spare-parts/electrolyte-potassium-hydroxide-koh/>
- [66] **Deniz, C. , Durmuşoğlu, Y.** 20 September 2007. Estimating Shipping Emissions in The Region of The Sea of Marmara, Turkey. *Science of The Total Environment*, 390(2008)255-261
- [67] **Trozzi, C. , Vaccaro, R.** 1998. Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions From Ships. Techne Report Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions From Transport, RF98; 1998
- [68] **EMEP, MSC-W Note 1/99.** 1999. EMEP Emission Data. Status Report 1999;1999
- [69] **Endresen, O. , Sørgard, E. , Surdet, J.K. , Dalsøren, S.B. , Isaksen I.S.A. , Berglen, T.F. , et al.** Emissions from International Sea Transportation and Environmental Impact. *Journal of Geophysical Research*, 2003;108(D17):4560. doi:10.1029/2002JD002898 [ACH 14 p.1-22]
- [70] **TCMB Kurları.** (21.03.2014). Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası. Alındığı tarih: 21.03.2014, adres: <http://tcmb.gov.tr>

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Burak Zincir

Doğum Yeri ve Tarihi: Üsküdar / 09.02.1988

Adres: Göksu Evleri A102A Nergis Cad. Anadoluhisarı / Beykoz İstanbul

E-Posta: burockzincir@hotmail.com

Lisans:

İTÜ Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Müh.

SUNY Maritime Faculty Marine Engineering

Yüksek Lisans:

İTÜ Denizcilik Fakültesi Deniz Ulaştırma Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Aralık 2013 - ... : İTÜ Denizcilik Fakültesi Araştırma Görevlisi

Temmuz 2010 - Aralık 2013 : SEAHORSE Denizcilik ve Mühendislik Tic. Ltd. Şti.
Makine Enspektörlüğü, Ar-Ge Müdürlüğü