

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

TÜRKİYE’DE BOR MADENİNİN ALTERNATİF BİR ENERJİ KAYNAĞI OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet TOKCAN

Enstitü Anabilim Dalı: İktisat

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet GÜLMEZ

Mayıs – 2021

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE’DE BOR MADENİNİN ALTERNATİF BİR ENERJİ KAYNAĞI
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet TOKCAN

Enstitü Anabilim Dalı : İktisat

**“Bu tez sınavı ...25../05./2021 tarihinde online olarak yapılmış olup aşağıda isimleri bulunan
jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.”**

JÜRİ ÜYESİ	KANAATİ
Prof. Dr. Selim İNANÇLI	BAŞARILI
Doç. Dr. Ahmet GÜLMEZ	BAŞARILI
Dr. Öğr. Üyesi Pınar KOÇ	BAŞARILI

 SAKARYA ÜNİVERSİTESİ	T.C. SAKARYA ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ TEZ SAVUNULABİLİRLİK VE ORJİNALLİK BEYAN FORMU	Sayfa : 1/1
Öğrencinin		
Adı Soyadı	:	Samet TOKCAN
Öğrenci Numarası	:	Y176002019
Enstitü Anabilim Dalı	:	İktisat
Enstitü Bilim Dalı	:	İktisat
Programı	:	☒ YÜKSEK LİSANS ☐ DOKTORA
Tezin Başlığı	:	TÜRKİYE'DE BOR MADENİNİN ALTERNATİF BİR ENERJİ KAYNAĞI OLARAK İNCELENMESİ
Benzerlik Oranı	:	%3
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,		
☒ Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının benzerlik oranının herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.		
04/05/2021 İmza		
☒ Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen öğrenciye ait tez çalışması ile ilgili gerekli düzenleme tarafımda yapılmış olup, yeniden değerlendirilmek üzere sbetezler@sakarya.edu.tr adresine yüklenmiştir.		
Bilgilerinize arz ederim.		
04/05/2021 İmza		
Uygundur		
Danışman Unvanı / Adı-Soyadı: Tarih: İmza:		
☐ KABUL EDİLMİŞTİR ☐ REDEDELMİŞTİR EYK Tarih ve No:	Enstitü Birim Sorumlusu Onayı	

ÖNSÖZ

Tez sürecim boyunca kıymetli bilgi ve birikimleriyle daima bana yol gösterici olan tez danışmanım Doç. Dr. Ahmet GÜLMEZ hocama katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bunun yanında yine bu süreç boyunca desteklerini benden hiç esirgemeyen kıymetli arkadaşım Gülay ÇEKİCİLER'e, kıymetli aile üyelerimden annem Nurşen TOKCAN, babam Yakup TOKCAN ve kardeşim Semih TOKCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Samet TOKCAN

25/05/2021

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
GRAFİKLER LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
GİRİŞ	1
BÖLÜM 1: ENERJİNİN TANIMI, KAPSAMI VE DÜNYA’DAKİ MEVCUT ENERJİ KAYNAKLARI GÖRÜNÜMLERİ	4
1.1. Enerjinin Tanımı ve Kapsamı	4
1.2. Dünya’da Mevcut Enerji Kaynaklarının Görünümleri.....	6
1.2.1. Fosil Enerji Kaynakları.....	6
1.2.1.1. Petrol	6
1.2.1.2. Doğal Gaz.....	14
1.2.1.3. Kömür	22
1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	31
1.2.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi	31
1.2.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji	42
1.2.2.3. Hidro Enerji	49
1.2.3. Hidrojen Enerjisi	55
1.2.4. Nükleer Enerji	85

1.2.5. Elektrik Enerjisi	104

BÖLÜM 2: TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT ENERJİ KAYNAKLARININ GÖRÜNÜMLERİ 109

2.1. Fosil Enerji Kaynakları	112
2.1.1. Petrol.....	112
2.1.2. Doğal Gaz	118
2.1.3. Kömür	123
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	129
2.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi	131
2.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji	135
2.2.3. Hidro Enerji	139
2.3. Hidrojen Enerjisi	143
2.4. Nükleer (Fisyon) Enerji.....	145
2.5. Elektrik Enerjisi	147

BÖLÜM 3: DÜNYA ENERJİ KAYNAKLARI PROJEKSİYONLARI VE ENERJİ UYGULAMALARI 159

3.1. Fosil Enerji Kaynakları	159
3.1.1. Petrol.....	159
3.1.2. Doğal Gaz	161
3.1.3. Kömür	164
3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	168
3.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi	168
3.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji	171

3.2.3. Hidro Enerji	173
3.3. Hidrojen Enerjisi	176
3.4. Nükleer Enerji.....	191
3.5. Elektrik Enerjisi	202
BÖLÜM 4: ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI OLARAK BOR.....	205
4.1. Borun Tanımı, Kapsamı ve Genel Özellikleri	205
4.2. Borun Tarihçesi.....	207
4.3. Bor Yataklarının Oluşumu	208
4.3.1. Dünya'daki Başlıca Bor Yatakları	209
4.3.2. Türkiye'deki Başlıca Bor Yatakları	210
4.4. Bor Madeninin Sınıflandırılması	211
4.4.1. Ham (Cevher) Borlar	211
4.4.2. Rafine Borlar	215
4.4.3. Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları	215
4.5. Bor Minerallerinin Mevcut Kullanım Yerleri ve Alanları	217
4.5.1. Cam ve Seramik Sektörleri	219
4.5.2. Temizlik ve Tekstil Sanayi	220
4.5.3. Otomotiv ve Atık Temizleme Sektörü	221
4.5.4. Metalürji ve Nükleer Sanayi	221
4.5.5. Tarım ve Sağlık Sektörleri	222
4.5.6. Yanmayı Önleyici Olarak ve Diğer	222
4.6. Bor Minerallerinin Enerji Bazında Kullanım Yerleri ve Alanları	223

4.6.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborit (MgB ₂).....	224
4.6.2. Hidrojen Üretiminde ve Depolamada Sodyum Borhidrit (NaBH ₄)	227
4.6.2.1. Sodyum Borhidrit (NaBH ₄)	227
4.6.2.2. Sodyum borhidrit (NaBH ₄) Üretim Yöntemleri	229
4.6.2.3. Sodyum Borhidritten (NaBH ₄) Hidrojen Üretimi ve Depolanması	239
4.6.3. Nükleer (Füzyon) Enerji Üretimi	242
4.7. Türkiye'nin Bor Rezervleri	246
4.8. Türkiye'nin Bor Üretimi	248
4.9. Türkiye'nin Bor Tüketimi ve Dış Ticareti.....	251
BÖLÜM 5: TÜRKİYE'DE BORUN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	257
5.1. Literatür İncelemesi	257
5.1.1. Dünya Geneline Yapılan Belli Başlı Çalışmalar	257
5.1.1.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborite (MgB ₂) Yönelik Yapılan Çalışmalar	257
5.1.1.2. Yakıt ve Enerji Katkı Maddesi Olarak Bor Kullanımına Yönelik Yapılan Çalışmalar	262
5.1.1.3. P-B-11 Füzyonuna Dayalı Tersine Çevrilmiş Konfigürasyon Tekniği (Field Other Publications Reversed Configuration) Çalışması	271
5.1.2. Türkiye'de Yapılan Belli Başlı Çalışmalar.....	273
5.1.2.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborite (MgB ₂) Yönelik Çalışmalar	273

5.1.2.2. Doğrudan Sodyum Borhidrit Kullanan Yakıt Pili'nin Üretimi ve Entegrasyonu Çalışması	275
5.1.2.3. Sodyum Borhidritli Yakıt Pili'nin Geliştirilmesi Projesi.....	275
5.1.2.4. Yakıt Pili Araç Projesi	276
5.1.2.5. İnsansız Hava Araçlarında (İHA) Kullanılmak Üzere Bor Kaynaklı Hidrojen Yakıtlarının ve Yakıt Pili Sistemlerinin Geliştirilmesi Projesi.....	276
5.2. Türkiye’de Borun Uygulanabilirliğinin ve Sürdürülebilir Şekilde Kullanımının Analiz Edilmesi	276
5.2.1. Borun Araç Yakıt Olarak Türkiye Piyasasındaki Rekabetçilik Düzeyi	276
5.2.2. Nükleer Füzyona Dayalı Elektrik Üretimi.....	278
5.2.3. Elektriksel İletim ve Dağıtım Kayıplarında Azalma	281
5.3. Analize İlişkin Öncüller ve Olası Faydalar	281
5.3.1. Öncüller	281
5.3.1.1. İç Piyasaya Yönelik Bor Üretimi ve Kapasitesi	281
5.3.1.2. Toplam Bor Arz Yapısı.....	286
5.3.1.3. Ar-Ge Yapısı	288
5.3.2. Olası Faydalar	289
5.3.2.1. Petrol İthalatında Azalma ve Yüksek Katma Değer Sağlama	289
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	291
KAYNAKÇA.....	298
ÖZGEÇMİŞ	324

KISALTMALAR

A	:Angström
AB	:Avrupa Birliği
ABD	:Amerika Birleşik Devletleri
AFAD	:Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AR-GE	:Araştırma ve Geliştirme
ATM	:Atmosferik Basınç
B	:Bor
BAE	:Birleşik Arap Emirlikleri
BAR	:Barometrik Basınç
BK.	:Bakınız
BOTAŞ	:Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi
BP	:İngiliz Petrolleri
°C	:Santigrat Derece
CCFE	:Culham Füzyon Enerjisi Merkezi
Cm³	:Santimetre Küp
\$	:Dolar
Dk	:Dakika
Dm³	:Desimetre Küp
DPT	:Devlet Planlama Teşkilatı
EIA	:Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi Dairesi
EİGM	:Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EJ	:Exajoule
Emu	:Elektromanyetik Birim
EPDK	:Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
€	:Euro
EUROSTAT	:Avrupa İstatistik
Ft	:Feet
G	:Gram
GJ	:Gigajoule
GW	:Gigawatt
GWe	:Gigawatt Elektrik

GWh	:Gigawatt Saat
HC	:Hidrokarbon
Hp	:Yüksek Güç
Ibs	:Pound
IEA	:Uluslararası Enerji Ajansı
IPP	:Max Planck Plazma Fiziği Enstitüsü
IRENA	:Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
İHA	:İnsansız Hava Aracı
J	:Joule
K	:Kelvin
KA	:Kiloamper
Ke	:Kepekli
Kev	:Kiloelektron Volt
Kg	:Kilogram
KJ	:Kilojoule
KKTC	:Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
Km	:Kilometre
KPa	:Kilopaskal
KW	:Kilowatt
KWh	:Kilowatt Saat
L	:Litre
LNG	:Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LPG	:Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
M	:Metre
M	:Dakika
M²	:Metrekare
M³	:Metreküp
MA	:Megaamper
MAPEG	:Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü
Mev	:Milyon elektronvolt
Mg	:Miligram
MIT	:Massachusetts Teknoloji Enstitüsü

MJ	:Megajoule
Mm²	:Milimetrekare
MPa	:Megapaskal
MSV	:Milisievert
MTCO₂	:Milyon Ton Karbondioksit
MW	:Megawatt
MWh	:Megawatt Saat
NADPH	:Nikotinamid Adenin Dinükleotid Fosfat
NEA	:Nükleer Enerji Ajansı
Nox	:Azot Oksit
OGM	:Orman Genel Müdürlüğü
OPEC	:Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü
Pa	:Paskal
Ph	:Hidrojen Gücü
Ppm	:Milyonda Bir Birim
PW	:Petawatt
PWh	:Petawatt Saat
REN	:Yenilenebilir Enerji
S	:Saniye
Sg	:Özgöl Ağırlık
Sox	:Sülfür Oksit
T	:Tesla
TAEK	:Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TJ	:Terajoule
TKİ	:Türkiye Kömür İşletmeleri
TL	:Türk Lirası
TMMOB	:Türk Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği
TPAO	:Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TTK	:Türkiye Taş Kömürü Kurumu
TÜBİTAK-MAM	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – Marmara Araştırma Merkezi

TÜPRAŞ	:Türkiye Petrol Rafinerileri
TW	:Terawatt
TWh	:Terawatt Saat
UNCTADSTAT	: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma İstatistikleri Konferansı
UNEP	:Birleşmiş Milletler Çevre Programı
USGS	:Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu
V	:Volt
VD.	:Ve Diğerleri
VVER	:Su-Su Enerji Reaktörü
W	:Watt
WCI	:Dünya Kömür Enstitüsü
Wh	:Watt Saat

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1: Petrolün Yapısında Bulunan Başlıca Kimyasallar ve Bunların Kütlece Ağırlıkları (%)	6
Tablo 2: Bazı Petrol Ürünlerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	8
Tablo 3: Doğal Gazın Yapısında Bulunan Başlıca Kimyasallar ve Kütlece Ağırlıkları	15
Tablo 4: Doğal Gazın Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	15
Tablo 5: Kömürün Yapısında Yer Alan Kimyasalların Kömürleşme Süreci Boyunca Aldıkları Değerler	23
Tablo 6: Kömürün Kalitesini Belirleyen Bazı Kimyasal Özelliklerin Kömürleşme Derecelerinde Aldıkları Değerler	24
Tablo 7: Güneş Enerjisi ve Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	33
Tablo 8: 2009-2017 Yılları Arasında Dünya Geneline Güneş Enerjisinden ve Güneş Pillerinden Elde Edilen Elektrik Üretimleri	34
Tablo 9: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Güneş Pillerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	36
Tablo 10: Rüzgar Enerjisinin ve Enerji Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları ...	38
Tablo 11: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Rüzgar Türbinlerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	39
Tablo 12: Bazı Organik Maddelerin Biyogaz Verimleri ve Metan İçerikleri	43
Tablo 13: Biyodizel Üretiminde Kullanılan Bazı Bitkisel Yağların Viskozite ve Isıl Değerleri.....	44
Tablo 14: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Biyoenerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri	45
Tablo 15: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Biyoelektrik Üretim Maliyetleri	46
Tablo 16: Lindal Diyagramı	47
Tablo 17: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Jeotermal Enerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	49
Tablo 18: Dünya’da En Yüksek Hidroelektrik Üretim Kapasitesi Sahip Bazı Barajlar ve Bulunduğu Ülkeler.....	51
Tablo 19: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Hidroelektrik Enerjisi Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	52
Tablo 20: Hidrojenin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	56
Tablo 21: Belirli Başlı Bazı Hidrojen Üretim Teknolojilerinin Hidrojen Üretim Maliyetleri ve Karbon Emisyonu Değerleri	70
Tablo 22: Belli Başlı Bazı Hidrojen Üretim Teknolojileri Tarafından Üretilen Ürünlerin Kimyasal ve Maliyet İçerikleri	71
Tablo 23: Bazı Hidrojen Üretim Teknolojilerinin Hidrojen Üretim Verimlilikleri.....	72
Tablo 24: Bazı Metal Hidrit Alaşımlarının Hidrojen Depolama Kapasiteleri	76
Tablo 25: Yıllar İtibariyle Dünya Geneline Yakıt Pili Araç ve Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu Sayıları.....	85
Tablo 26: Nükleer Fisyon Reaksiyonunu Oluşturan Atomik Yapılar ve Kütleleri	89
Tablo 27: Dünya Geneline Bazı Enerji Teknolojilerinin Kapasite Kullanım Oranları	91

Tablo 28: 2018 Yılı İtibariyle Dünya Geneline En Fazla Nükleer (Fisyon) Enerjiye Sahip Ülkeler ve Nükleer Enerji Görünümleri	93
Tablo 29: Dünya Geneline En Fazla Nükleer (Fisyon) Enerjiye Sahip İlk 11 Ülkenin Tarihsel Süreç Boyunca Reaktör Göstergeleri	96
Tablo 30: Nükleer Füzyon Reaksiyonunu Oluşturan Atom Yapıları ve Kütleleri	99
Tablo 31: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Enerji İthalatının ve İhracatının Görünümleri.....	111
Tablo 32: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Ham Petrol Üretimi ve Toplam Petrol Talebi	114
Tablo 33: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Petrol İthalatı ve İhracatı	116
Tablo 34: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Petrol İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri	117
Tablo 35: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Doğal Gaz Üretimleri ve Tüketimleri	119
Tablo 36: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Doğal Gaz İthalatı ve İhracatı.....	122
Tablo 37: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Doğal Gaz İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri	123
Tablo 38: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Kömür Üretimleri ve Tüketimleri	126
Tablo 39: 2011-2020 Arası Dönemde Türkiye'nin Kömür İthalatı ve İhracatı	128
Tablo 40: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Kömür İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri	129
Tablo 41: 2002-2018 Arası Dönemde Türkiye'deki Güneş Enerji Sistemlerinin (Güneş Pillerinin) Görünümleri.....	133
Tablo 42: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'deki Rüzgar Enerji Sistemlerinin (Rüzgar Türbinlerinin) Görünümleri	134
Tablo 43: Türkiye'deki Çeşitli Biyoenerji Kaynaklarından Elde Edilen Atıklar ve Bunların Potansiyel Enerji Değerleri	136
Tablo 44: 2010-2018 Arası Dönemde Türkiye'deki Biyoenerji Kaynaklarının Görünümleri	137
Tablo 45: Türkiye'de 2019 Yılı İtibariyle Jeotermal Enerji Santrallerinin Görünümü	138
Tablo 46: Türkiye'de 2019 Yılı İtibariyle Hidroelektrik Enerji Santrallerinin Görünümü	140
Tablo 47: 2017 yılı İtibariyle Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanlarının Uranyum Rezervlerinin Görünümleri.....	146
Tablo 48: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Elektrik Gücü Kurulu Kapasiteleri, Üretimleri ve Talepleri	148
Tablo 49: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'deki Elektrik Enerjisinin İletim ve Dağıtım Kayıpları ve Bunların Toplam Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları	153
Tablo 50: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Elektrik İthalatı ve İhracatı	154
Tablo 51: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Elektrik Enerjisi İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri	156
Tablo 52: Yıllar İtibariyle Güneş Pili Kurulum ve Elektrik Üretim Maliyetleri.....	169

Tablo 53: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Çapta Güneş Pillerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	169
Tablo 54: Yıllar İtibariyle Rüzgar Enerjisi Kurulum ve Elektrik Üretim Maliyetleri .	170
Tablo 55: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Çapta Rüzgar Türbini Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	171
Tablo 56: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Bazda Biyoenerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	172
Tablo 57: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Bazda Jeotermal Enerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri.....	172
Tablo 58: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Hidroelektrik Enerji Görünümü	173
Tablo 59: Hidrojenin Kısa Mesafeli Taşıma Maliyetleri (\$/kgH ₂)	177
Tablo 60: Yıllar İtibariyle Dünya Geneline Yakıt Pilli Araç ve Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu Sayıları.....	179
Tablo 61: Toyota Mirai'nin Mekanik ve Performans Özellikleri.....	182
Tablo 62: Mercedes Benz GLC'nin Yakıt Pilli ve Hibrit Moddaki Mekanik ve Performans Özellikleri	184
Tablo 63: Rasa'nın Mekanik ve Performans Özellikleri.....	186
Tablo 64: 2018-2030 Arası Hidrojen Enerjisine Yapılması Planlanan Kümülatif Yatırımlar	191
Tablo 65: Borun Atomik Yapısı, Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	205
Tablo 66: Bor Madeninin ve Diğer Bazı Elementlerin Enerji İçerikleri.....	206
Tablo 67: Dünya Geline Bor Yataklarının Bulundukları Yerler ve Çıkan Bor Cevherleri	209
Tablo 68: Türkiye'deki Bor Yataklarının Bulundukları Yerler ve Çıkan Cevherler Türleri.....	210
Tablo 69: Ticari Öneme Sahip Bor Cevherinin Bor Oksit (B ₂ O ₃) İçerikleri ve Bulundukları Ülkeler.....	211
Tablo 70: Ham Bor Cevherlerinden Üretilen Başlıca Rafine Bor Ürünleri	215
Tablo 71: Rafine Borlardan Üretilen Birtakım Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları ...	216
Tablo 72: Bazı Bor Madenlerinin (Cevher-Ürün-Kimyasallar) Mevcut Kullanım Yerleri ve Alanları	217
Tablo 73: Bazı Bor Minerallerinin Enerji Bazındaki Kullanım Yerleri ve Alanları ...	223
Tablo 74: Süperiletkenliğe Sahip Bazı Elementlerin ve Bileşiklerin Süperiletken Özellik Gösterdiği Sıcaklık Değerleri.....	226
Tablo 75: Sodyum Borhidritin (NaBH ₄) Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	228
Tablo 76: Sodyum Borhidridin (NaBH ₄) Bazı Karışım Maddeleri İçerisindeki Çözünürlüğü	229
Tablo 77: Bazı Nükleer Fisyon ve Füzyon Reaksiyonlarının Toplam Enerji (Q) ve Kütle başı Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması	243
Tablo 78: Bazı Füzyon Reaksiyonlarının Enerji ve Radyoaktif Ürün Salınımı Açısından Karşılaştırılması	244
Tablo 79: Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanının Toplam Bor Madeni Rezervleri	246
Tablo 80: Türkiye'nin Bölgesel Bazda Toplam Bor Rezervlerinin Dağılımları	247

Tablo 81: Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanının Bor Oksit (B ₂ O ₃) Bazındaki Toplam Bor Madeni Rezervleri	247
Tablo 82: 2014 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Bor Üretim Tesislerinin Üretim Kapasiteleri ve Üretim Miktarları.....	249
Tablo 83: 2010-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Ham Bor ve Rafine Bor Ürünlerinin Tüketim ve İhracat Göstergeleri	253
Tablo 84: Hydrogen on Demand Sistemi İle Üretilen Aracın Geliştirilmiş Özellikleri	265
Tablo 85: Saatte 125 Km Hızla 1000 Km (621 Mil) Yol Gidebilmek İçin İhtiyaç Yakıt ve Açığa Çıkan Kül Miktarları	268
Tablo 86: 1 GJ Enerji Eldesinde Açığa Çıkan Kül Miktarları ve Hacimleri	268
Tablo 87: 1 GJ Enerji Elde Edebilmek İçin Oksitlenmesi Gereken Yakıt Miktarları ve Hacimleri.....	269
Tablo 88: 3 GJ Enerji Elde Edebilmek İçin İhtiyaç Duyulan Yakıt Tankı Hacimleri .	269

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Güneş Panelleri.....	32
Şekil 2: Güneş Panelinin Çalışma Prensibi.....	33
Şekil 3: Tipik Bir Rüzgar Türbininin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	37
Şekil 4: Jeotermal Enerji'nin Oluşumu	46
Şekil 5: Dünya Jeotermal Enerji Sahaları.....	47
Şekil 6: Hidroelektrik Santraller İle Elektrik Üretimi	50
Şekil 7: Hidrojen Yakıt Pili ve Çalışma Düzenegi.....	82
Şekil 8: Filyon Olayı	86
Şekil 9: Nükleer Füzyona Ait Plazma	103
Şekil 10: Türkiye'nin Toplam Güneş Radyasyonu (Işınım) Haritası.....	131
Şekil 11: Türkiye'nin Rüzgar Gücü Haritası	133
Şekil 12: Türkiye'deki Jeotermal Enerji Sahaları	138
Şekil 13: Toyota Mirai ve Ekipman Düzenegi.....	182
Şekil 14: Mercedes Benz GLC Fuel Cell ve Ekipman Düzenegi	183
Şekil 15: Rasa ve Ekipman Düzenegi.....	185
Şekil 16: Hyundai Nexo ve Nikola One	187
Şekil 17: TFRT (Tokamak Füzyon Test Reaktörü) Tesisi	192
Şekil 18: JET Füzyon Reaktörü	195
Şekil 19: EAST (Deneysel Gelişmiş Süper İletken Tokamak) Nükleer Füzyon Tesisi	196
Şekil 20: Wendelstein 7-X Nükleer Füzyon Tesisi	197
Şekil 21: Stellarator Tipli Wendelstein 7-X Nükleer Füzyon Reaktörü.....	198
Şekil 22: ITER'in Ana Gövde İnşası.....	200
Şekil 23: Tokamak Tipli ITER Nükleer Füzyon Reaktörü ve Nükleer Füzyonun Oluşumu	201
Şekil 24: Tinkal (Boraks) (Solda) ve Üleksit (Sağda) Cevherleri.....	212
Şekil 25: Kernit (Solda) ve Kolemanit (Sağda) Cevherleri	213
Şekil 26: Pandemit (Solda) ve Hidroborasit (Sağda) Cevherleri	214
Şekil 27: Probertit Cevheri.....	215
Şekil 28: Hyper Technology Firması Tarafından Uçaklarda Kullanılmak Üzere Geliştirilen Magnezyum Borhidritli (MgB ₂) Süperiletken Telleri.....	262
Şekil 29: Hydrogen on Demand Sisteminin Çalışma Prensibi	264
Şekil 30: Natrium Aracı ve Yakıt Pili Düzenegi.....	264
Şekil 31: Borun Doğrudan Kullanıldığı Yakıt Sistemi.....	266
Şekil 32: Tersine Çevirilmiş Konfigürasyon Tekniğinin Kullanıldığı P-B-11 Yakıtı İçeren Nükleer Füzyon Reaktörü.....	272

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 1: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Petrol Rezervlerinin Dağılımları	9
Grafik 2: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Petrol Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması	10
Grafik 3: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Toplam Petrol Rafineri Kapasiteleri ve Ham Petrol Üretimleri.....	11
Grafik 4: 2009 -2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Toplam Petrol Ticaret Hacmi	12
Grafik 5: 2000-2018 Yılları Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talebi	13
Grafik 6: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Genelinde Petrol Talebinin Sektörel Görünümleri	14
Grafik 7: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Genelinde Yıllık Bazda Petrole Yapılan Yatırımlar	14
Grafik 8: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Dağılımları.....	17
Grafik 9: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması.....	18
Grafik 10: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Doğal Gaz Üretimleri.....	19
Grafik 11: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Doğal Gaz Ticaret Hacimleri.....	20
Grafik 12: 2000-2018 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Talebi.....	21
Grafik 13: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Doğal Gaz Talebinin Sektörel Dağılımları	22
Grafik 14: 2000-2017 Arası Dönemde Küresel Bazda Yıllık Doğal Gaz Yatırımları ..	22
Grafik 15: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Kömür Rezervlerinin Dağılımları.....	25
Grafik 16: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Kömür Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması.....	25
Grafik 17: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelinde Kömür Üretimleri	26
Grafik 18: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Kömür Ticaret Hacimleri	27
Grafik 19: 2000-2018 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Kömür Talebi	28
Grafik 20: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Kömür Talebinin Sektörel Dağılımları	28
Grafik 21: 2000-2017 Arası Dönemde Küresel Bazda Yıllık Kömür Enerjisine Yapılan Yatırımlar	29
Grafik 22: 2000-2018 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebi	30
Grafik 23: 2000-2018 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebinde Meydana Gelen Değişimler	30
Grafik 24: 2000-2018 Arası Dönemde Fosil Enerji Talebinin Dünya Toplam Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Görünümleri (%)	30
Grafik 25: 2010-2018 Arası Güneş Pillerinin Kurum ve Elektrik Üretim Maliyetleri .	35
Grafik 26: 2000-2018 Arası Dönemde Güneş Pili Sistemlerine Yıllık Bazda Yapılan Yatırımlar	36

Grafik 27: 2000-2018 Arası Dönemde Rüzgar Enerji Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılan Yatırımlar	40
Grafik 28: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Bazda Rüzgar Türbini Kurulum (Solda) ve Enerji Üretim (Sağda) Maliyetleri	41
Grafik 29: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Bazda Yenilenebilir Enerji Talebi Görünümleri	53
Grafik 30: 2000-2017 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Geneline Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri	54
Grafik 31: 2000-2018 Arası Dönemde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dünya Toplam Enerji Talebi İçerisindeki Görünümleri	54
Grafik 32: Bazı Metal Hidritlerin, Sıvı ve Gaz Formundaki Hidrojenin İçerdiği Yoğunluk Değerleri	75
Grafik 33: Yıllar İtibariyle Yakıt Pillerinin Maliyet Görünümü	84
Grafik 34: 2018 Yılı İtibariyle Dünya Geneline Aktif Olarak Kullanılan Nükleer Fisyon Reaktörleri.....	91
Grafik 35: 2000-2017 Arası Dünya Nükleer (Fisyon) Enerji Görünümü	97
Grafik 36: Dünya Geneline Bazı Enerji Kaynaklarının ve Enerji Teknolojilerinin Enerji Yoğunlukları	101
Grafik 37: 2000-2018 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Üretimi.....	104
Grafik 38: 2000-2018 Arası Dünya Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Dağılımı (%)	105
Grafik 39: 2000-2018 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Talebi.....	107
Grafik 40: 2000-2040 Arası Dünya Elektrik Talebinin Sektörel Dağılımı (%).....	108
Grafik 41: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Birincil Enerji Tüketimleri	109
Grafik 42: Türkiye'nin Seçilmiş Yıllardaki Birincil Enerji Tüketiminin Enerji Kaynağı Bazında Dağılımları	110
Grafik 43: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Enerji İthalatına Olan Bağımlılığı.....	111
Grafik 44: 2009-2018 Arası Türkiye'nin Üretilbilir Durumdaki Ham Petrol Rezervleri	113
Grafik 45: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Petrol Tüketiminin Sektörel Dağılımları	115
Grafik 46: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Petrol İthalatına Olan Bağımlılığı	115
Grafik 47: 2009-2018 Arası Türkiye'nin Üretilbilir Durumdaki Doğal Gaz Rezervleri	118
Grafik 48: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Petrolün Tüketiminin Sektörel Dağılımları	120
Grafik 49: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Doğal Gaz İthalatına Olan Bağımlılığı.....	121
Grafik 50: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'nin Toplam Kömür Rezervi (Milyon Ton) ..	124
Grafik 51: Türkiye'de Linyit (Solda) ve Taş Kömürü Rezervlerini En Yoğun Bulunduğu Yerler	125

Grafik 52: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye’deki Kömür Tüketiminin Sektörel Dağılımları	126
Grafik 53: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Kömür İthalatına Olan Bağımlılığı	127
Grafik 54: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri	130
Grafik 55: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Tüketimlerinin Toplam Birincil Enerji Tüketimi İçerisindeki Payları	130
Grafik 56: Türkiye’nin Aylar İtibariyle Güneş Enerjisi Radyasyon (Işınım) Değerleri (Solda) ve Güneşlenme Süreleri (Sağda)	132
Grafik 57: Türkiye’de 2018 Yılı’nın Temmuz ve Ağustos Ayları İçerisindeki Günlük Bazda Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilen Enerji Üretimleri	135
Grafik 58: Türkiye’de 2000-2018 Arası Dönemde Jeotermal Enerjiden Üretilen Toplam Enerji (Elektrik) Üretimleri (Solda) ve Üretilen Enerjilerin Toplam Yenilenebilir Enerji (Elektrik) Üretimi İçerisindeki Payları	139
Grafik 59: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Hidroelektrik Üretimlerinin Yenilenebilir Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları	141
Grafik 60: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Hidroelektrik Kurulu Kapasiteleri ve Hidroelektrik Üretimleri	142
Grafik 61: Türkiye’nin 2017 ve 2018 Yıllarında Aylık Bazdaki Hidroelektrik Üretimleri	142
Grafik 62: 2018 Yılı İtibariyle Elektrik Tüketiminin Sektörel Dağılımları	149
Grafik 63: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Santral Bazında Elektrik Enerjisi Kurulu Güçlerinin (Solda) ve Elektrik Üretimlerinin (Sağda) Dağılımları.	150
Grafik 64: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Enerji Kaynağı Bazında Elektrik Enerjisi Kurulu Güçlerinin (Solda) ve Elektrik Üretimlerinin (Sağda) Dağılımları. ...	151
Grafik 65: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’de Üretilen Elektriğin Yerli ve Yabancı Kaynak Bazındaki Dağılımları	152
Grafik 66: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri	160
Grafik 67: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Petrol Talebinin Sektörel Görünümü. 161	
Grafik 68: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Petrol Yatırımları	161
Grafik 69: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri	162
Grafik 70: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Doğal Gaz Talebinin Sektörel Görünümü	163
Grafik 71: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Doğal Gaz Yatırımları	163
Grafik 72: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri	164
Grafik 73: 2000-2040 Arası Dönemde Dünya Kömür Talebinin Sektörel Dağılımları	165
Grafik 74: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Kömür Yatırımları	165
Grafik 75: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebi	166
Grafik 76: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebinde Meydana Gelmesi Beklenen Değişimler	166

Grafik 77: 2018-2040 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Genelinde Fosil Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri.....	167
Grafik 78: 2040 Yılında Fosil Enerji Kaynaklarının Dünya Toplam Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Muhtemel Görünümü	167
Grafik 79: 2018-2050 Arası Dönemde Güneş Pili Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılması Planlanan Yatırımlar	168
Grafik 80: 2018-2050 Arası Dönemde Rüzgar Enerji Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılması Planlanan Yatırımlar	170
Grafik 81: 2018-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Yenilenebilir Enerji Talep Projeksiyonu	174
Grafik 82: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Dünya Yenilenebilir Enerji Talebinde Meydana Gelmesi Beklenen Değişimler	175
Grafik 83: 2018-2040 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Genelinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri	176
Grafik 84: 2040 Yılında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dünya Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Muhtemel Görünümü	176
Grafik 85: 2030 Yılı İtibariyle Uzun Mesafeli Hidrojen Taşıma Maliyetleri.....	177
Grafik 86: Yıllar İtibariyle Yakıt Pillerinin Maliyet Görünümü	178
Grafik 87: Yıllar İtibariyle Farklı Yakıt Türlerine ve Teknolojilerine Sahip Araç Sistemlerinin Aldıkları Mesafe Cinsinden Maliyetleri	181
Grafik 88: Rasa ve Diğer Araç Teknolojilerini Enerji Verimliliği Karşılaştırmaları ...	186
Grafik 89: 2015-2050 Arası Dönemde Dünya Genelinde Hidrojen Talebi (Solda) ve Değişimleri (Sağda)	189
Grafik 90: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Genelinde Nükleer (Fisyon) Elektrik Üretimleri (Solda) ve Toplam Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları (Sağda)	192
Grafik 91: 2000-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Üretimi.....	203
Grafik 92: 2040 Yılı İtibariyle Dünya Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Dağılımları	203
Grafik 93: 2000-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Talebi	204
Grafik 94: Geleneksel ve Süperiletken Yapıların Enerji Santrallerindeki Enerji Kayıpları ve Enerji Verimlilik Düzeyleri.....	225
Grafik 95: Magnezyum Diboritin (MgB ₂) Sıcaklık Elektriksel Direnç İlişkisi	227
Grafik 96: Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilmesi İçin Gerekli Olan Plazma Sıcaklıkları ve Füzyon Reaktiviteleri.....	245
Grafik 97: Yıllar İtibariyle Türkiye'nin Küresel Bor Üretimi İçerisindeki Payı	248
Grafik 98: 2006-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Rafine Bor Ürünleri Üretim Kapasiteleri ve Üretimleri	250
Grafik 99: Yıllar İtibariyle Türkiye'nin Rafine Bor Ürünlerinin Üretimlerindeki Kapasite Kullanım Oranları.....	251
Grafik 100: Türkiye'nin Yıllar İtibariyle Küresel Bor Piyasındaki Bor Tüketim Oranları	252
Grafik 101: 2010-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Ham Bor ve Rafine Bor Ürünlerinin Tüketim ve İhracat Oranları	254

Grafik 102: 2019 Yılı İtibariyle Türkiye’de Tüketilen Bor Ürünlerinin Sektörel Dağılımları.....	255
Grafik 103: 2019 Yılı İtibariyle Türkiye’nin İhraç Etmiş Olduğu Ham Bor Ve Bor Ürünlerini Bölgesel Dağılımları	256
Grafik 104: Katkılı Magnezyum Borhidrit (MgB ₂) Numunelerinin 5 K ve 20 K’de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları	258
Grafik 105: Saf, Silisyum Karbür (SiC) ve Karbon (C) Katkılı Magnezyum Borhidrit Numunelerinin 4,2 K’de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları.....	258
Grafik 106: Bor Karbür Katkılı (B ₄ C) Magnezyum Diboritin (MgB ₂) 20 K’de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları	259
Grafik 107: Farklı Yoğunlardaki Manezyum Diborit (MgB ₂) Numuneleerinin 0 T Alandaki Elektromanyetik Özellikleri	260
Grafik 108: Bor-10 ve Bor-11 Katkılı Magnezyum Borhidirt (MgB ₂) Numunelerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Dirençleri	261
Grafik 109: Bor Katkılı Yakıtların Tahrikli Füzelerin İtiş Gücü Üzerindeki Etkileri. 271	
Grafik 110: Saf ve Karbon Katkılı (Solda) ve Saf ve Silisyum Karbon Katkılı Magnezyum Diborit Numunellerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Dirençleri	273
Grafik 111: Saf ve Silisyum Karbon (Solda) ve Saf ve Karbon (C) Katkılı Magnezyum Diborit Numunelerinin Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları	274
Grafik 112: Saf ve Gümüş Katkılı Magnezyum Diborit Numunelerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektiriksel Dirençleri	274
Grafik 113: Farklı Sıcaklık Değerleri Altındaki Saf ve Gümüş İlaveli Magnezyum Diborit Numunelerinin Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları	275
Grafik 114: Türkiye’nin Yıllar İtibariyle Toplam Ar-Ge Harcamaları	288
Grafik 115: Türkiye’nin 2002-2018 Arası Dönemde Yapmış Olduğu Toplam Ar-Ge Harcamalarının Sektörel Dağılımları	289

Sakarya Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Özeti

Yüksek Lisans	+	Doktora	
Tezin Başlığı: Türkiye’de Bor Madeninin Alternatif Bir Enerji Kaynağı Olarak İncelenmesi			
Tezin Yazarı: Samet TOKCAN		Danışman: Doç. Dr. Ahmet GÜLMEZ	
Kabul Tarihi: 25/05/2021		Sayfa Sayısı: xxi (ön kısım) + 324 (tez)	
Anabilim Dalı: İktisat			
Bu çalışmada, dünya genelinde birincil derecede kullanılan ve Türkiye’nin de yüksek derecede bağımlısı olduğu fosil enerji rezervlerinin yakın gelecekte tükenecek olması sebebiyle alternatif enerji kaynağı olarak önemli potansiyelleri bünyesinde barındıran borun Türkiye’de alternatif enerji kaynağı olarak uygulanabilirliği ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için bor ürünleri olarak sodyum borhidrit, magnezyum diborit ve bor-11 ele alınmıştır. Bu amaçla doğrultusunda Türkiye’nin genel bor yapılarının, borun yakıt maliyetleri konusunda rekabetçilik düzeylerinin ve nükleer füzyona dayalı elektrik üretim potansiyellerinin tespit edilmesine yönelik grafiksel ve matematiksel yöntemler kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için de çok sayıda ulusal-uluslararası kuruluşlardan elde edilen verilerden hareket edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde sodyum borhidritin yakıt olarak Türkiye’deki diğer yakıt teknolojileriyle rekabet edebileceği, bor-11 füzyonuna dayalı potansiyel elektrik üretimiyle Türkiye’nin elektrik ihtiyacının %4’ünün karşılanabileceği ve magnezyum diborit kullanımıyla da elektriksel iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılabileceği tespit edilmiştir. Tüm bunların gerçekleşebilmesi için ise, Türkiye’nin öncelikli olarak bora dayalı; mevcut üretim kapasitesinin ve üretiminin artırılması, arz yapısının iç tüketim lehine olacak şekilde kaydırılması ve Ar-Ge yapısının da enerji, kimya ve madencilik sektörleri lehine genişletilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bunların gerçekleşmesi durumunda hem Türkiye’nin enerji açığının büyük bir bölümünün azaltılabileceği hem de bor ihracatlarından elde edilen gelire kıyasla daha yüksek katma değer sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.			
Anahtar Kelimeler: Enerji, Bor, Hidrojen, Nükleer Füzyon, Türkiye			

Sakarya University
Institute of Social Sciences Abstract of Thesis

Master Degree	+	Ph.D.		
Title of Thesis: Examining of Boron Mine as An Alternative Energy Source in Turkey				
Author of Thesis: Samet TOKCAN		Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet GULMEZ		
Accepted Date: 05/25/2021		Number of Pages: xxi (forepart) + 324 (thesis)		
Department: Economics				
In this study, it is aimed to investigate the applicability and sustainable availability of pipe as an alternative energy source in Turkey, which is used primarily in the world and which turkey is highly dependent on, due to the fact that it will be depleted in the near future. For this purpose, sodium borhydride, magnesium diborite and boron-11 are discussed as boron products. For this purpose, analysis of Turkey's general boron structures, competitiveness levels on pipe fuel costs and nuclear fusion based electricity generation potentials was carried out using graphical and mathematical methods. For this analysis, data obtained from numerous national-international organizations were acted on. As a result of the analysis, it was determined that sodium borohydride can compete with other fuel technologies in Turkey as fuel, 4% of Turkey's electricity needs can be met with potential electricity production based on boron-11 fusion, and electrical transmission and distribution losses can be reduced with the use of magnesium diborite. In order for all this to happen, Turkey is primarily based on boron; it is emphasized that the existing production capacity and production should be increased, the supply structure should be shifted in favor of domestic consumption, and the research and development structure should be expanded in favor of the energy, chemical and mining sectors. In the event of these, it was found that a large part of Turkey's energy deficit could be reduced and higher added value could be achieved compared to the income from boron exports.				
Keywords: Energy, Boron, Hydrogen, Nuclear Fusion, Türkiye				

GİRİŞ

Enerji, yeryüzündeki tüm devletler için olmazsa olmaz derecede öneme sahip bir kaynak olma özelliği taşımaktadır. Bu yüzden dünya genelindeki devletler tarihin her dönemlerinde enerji kaynaklarına sahip olabilme konusunda kıyasıya yarış içerisine girmiş hatta bu yüzden de önemli savaşlar yaşanabilmiştir. Günümüzde de dolaylı olarak bu savaşlar devam etmektedir. Çünkü enerji kaynakları ekonomik zenginliğin yanı sıra endüstriyel üretimlerin de önemli girdileri arasında yer almaktadır. Bu sayede enerji kaynaklarına önemli ölçüde sahip olan ülkeler bunu kendi teknolojileriyle birleştirdiğinde mevcut üretimlerini, enerji kaynaklarına sahip olmayan ya da çok düşük düzeyde sahip olan ülkelere kıyasla daha ucuza mal ederek yüksek katma değer sağlayabilmektedirler.

Dünya genelindeki enerji kaynakları, dünyanın farklı dönemlerine damgalarını vurmuşlardır. Enerji kaynağı olarak; insanlık tarihinin başlarında odun, tezek, su gücü vb., sanayi devrimi dönemlerinde kömür, otomobilin icadından sonra petrol ve sonrasında (yakın geçmişte) doğal gaz dünya genelinde en çok tüketilen enerji kaynakları olmuşlardır. Ancak bu enerji kaynaklarının hem küresel ısınmaya neden olan yüksek karbon salınımlarına sebebiyet vermesi hem de rezerv ömürlerinin yakın gelecekte tükenecek olması dünya devletlerini ihtiyacı olan enerjilerini farklı enerji kaynaklarından temini konusunda arayışa itmektedir. Bunların başında da günümüzde de kullanımda olan yenilenebilir enerji kaynakları ve yakın gelecekte küresel çapta daha fazla önem kazanması beklenen hidrojen ve nükleer füzyon enerjileridir.

Bunlara ek olarak dünya genelinde yapılan çalışmalar neticesinde bor minerallerinin ve buna bağlı enerji teknolojilerinin de yukarıda belirtilen enerji kaynaklarına iyi birer alternatif oluşturduğu saptanmıştır. Bor minerelleri ve buna bağlı enerji teknolojileri, enerji kaynağı olarak tek başlarına kullanılabildiği gibi geleceğin enerji kaynakları arasında gösterilen hidrojene dönüşümüne ve nükleer füzyon üretimine de olanak tanımaktadır. Bu durum, borun önemini bir kat daha arttırmaktadır. ABD, enerji teknolojilerinde kullanımları nedeniyle bor madenini geleceğin enerji kaynaklarından biri olarak görerek stratejik maden olarak ilan etmiş ve bor tedarikinin hemen hemen

tamamını dışarıdan temin etme yoluna gitmiştir. Bunun da 2019 yılı itibariyle %80'ini Türkiye'den temin etmiştir.

Bu durum yani borun enerji bazındaki kullanılması, küresel rezervin %73'ünü elinde bulunduran Türkiye açısından mevcut enerji tedarikinin sağlanabilmesi açısından önemli fırsat olarak ön plana çıkmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmanın birinci bölümünde enerjinin genel tanımı yapıp dünya genelinde var olan enerji kaynaklarının genel itibariyle görünümü ele alınmış ve bor enerjisiyle ilintili olan hidrojen ve nükleer füzyon enerjilerinin üretim, depolama ve maliyetleri konusunda bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, Türkiye'nin mevcut enerji görünümü ele alınmış bu doğrultuda rezerv, kapasite, üretim, talep ve ticaret yapıları ve hidrojen ve nükleer fisyon enerjilerine dayalı yapılan-yapılmakta olan çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, birinci bölümde yer verilen dünya enerji kaynaklarının projeksiyonel görünümü, hidrojen ve nükleer füzyona dayalı enerji uygulamaları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, bor madeni hakkında genel bilgiler verilip, mevcut ve enerji kaynağı bazındaki kullanım alanlarına değinilmiştir. Bununla birlikte Türkiye'nin mevcut enerji görünümü doğrultusunda enerji kaynağı bazında sodyum borhidrit (NaBH_4), magnezyum diborit (MgB_2) mineralleri ve bor-11 (B-11) izotopu ele alınmış ve Türkiye'nin mevcut bor kapasite, üretim, tüketim ve ticaret yapıları incelenmiştir.

Son bölümde ise, beşinci bölümde belirlenmiş olan bor minerallerin ve izotopunun bir enerji kaynağı olarak dünya genelinde ve Türkiye'de yapılan çalışmalardan bahsedilmiş ve Türkiye'de bu türden bor ürünlerinin alternatif bir enerji kaynağı olarak uygulanabilirliğine ve sürdürülebilir şekilde kullanılabilirliğine ilişkin analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın Konusu

Çalışmanın konusu, Türkiye’de bor madeninin alternatif bir enerji kaynağı olarak incelenmesi üzerine olacaktır.

Çalışmanın Önemi

Bu çalışma, dünyadaki ve Türkiye’deki mevcut enerji görünümüleri doğrultusunda Türkiye’nin mevcut enerji ihtiyacını alternatif ve yerli kaynak olan bordan karşılanmasına yönelik detaylı analizini içermesi açısından önem teşkil etmektedir.

Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de borun alternatif bir enerji kaynağı olarak uygulanabilirliğini ve kullanılabilirliğini araştırmaktır.

Çalışmanın Yöntemi

Çalışmada, dünyadaki ve Türkiye’deki mevcut enerji görünümüleri doğrultusunda Türkiye’de borun alternatif enerji kaynağı olarak uygulanabilirliğine ve sürdürülebilir bir şekilde kullanımına yönelik olarak; Türkiye’nin mevcut bor üretim kapasitesi, üretimi, tüketimi, ihracat ve Ar-Ge yapılarının, borun yakıt maliyetleri konusunda rekabetçilik düzeylerinin ve nükleer füzyona dayalı elektrik üretim potansiyellerinin tespiti için 2002-2019 arası dönemde Millennium Cell firması, ITER, Akkuyu Nükleer Güç Santrali ve Türkiye’deki araç ve yakıt verilerinden hareketle grafiksel ve matematiksel yöntemler kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 1: ENERJİNİN TANIMI, KAPSAMI VE DÜNYA'DAKİ MEVCUT ENERJİ KAYNAKLARI GÖRÜNÜMLERİ

1.1. Enerjinin Tanımı ve Kapsamı

Enerji, sabit bir tanımı olmamakla birlikte genel olarak hareketi sağlayan güç anlamına gelmektedir (Doğanay, 1998). Bunun dışında enerji farklı şekillerde de tanımlanabilmektedir.

Kent'e (1916) göre enerji bir maddenin doğadaki tüm olaylar karşısında bir durumdan başka bir duruma geçişi olarak tanımlanmaktadır. Finegold - Trumper (1989); Watts (1983) enerjiyi, hayatı kolaylaştıran bir yakıt türü olmasının yanında insanlarla ilişkili olan, olayların meydana gelmesine neden olan, belirli süreçler tarafından yaratılabilen ve bir sistemden diğerine aktarılabilen bilimsel bir anlayış olarak tanımlamışlardır.

Abdullah (2013) ise enerjiyi;

$$E = \text{Biten iş} = \int p dt \quad (1.1)$$

olarak ifade etmiştir. Burada E = toplam enerjiyi, $\int p dt$ = gücün belirli bir zaman aralığındaki toplam değişimini temsil etmektedir. Yani enerjiyi, biten iş veya belirli bir zaman aralığındaki toplam güç değişimi şeklinde tanımlamıştır.

Enerjinin yukarıda belirtildiği üzere sabit bir tanımı olmamakla birlikte sabit bir kullanımı da yoktur. Enerji, bir güç kaynağı olarak farklı formatlarda tanımlanabilmektedir. Enerji, bir işin gerçekleşip gerçekleşmeme durumuna göre potansiyel enerji - kinetik enerji ve kaynağının kıt olup olmamasına göre yenilenebilir enerji -yenilenemeyen enerji olarak çeşitlenebilmektedir. Potansiyel enerji, bir maddenin mevcudiyetinde var olan enerjinin enerji üretebilecek kapasitesi olup da enerji üretmemesi durumunu ifade ederken kinetik enerji, maddenin mevcudiyetinde olan enerjinin durağan durumdan sıyrılıp harekete geçme yani bir işi gerçekleştirme durumunu ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji, kaynağını doğadan alan ve tükenmeye tabii olmayan enerji olarak tanımlanırken (güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyoenerji, hidro enerji ve jeotermal enerji), yenilenemeyen enerji ise yerin altından direkt ve maden olarak çıkarılabilen ya da enerji kaynaklarının

birbirlerine dönüşümü suretiyle mevcudiyet kazanabilen enerjiler olarak tanımlanabilmektedir (petrol, doğalgaz, kömür, hidrojen enerjisi, nükleer enerji, bor vb.). Yenilenemeyen enerjiler de kendi aralarında içeriğinde karbon bulundurup bulundurmamalarına göre ayrışabilmektedir. İçeriğinde karbon bulunanlar fosil enerji grubunu oluştururken (petrol, doğalgaz ve kömür), içeriğinde karbon bulunmayanlar ise alternatif enerji kaynakları grubunu oluşturmaktadır (nükleer enerji, hidrojen enerjisi, bor vb.).

Enerji, geçmişten günümüze geçen süreç içerisinde dünyaya farklı dönemler içerisinde damgasını vurmuş bir kaynak olma özelliği taşımaktadır. İnsanlık tarihinin başlangıcından elektriğin icadına, sanayi devriminden otomobil ve onu takiben içten yanmalı motorların icadına ve sonrasında günümüze dek uzanan süreç içerisinde varlığını evrilerek hissettirmiştir. İnsanlığın başlangıcı ve devam eden süreçte kas, hayvan, odun ve su gücüne dayalı enerji kullanımı, sanayi devrimiyle birlikte kömürün buharlı makinelerde kullanımı ile yerini kömüre bırakmıştır. Daha sonra otomobilin ve içten yanmalı motorların icadı ile petrolün bu alanda kullanımı petrolün dünya sahnesine çıkışının yolunu açmıştır.

Tüm bu süreçler boyunca özellikle de sanayi devrimi sonrasında enerji kaynaklarının endüstriyel çapta önem kazanması, dünya ülkelerini bu enerji kaynaklarına sahip olma konusunda bir dizi yarışın içerisine sokmuş, bu yarış da birçok küresel ölçekli savaşları (Birinci ve İkinci Dünya Savaşı, Arap-İsrail Savaşları, Kore ve Küba Krizleri, Körfez Savaşları ve günümüzde Orta Doğu'da yaşanan kaoslar) beraberinde getirmiştir (Sevim, 2012).

Bunların yanında enerji, toplumların ihtiyaç duyduğu mal ve hizmetlerin daha düşük ekonomik şartlarla üretilerek toplumların refah seviyelerinin yükseltilmelerine olanak sağlamaktadır (Bulut vd., 2014). Ayrıca enerji, üretim sürecinde sermaye ve emek gibi üretim faktörlerinin yanında bir girdi olarak kullanılarak, yatırımları daha verimli hale getirmekte bu da hem teknolojik bir süreç içerisinde emek verimliliğinin artırılmasına hem de emeğin ikame edilebilmesine olanak sağlamaktadır (Bilginoğlu, 1991; Ghali - Sakka, 2004). Teknolojinin desteklediği işgücü verimliliğinde meydana gelen artışlar,

geleneksel ve daha fakir ekonomilere kıyasla gelişmiş sanayileşmiş ekonomilerde birim ekonomik çıktı başına daha az enerji kullanımına neden olmaktadır. Avrupa'nın gelişmiş 27 ekonomisinin birim ekonomik çıktı başına enerji kullanımı 0,14 ayak parmağı/bin \$ dolaylarında iken Afrika'nın birim ekonomik çıktı başına enerji kullanımı 0,26 ayak parmağı/bin \$ dolaylarında olmaktadır. (Bergasse vd., 2013). Gelişmiş sanayileşmiş ülkelerin birim ekonomik çıktı başına düşük enerji kullanımı bu ekonomiler için önemli maliyet avantajları yaratmakta, bu ekonomilerin uluslararası konjonktürde önemli rekabet güçleri elde etmelerine neden olmaktadır.

Enerjinin bu denli faydalı olalarına karşın özellikle fosil enerji kaynakları grubu özellikle de petrol ve kömürün aşırı tüketimi karbon emisyonu da denilen sera gazı salınımı beraberinde getirerek küresel ısınmaya sebebiyet vermekte, bu da dünya ülkelerini karbon emisyonu ile mücadele kapsamında alternatif enerji politikalarına doğru yönlendirmektedir. Bu bölümde dünyadaki ve Türkiye'deki mevcut enerji kaynaklarının görünümü üzerinde durulacaktır.

1.2. Dünya'daki Mevcut Enerji Kaynaklarının Görünümleri

1.2.1. Fosil Enerji Kaynakları

1.2.1.1. Petrol

Petrol terim olarak Latince kökenli olup, taş anlamına gelen petra ve yağ anlamına gelen oleum kelimelerinin birleşmesiyle oluşmuştur (Doğanay vd., 2003).

Petrol, kimyasal olarak bünyesinde karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve kükürt (S) gibi elementleri bulundurmaktadır (Tablo 1). Petrolün bünyesinde yer alan bu elementlerden karbon (C) ve azotun (N), yanma esnasında sera gazı salınımına sebebiyet vermesi petrolün kullanımı konusunda olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

Tablo 1: Petrolün Yapısında Bulunan Başlıca Kimyasallar ve Bunların Kütlece Ağırlıkları (%)

Kimyasallar	Kütlece Ağırlıkları
Karbon	83-87
Hidrojen	10-14
Azot	0,1-2
Oksijen	0,05-1,5

Kükürt	0,05-6

Kaynak: Uysal, 2006.

Petrol, çeşitli hidrokarbonlardan da meydana gelmektedir. Bu hidrokarbonlardan doymuş olanlara parafin, doymamış olanlara da siklo-parafin (naftenler) ve aromatik denilmektedir. Hidrokarbonlar, içerdiği karbondan oranlarına göre doğal gaz, benzin, gaz yağı, dizel vb. şekilde ayrışabilmektedir. (Brown - Skipsey, 1986; Sonel, 1997). Petrol ürünleri ise, yapılarında bulunan hidrokarbon bileşiklerinin damıtılmasıyla (rafine edilmesiyle) benzin türlerine, fuel-oil, LPG, kerosen, asfaltit vb. dönüşmektedir.

Petrolün ve bazı enerji kaynaklarının (doğal gaz vb.) ticari değerlerini etkileyen önemli kısıtlar vardır. Bunlardan bazıları; gravite (akışkanlık derecesi), oktan sayısı, ısı değeri ve hava fazlalık katsayısıdır. Gravite, bir enerji kaynağının kalitesini belirleyen önemli göstergeler arasında sayılabilmektedir. Gravite, bir enerji kaynağının özgül ağırlığına bağlı olarak değişebilmekte, özgül ağırlık da sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Sıcaklık arttıkça enerji kaynağının özgül ağırlığı artmak bu da gravite'yi arttırmaktadır. Gravite, bir enerji kaynağının taşınması açısından oldukça önem arz etmektedir. Boru hatları vasıtasıyla taşınan enerji kaynağının gravitesinin düşük olması, taşınma esnasında bu enerji kaynağının borulardan daha zor bir şekilde akmasına sebebiyet vermektedir. Oktan sayısı, özellikle motorlu araçlar açısından önem arz etmektedir. Oktan sayısının yüksek oluşu araçlar soğuk havalarda daha verimli çalışmasını, buji aksamının daha uzun ömürlü olmasını ve araç soğutma sıvısı olan yağlamanın daha efektif bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Diğer bir önemli faktör olan hava fazlalık katsayısı (λ) ise; yanma olayının gerçekleşme süresi içerisindeki gerçek hava miktarının teorik hava miktarına olan oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Yanma olayının tam olarak gerçekleşmesi için yanma esnasındaki mevcut gerçek hava miktarının teorik hava miktarından fazla olması gerekmektedir. Aksi takdirde yani yanmanın tam olarak gerçekleşmemesi durumunda ise aracın daha fazla yakıt yakmasına ve egzozundan daha fazla zararlı gazların açığa çıkmasına neden olmaktadır (Acaroğlu, 2003; Doğanay, 1998; İlbaş - Yılmaz, 2002).

Tablo 2: Bazı Petrol Ürünlerinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Parametreler	Benzin	Dizel	LPG	
			Propan	Bütan
Molekül Ağırlığı	91.4	170	–	–
Sıvı Haldeki Özgül Ağırlığı (kg/dm³)	0.73	0.83	–	–
Isıl Değeri (MJ/kg)	43.4	43.1	46.3	45.6
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	0.29-1.67	0.48-1.35	–	–
Tutuşma Aralığı (%)	1.3-7.6	–	1.9-12.4	1.5-9.5
Oktan Sayısı (ROS)	91-100	–	102	85

Kaynak: Acaroğlu, 2003.

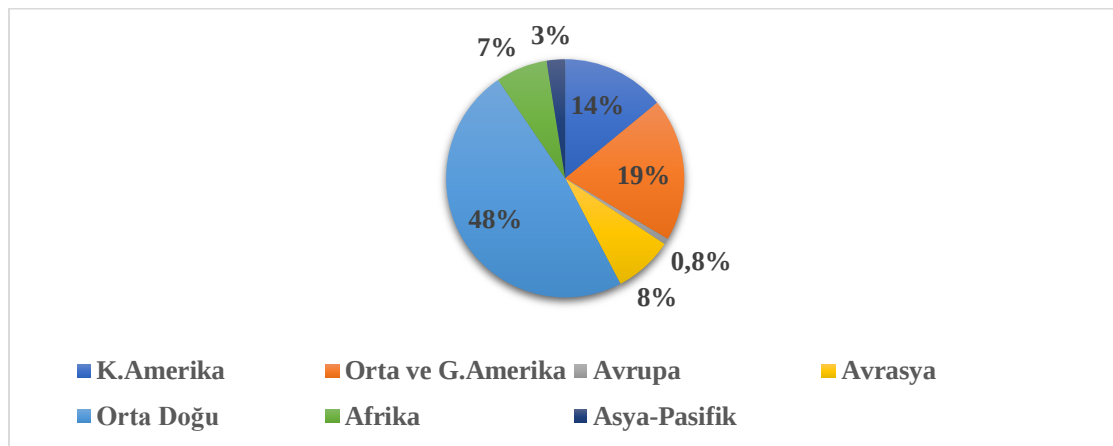
Bazı petrol ürünlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri mukayese edildiğinde özgül ağırlık bazında dizel yakıtın benzine, ısıl değer bazında ise benzinin dizel yakıtı göre daha avantajlı bir durum teşkil ettiği Tablo 2’de yer alan veriler doğrultusunda belirgin bir şekilde görülmektedir. Tablo 2’de ki veriler doğrultusunda, dizel yakıtın özgül ağırlığının benzine göre yüksek olması dizel yakıtın gravitesinin yani yoğunluğunun benzine göre düşük olmasına neden olmaktadır. Bu durum, dizel yakıtı benzine göre daha akışkan hale getirmekte ve taşınması yönünden bir avantaj teşkil etmektedir. Yanma esnasında açığa çıkan enerji bakımından arada çok küçük farklar olmasına rağmen benzinin dizele yakıtı göre bir adım önde olduğu görülmektedir. Benzin ve dizel yakıt arasında hava fazlalık katsayıları mukayese edildiğinde ise burada değişken durumlar karşımıza çıkmaktadır. Hava fazlalık katsayısının 1’in altında olan değerler için dizel yakıtın, 1’in üstünde olan değerler için ise benzinin daha avantajlı olduğu görülmektedir. LPG’nin ısıl değerleri ve oktan sayıları bakımından özellikleri mukayese edildiğinde ise, propanın gerek yanma sırasında daha fazla enerji açığa çıkarması gerekse de oktan sayısının yüksek olması nedeniyle de aracın daha verimli çalışmasına olanak sağlaması propanı, her iki durumda da bütana karşı üstün kılmaktadır. Bunun yanında LPG, ısıl değer bakımından hem benzine hem de dizel yakıtı göre avantajlı bir durum teşkil ederken oktan değerleri bakımından ise propanın benzine ve dizele göre avantajlı, bütanın ise bu iki yakıtı karşı bir dezavantajlı bir durum teşkil etmektedir.

Petrolün Kullanım Alanları

Petrol, kullanım yeri bakımından taşımacılıktan sanayiye, konuttan enerji dönüşümüne kadar endüstriyel ölçekli pek çok alanda kendini gösterebilmektedir. Petrol, taşımacılık sektöründe direk yakıt olarak, petro kimya endüstrisinde; gübre, elyaf, kauçuk, naylon, plastik, böcek ilacı, kozmetik ürünleri, boya gibi ürünlerin yapımında hammadde olarak, enerji dönüşümünde, elektrik santrallerinde elektrik üretiminde, konutlarda ise aydınlatma ve ısınma amaçlı olarak kullanılabilir (Fagan, 1991).

Petrol Rezervleri ve Kullanım Ömürleri

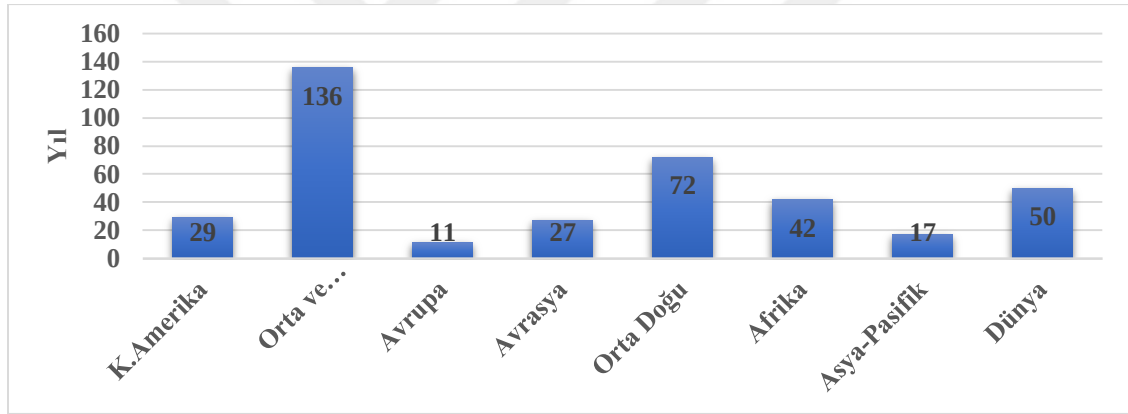
Dünya petrol rezervleri 2018 yılı itibariyle toplamda 1.730 milyar varil olarak gerçekleşmiştir. Toplam rezervin yarıya yakını ise Orta Doğu'da bulunmaktadır. Orta Doğu, dünya petrol rezervlerinin 836 milyar varil ile %48'ini oluştururken, Suudi Arabistan 297 milyar varil ile Orta Doğu bölgesinde en fazla petrol rezervine sahip ülke konumundadır. Orta Doğu'yu, 325 milyar varillik toplam petrol rezervi ve %19'luk toplam rezerv oranıyla Orta ve Güney Amerika bölgesi izlemektedir. Orta ve Güney Amerika'da da Venezuela 303 milyar varil toplam petrol rezervi ile en fazla rezerve sahip ülke olmaktadır. Orta Doğu, Orta ve G. Amerika'dan sonra en fazla petrol rezervine sahip bölgeler ise, 237 milyar varil ve %14'lük toplam rezerv oranı ile Kuzey Amerika, 145 milyar varil ve %8'lik toplam rezerv oranı ile Avrasya, 125 milyar varil ve %7'lik toplam rezerv oranı ile Afrika, 48 milyar varil ve %3'lük toplam rezerv oranı ile Asya-Pasifik ve 14 milyar varil ve %0.8'lik toplam rezerv oranı ile Avrupa bölgesi takip etmektedir (BP, 2019).



Grafik 1: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Petrol Rezervlerinin Dağılımları

Kaynak: BP, 2019 ‘Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya genelinde var olan endüstrileşme ve teknolojik rekabet yüksek enerji talebini de beraberinde getirmektedir. Bu yüksek enerji talebi de zaman içerisinde mevcut enerji kaynaklarının yok olmalarına neden olmaktadır. 2018 yılı verilerine göre dünya petrol rezervlerinin, bölgesel anlamda farklılıklar göstermesine rağmen dünya genelinde ortalama 50 yıl içerisinde tükeneyeği öngörülmektedir (Grafik 2). Dünya petrol rezervlerinin bölgesel anlamda farklılık göstermesine bölgelerin sahip oldukları rezerv miktarının yanında tüketim davranışları da neden olmaktadır. Buna göre K. Amerika’da ABD’nin, Asya- Pasifik’te Çin ve Hindistan’ın, Avrasya’da Rusya’nın ve Avrupa’da da Almanya’nın aşırı petrol tüketimleri bu bölgelerde rezerv ortalamalarının dünya ortalamasının altında kalmasına neden olmuştur (BP, 2019).

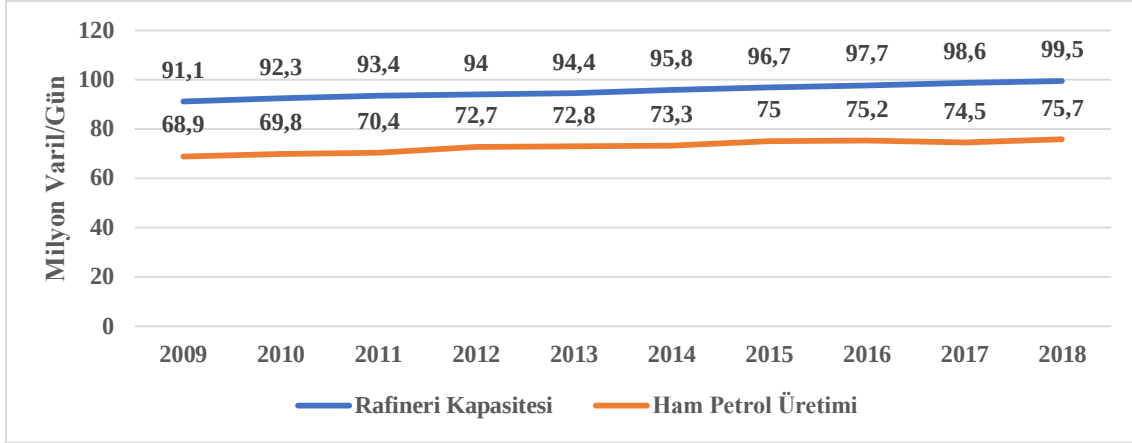


Grafik 2: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Petrol Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması

Kaynak: BP, 2019’ Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Petrol Kapasiteleri ve Üretimleri

Dünya petrol rafineri kapasitelerine ve ham petrol üretimlerine bakıldığında küresel çapta ham petrol rafineri kapasiteleri 2018 yılında 2017 yılına kıyasla %0,9 artarak yaklaşık 100 milyon varil/gün’e, ham petrol üretimleri %1,6 oranında artarak 76 milyon varil’gün’e ulaşmıştır. 2009 yılından 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde ise dünya ham petrol rafineri kapasiteleri toplamda %9, ham petrol üretimleri de toplamda %10 oranında artış göstermiştir (Grafik 3).



Grafik 3: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Toplam Petrol Rafineri Kapasiteleri ve Ham Petrol Üretimleri

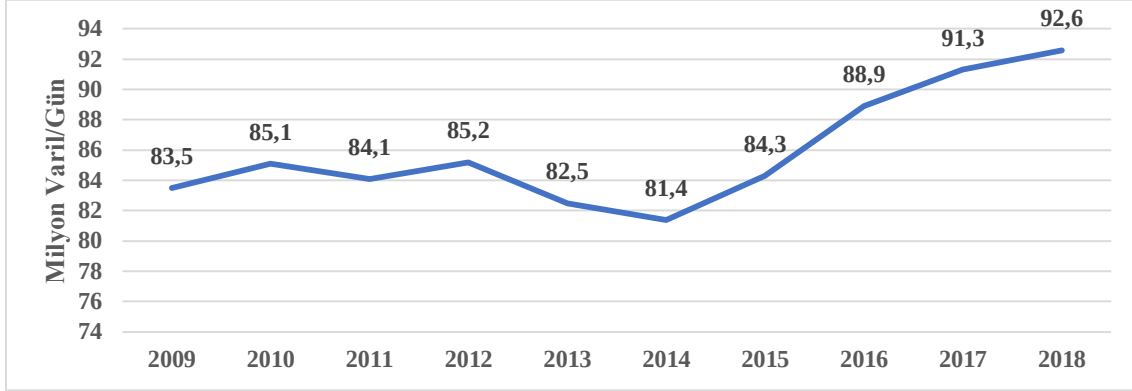
Kaynak: OPEC, 2014; OPEC, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu dönem içerisinde ham petrol rafineri kapasitelerinde bölgesel bazda en yüksek artış toplamda %28 (7 milyon varil/gün'den 9 milyon varil/gün'e) ile Orta Doğu'da ve yine toplamda %24 (27 milyon varil/gün'den 34 milyon varil/gün'e) ile Asya-Pasifik bölgelerinde meydana gelmiştir. Asya-Pasifik, aynı zamanda küresel çapta en yüksek ham petrol rafineri kapasitesine sahip bölgesi konumundadır. Ham petrol üretimlerinde ise, yine bu dönem içerisinde en yüksek artış toplamda %86 (7 milyon varil/gün'den 12 milyon varil/gün'e) ile K. Amerika'da ve toplamda %23 (21 milyon varil/gün'den 26 milyon varil/gün'e) ile Orta Doğu'da yaşanmıştır. Orta Doğu da, küresel çaptaki en yüksek ham petrol üretimine sahip bölgesi konumundadır. Bu dönem içerisinde G. Amerika'nın Avrupa'nın, Afrika'nın ve Asya-Pasifik'in ham petrol üretimleri ise toplamda sırasıyla %15, %25, %18 ve %8 oranında azalma göstermiştir (OPEC, 2014; OPEC, 2019).

Petrol Ticareti

Dünya toplam ham petrol ticaret hacmi (ihracat + ithalat) 2018 yılı itibariyle toplamda 92,6 milyon varil/gün olarak gerçekleşmiştir (Grafik 4). Bunun 45,8 milyon varil/gün'ünü ham petrol ihracatı oluştururken, 46,8 milyon varil/gün'ünü de toplam ham petrol ithalatı oluşturmuştur. Toplam petrol ihracatının %54'ü OPEC tarafından gerçekleştirilirken toplam petrol ithalatında ise, Asya Pasifik ülkeleri küresel toplam petrol ithalatının %46'sını, Batı Avrupa ülkeleri toplam ithalatın %24'ünü ve K. Amerika ülkeleri de toplam ithalatın %14'ünü oluşturmuştur (OPEC, 2019).

2000-2018 arası dönemde küresel bazdaki ham petrol ticaret hacmi toplamda %11 oranında artmıştır (Grafik 4).



Grafik 4: 2009 -2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Toplam Petrol Ticaret Hacmi

Kaynak: OPEC, 2014; OPEC, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

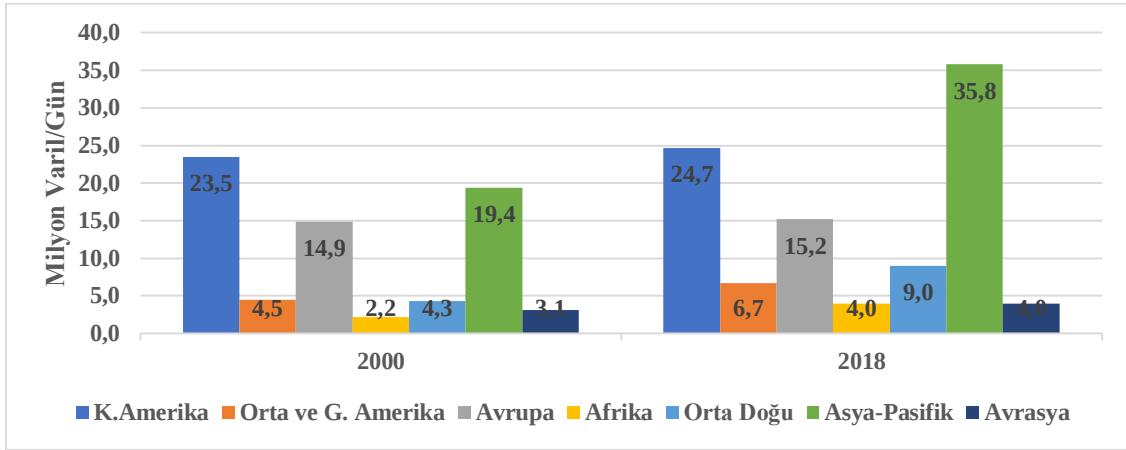
Petrol Talebi ve Yatırımları

Dünya petrol talebi, 2018 yılı itibariyle toplamda 98,7 milyon varil/gün olarak gerçekleşmiştir. 2000 yılında 2018 yılına kadar olan süre içerisinde de toplamda 21,4 milyon varil/gün artmış, yıllık bazda ortalama %1,5 toplamda da %28 büyümüştür (IEA, 2018).

Dünya petrol talebinin bölgesel dağılımlarına bakıldığında 2018 yılı itibariyle en çok petrol talebi yaklaşık 36 milyon varil/gün ile Asya-Pasifik bölgesinde gerçekleşmiştir. Asya Pasifik bölgesi bu dönemde küresel toplam petrol talebinin %36'sını oluşturmuştur. Asya Pasifik bölgesinde Çin ve Hindistan bu %36'lık artışın %19'unu oluşturmuştur. Asya Pasifik'ten sonra en fazla petrol talebi, yaklaşık 25 milyon varil/gün talep miktarı ve %25 toplam talep oranıyla K. Amerika bölgesinde meydana gelmiştir. K. Amerika'da %25'lik toplam petrol talebinin %21'i ABD tarafında gerçekleştirilmiştir (BP, 2019). Bu bölgeleri de sırasıyla 15 milyon varil/gün petrol talebiyle Avrupa, 9 milyon varil/gün petrol talebiyle Orta Doğu, 7 milyon varil/gün petrol talebiyle Orta ve G. Amerika ve 4'er milyon varil/gün petrol talebiyle Afrika ve Avrasya bölgeleri takip etmiştir (Grafik 5).

2000-2018 arası dönemde bölgesel bazda petrol talebinde en yüksek artış Asya-Pasifik bölgesinde meydana gelmiştir. Asya-Pasifiğin bu dönemdeki toplam petrol talebi

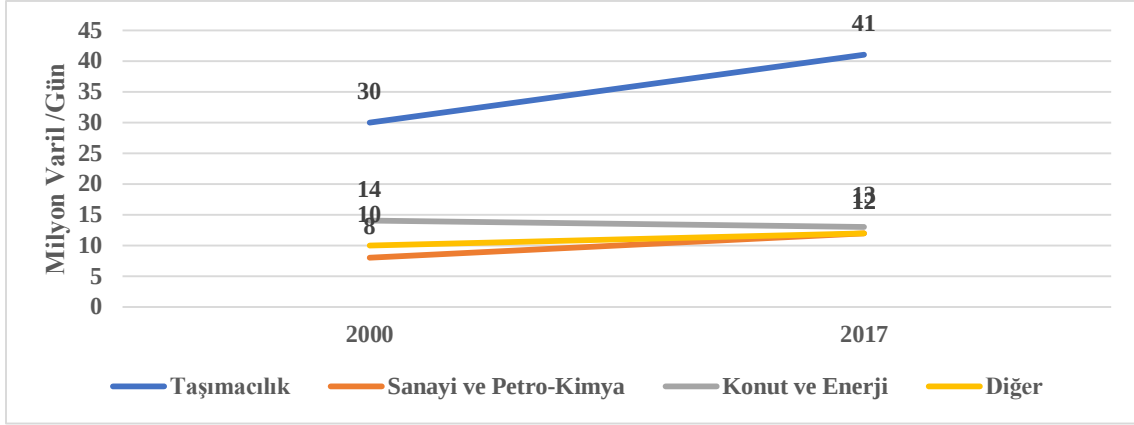
yaklaşık 16 milyon varil/gün artarak %85 oranında büyümüşür. Asya Pasifik'ten sonraki yüksek artış yaklaşık 5 milyon varil/gün ile Orta Doğu'da yaşanmıştır. Orta Doğu bölgesinin petrol talebi bu dönem içerisinde toplamda %109 oranında büyümüşür. Diğer bölgelerde ise; Afrika'nın toplam petrol talebi 1,8 milyon varil/gün artarak %82 büyürken, Orta ve G. Amerika %49, Avrasya %29, K. Amerika %5 ve Avrupa %2 oranında büyümüşür (Grafik 5).



Grafik 5: 2000-2018 Yılları Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talebi

Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

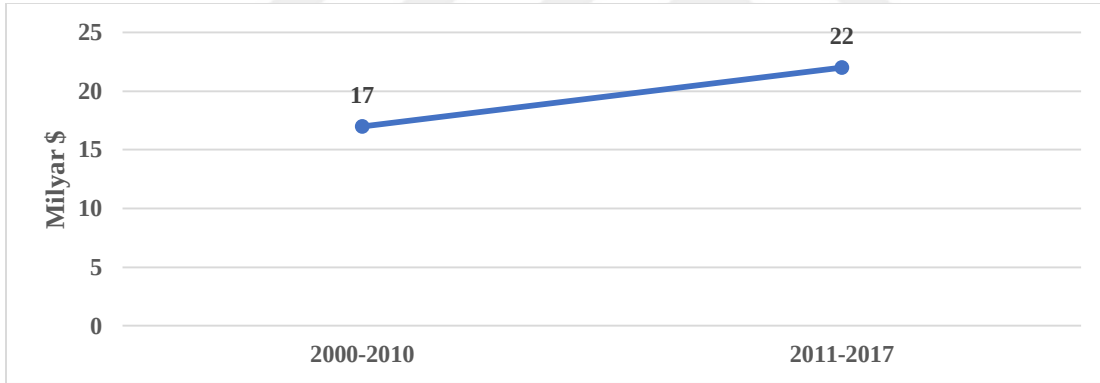
Küresel petrol talebinin sektörel bazda dağılımlarına bakıldığında ise, 2017 yılında küresel petrol talebi en fazla taşımacılık sektöründe meydana gelmiştir. Taşımacılık sektörü, 2017 yılında günlük 41 milyon varil ile sektörel bazdaki toplam talebin %53'ünü oluşturmuştur. Taşımacılık sektöründen sonra yine bu yıl içerisindeki petrolün en fazla talep edildiği sektör, konut ve enerji dönüşüm sektörleri olmuştur. Bu sektörler, toplam petrol talebinin %17'sini meydana getirmiştir. Sanayi ve Petro kimya ve diğer sektörler ise sektörel talepte %15'er pay almışlardır. Yine sektörel bazda 2000-2017 yılları arası dönemde en fazla talep artışı yaklaşık %40 ile taşımacılık sektöründe gerçekleşmiştir. Taşımacılık sektöründen sonra, aynı dönem içerisinde en fazla büyüme %23 ile sanayi ve petro kimya sektörlerinde meydana gelmiştir. Bu dönemde, enerji dönüşüm ve konut sektöründe ise petrol talebi %13'lük bir gerileme meydana gelmiştir (Grafik 6).



Grafik 6: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Geneline Petrol Talebinin Sektörel Görünümleri

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel çapta petrol enerjisine yıllık bazda yapılan yatırımlara bakıldığında ise 2000-2010 arası 17 milyar \$ olan yatırımların 2011-2017 arasında 22 milyar \$'a çıktığı görülmektedir (Grafik 7).



Grafik 7: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Geneline Yıllık Bazda Petrole Yapılan Yatırımlar

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

1.2.1.2. Doğal Gaz

Doğal gaz; genelde petrol kökenli bir enerji kaynağı olup yapısında metan, propan, etan, hidrokarbonlar ve az miktarda oksijen, azot ve karbondioksit bulunmakla birlikte yerin alt katmanlarında milyonlarca yıl üst üste birikmiş fosil kalıntıların bir takım fiziksel ve kimyasal olaylara uğraması sonucunda meydana gelmiştir (Bayraç, 2018; TMMOB, 2006). Doğal gazın yapısında bulunan kimyasalların kütlece ağırlıkları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3: Doğal Gazın Yapısında Bulunan Başlıca Kimyasallar ve Kütlece Ağırlıkları

Kimyasallar	Kütlece Ağırlıkları (%)
Metan	91-99
Etan	0,41-8
Propan	0,14-0,27
Bütan	0-0,06
Ağır Hidrokarbonlar	0,02-0,03
Karbondioksit	0-0,03
Azot	0,03-0,81

Kaynak: Bulundu - Say, 2016.

Doğal gaz, endüstriyel ölçekli olarak; çevrim santrallerinde elektrik enerjisi üretiminde, kimya, tekstil ve demir-çelik sanayisinde ürün imalatında, ısınma amaçlı olarak konutlarda ve direk yakıt olarak ise taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Doğal gaz üreticiden nihai tüketiciye ise iki şekilde ulaşabilmektedir. Bunlardan ilki boru hatlarıyla ikincisi tankerler aracılığıyla olmaktadır. Doğal gaz, ana kara ülkelerine yani denizle bağlantısı olmayan ülkelere boru hatlarıyla, denizaşırı ülkelere ise tankerler yardımıyla ulaştırılabilmektedir. Tankerler aracılığıyla yapılan taşımacılıkta doğal gaz sıvılaştırılmış bir şekilde taşınmakta ve bu taşıma süresi boyunca sıvı olarak kalabilmesi için ise çeşitli soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da tankerlerle yapılan taşımacılığın boru hatlarına göre daha maliyetli hale getirmektedir (Bayraç, 2018).

Tablo 4: Doğal Gazın Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Parametreler	Ağırlıkları
Molekül Ağırlığı	16.4
Sıvı Haldeki Özgül Ağırlığı (kg/dm³)	0.424
Isıl Değeri (MJ/kg)	50.8
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	0.59-2
Tutuşma Aralığı (%)	5-15.4
Oktan Sayısı (ROS)	130

Kaynak: Acaroğlu, 2003.

Tablo 4’te doğal gazın birtakım fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Bu özelliklere göre doğal gaz enerji kaynağı olarak petrol ile kıyaslandığında oldukça avantajlı bir konuma sahiptir. Isıl değer bakımından doğal gazın, kg başına 50.8 MJ değere sahipken petrol ürünleri olan benzinin 43.4 MJ, dizelin 43.1 MJ, propanın 46.3 MJ ve bütanın 45.6 MJ değerinde bir enerjiye sahip olması doğal gazın yanma esnasında petrol ürünlerine karşı kg başına daha yüksek enerji açığa çıkardığını göstermektedir. Bunun yanında doğal gazın oktan ve hava fazlalık katsayıları da petrole kıyasla daha yüksek seyirler izlemektedir. Doğal gazın oktan sayısı 130 ROS iken benzinin 91-100 ROS, propanın 102 ROS ve bütanın ise 85 ROS civarındadır.

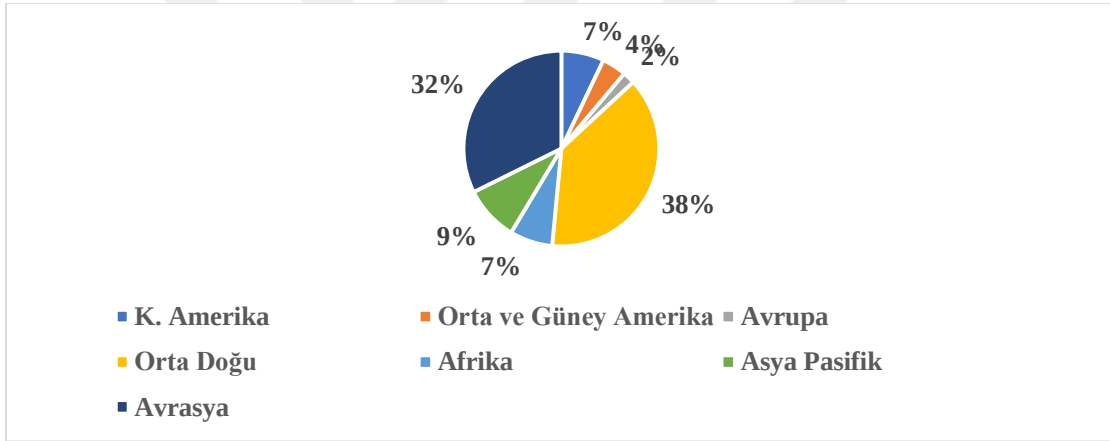
Bu yüksek oktan, doğal gazla çalışan bir aracın petrole çalışan bir araca göre çalışma aksamının daha verimli bir şekilde işlemesine imkan sağlamaktadır. Hava fazlalık katsayısının yüksek oluşu da yanma esnasında yanma olayının daha verimli bir şekilde gerçekleşmesine sebebiyet vererek, yanma sonrasında daha düşük karbon salınımına ve daha uzun ömürlü yakıt kullanımına olanak sağlamaktadır. Ayrıca doğal gazın özgül ağırlığının petrole göre düşük olması akışkanlığının da düşük olmasına neden olduğundan doğal gazın borularda sıvı olarak taşınmaması nedeniyle olumsuz bir durum teşkil etmemektedir (Acaroğlu, 2003).

Doğal Gazın Kullanım Alanları

Doğal gaz, endüstriyel ölçekli olarak; çevrim santrallerinde elektrik enerjisi üretiminde, kimya, tekstil ve demir-çelik sanayisinde ürün imalatında, ısınma amaçlı olarak konutlarda ve direk yakıt olarak ise taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Doğal gaz üreticiden nihai tüketiciye ise iki şekilde ulaşabilmektedir. Bunlardan ilki boru hatlarıyla ikincisi tankerler aracılığıyla olmaktadır. Doğal gaz, ana kara ülkelerine yani denizle bağlantısı olmayan ülkelere boru hatlarıyla, deniz aşırı ülkelere ise tankerler yardımıyla ulaştırılabilmektedir. Tankerler aracılığıyla yapılan taşımacılıkta doğal gaz sıvılaştırılmış bir şekilde taşınmakta ve bu taşıma süresi boyunca sıvı olarak kalabilmesi için ise çeşitli soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da tankerlerle yapılan taşımacılığın boru hatlarına göre daha maliyetli hale getirmektedir (Bayraç, 2018).

Doğal Gaz Rezervleri, Kullanım Ömürleri ve Üretimleri

Dünya kanıtlanmış doğal gaz rezervleri 2018 yılı itibariyle toplamda 197 trilyon m³ olarak gerçekleşmiştir. Bu rezervlerin küresel dağılımlarına bakıldığında ise en fazla doğal gaz rezervi Orta Doğu ve Avrasya bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu iki bölge mevcut küresel toplam doğal gaz rezervlerinin %70'ini elinde bulundurmaktadır (Grafik 8). Bu bölgelerden Orta Doğu'da İran 34 trilyon m³ ve Katar 24 trilyon m³ ile bu bölgede en fazla doğal gaz rezervlerine sahip iki ülke konumundadır. Avrasya'da ise, Rusya 51 trilyon m³ ile dünyanın en fazla doğal gaz rezervine sahip ülkesi iken Türkmenistan 10 trilyon m³'lük doğal gaz rezervine sahip ikinci ülke durumundadır. Bu iki bölgeyi %9'luk rezerv oranı ile Asya-Pasifik ve %7'ser rezerv oranı ile Afrika ve K. Amerika bölgeleri izlemektedir (BP, 2019; OPEC, 2019).



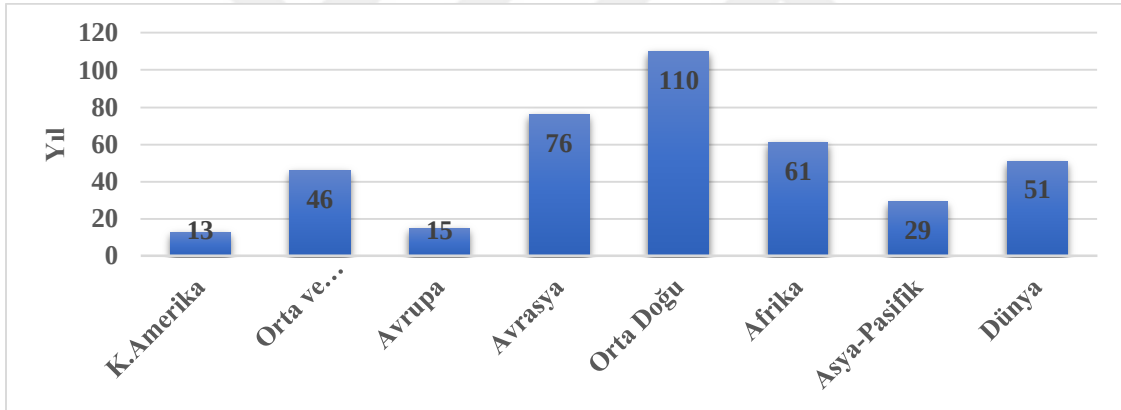
Grafik 8: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Dağılımları

Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel doğal gaz rezervlerinin dağılımlarına ve kullanım ömürlerine bakıldığında ise, dünya genelindeki mevcut toplam doğal gaz rezervlerinin ortalama 51 yıl içerisinde tükeneyeceği beklenmektedir (Grafik 9). Bölgesel anlamda ise mevcut küresel doğal gaz rezervleri çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitliliğin nedeni tıpkı petrolde de olduğu gibi ülkelerin mevcut rezerv yapıları, dünya konjonktürü ve ekonomik gelişmişliğin beraberinde getirdiği enerji tüketim davranışlarıdır. Buna göre Avrasya, Orta Doğu ve Avrupa gibi bölgelerin mevcut rezerv ömürlerinde mevcut rezerv yapılarının büyüklüğü önemli rol oynarken Asya-Pasifik, K. Amerika ve Afrika gibi ülkelerin mevcut rezerv

ömürlerinin tayininde bu bölgelerin içerisinde yer alan ülkelerin mevcut ekonomik yapılarının beraberinde getirdiği tüketim davranışları etkili olmuştur.

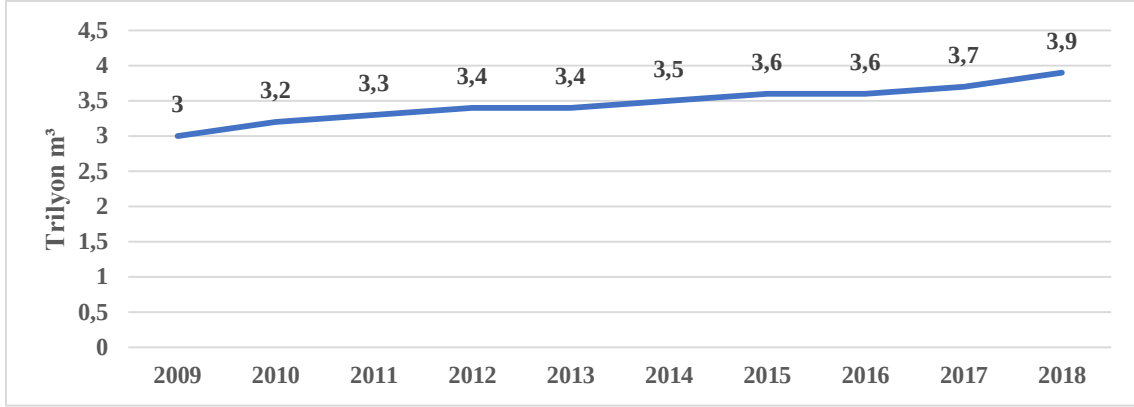
Dünya'nın en fazla doğal gaz rezervine sahip iki bölgesi olan Avrasya'nın ve Orta Doğu'nun (Grafik 8) aynı zamanda en yüksek rezerv ömürlerine (76 ve 110 yıl) de sahip iki bölge olması ve dünyanın en az doğal gaz rezervine sahip olan Avrupa'nın (Grafik 8) da en düşük rezerv ömrüne sahip olması bu durumu açıklar niteliktedir (Grafik 9). Buna karşılık Asya-Pasifik bölgesinin mevcut rezerv oranının Afrika'dan daha fazla olmasına karşın (Grafik 8) rezerv ömrünün düşük olmasının nedeni başta Çin, Japonya, G.Kore gibi dev ekonomilerin aşırı doğal gaz tüketimleridir. Aynı şekilde Afrika ile K. Amerika'nın aynı rezerv oranlarına sahip olmasına (Grafik 9) rağmen K. Amerika'nın Afrika'ya göre daha fazla rezerv ömrünün olması da bu durumun getirdiği bir sonuçtur (BP, 2019).



Grafik 9: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması

Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel bazdaki doğal gaz üretimlerine bakıldığında, 2017 yılına kıyasla 2018 yılında toplamda %5,4 artışla yaklaşık 4 trilyon m³ olarak gerçekleşmiştir. 2009-2018 arası dönemde ise küresel doğal gaz üretimi toplamda %30 oranında artmıştır (Grafik 10). Bölgesel bazda 2018 itibariyle en fazla doğal gaz üretimi K. Amerika, Doğu Avrupa-Avrasya ve Orta Doğu tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bölgeler küresel doğal gaz üretiminin %67'sini oluşturmaktadır. Bu bölgeler de ise en fazla doğal gaz üretimi Rusya, ABD ve İran gibi ülkeler tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu ülkelerin toplam doğal gaz üretimleri küresel doğal gaz üretiminin %46'sını oluşturmuştur (OPEC, 2019).



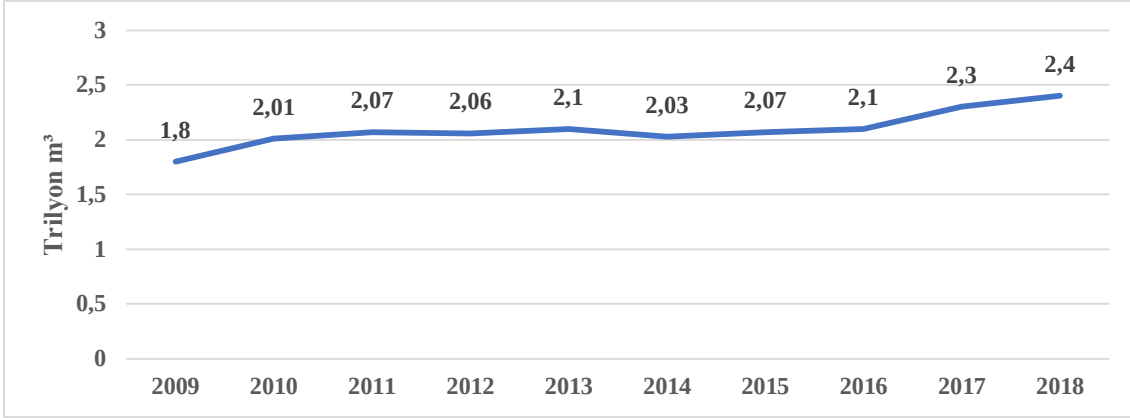
Grafik 10: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Doğal Gaz Üretimleri

Kaynak: OPEC, 2014; OPEC, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Doğal Gaz Ticareti

Dünya genelinde doğal gaz ticaret hacmi, 2018 yılında 2017 yılına göre toplamda %4,4'lük bir artışla yaklaşık 2,5 trilyon m³ olarak gerçekleşmiştir. Bu ticaret hacminin 1,27 milyar m³'ünü ihracat, 1,20 milyar m³'ünü ise ithalat oluşturmuştur. 2009-2018 arası dönemde küresel doğal gaz ticaret hacmi ise toplamda %33 oranında artış göstermiştir (Grafik 11). 2018 yılı itibariyle bölgesel bazda en fazla ihracat Avrupa, Avrasya ve Orta Doğu tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bölgeler, küresel doğal gaz ihracatının %60'ını oluşturmuşlardır. Bu bölgelerde yer alan Rusya, Katar ve Norveç gibi ülkeler ise küresel doğal gaz ihracatının %40'ını gerçekleştirmiştir (OPEC, 2019).

Yine 2018 yılı itibariyle küresel ölçekte en fazla doğal gaz ithalatı Avrupa ve Asya-Pasifik tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bölgeler, küresel doğal gaz ithalatının %75'ini oluşturmuşlardır. Bu bölgeler içerisinde en fazla doğal gaz ithalatı Almanya, Çin ve Japonya gibi ülkeler tarafından meydana gelmiştir. Bu ülkeler, küresel doğal gaz ithalatının %31'ini oluşturmuşlardır (OPEC, 2019).



Grafik 11: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Doğal Gaz Ticaret Hacimleri

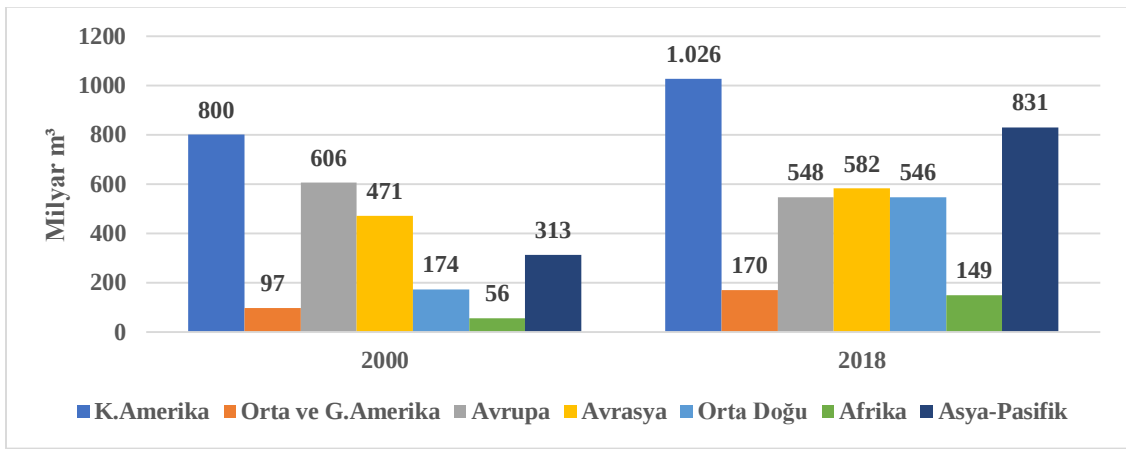
Kaynak: OPEC, 2014; OPEC, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Doğal Gaz Talebi ve Yatırımlar

Küresel doğal gaz talebi, 2018 yılında toplamda 3,8 trilyon m³ olarak gerçekleşmiştir (IEA, 2018). Bölgesel bazda ise, 2018 yılında K. Amerika 1 trilyon m³ toplam doğal gaz talebi ile ilk sırada yer almaktadır. Bu bölgenin küresel toplam doğal gaz talebi içerisindeki payı ise %27'dir (Grafik 12). K. Amerika'da ABD, bu %27'lik payın %21'ini oluşturmaktadır. K. Amerika'dan sonra bölgesel olarak en fazla doğal gaz talebinin yaşandığı bölge Asya-Pasifik'tir. Asya-Pasifik, küresel doğal gaz talebinin 831 milyar m³ ile %22'sini oluşturmaktadır. Asya-Pasifik bölgesinde Çin (%7) ve Japonya (%3) toplam küresel doğal gaz talebinin %10'una hakim konumdadır. Diğer bölgelerde ise, Orta ve G. Amerika ve Afrika küresel toplam doğal gaz talebinde %4'er, Avrupa ve Orta Doğu'da %14'er ve Orta Doğu ise %15 pay almıştır (BP, 2019). Bölgelerin toplam doğal gaz taleplerindeki artış Orta ve G. Amerika, Avrupa ve Avrasya bölgeleri haricinde diğer bölgelerde 2019 yılında da devam etmiştir.

2000 yılından 2018 yılına kadarki süreçte bu bölgelerde en fazla doğal gaz talebi artışı, toplamda %214 ile Orta Doğu'da gerçekleşmiştir. Bu artışın temel sebebi; Orta Doğu bölgesindeki ülkelerin aratan elektrik talebi nedeniyle elektrik üretimlerini petrolden doğal gaza kaydırmasından kaynaklanmıştır. 2000 yılında Orta Doğu bölgesindeki ülkelerin elektrik üretimlerinin %41'i petrole ve %57'si doğal gaza dayanırken, 2017 yılına kadar bu oran %28'i petrol %69'u doğal gaz olarak değişmiştir. Orta Doğu bölgesinden sonra küresel çapta en çok doğal talebi artışı toplamda %166 ile Afrika ve %165'lik artışla Asya-Pasifik'te meydana gelmiştir. Asya Pasifik bölgesindeki toplam

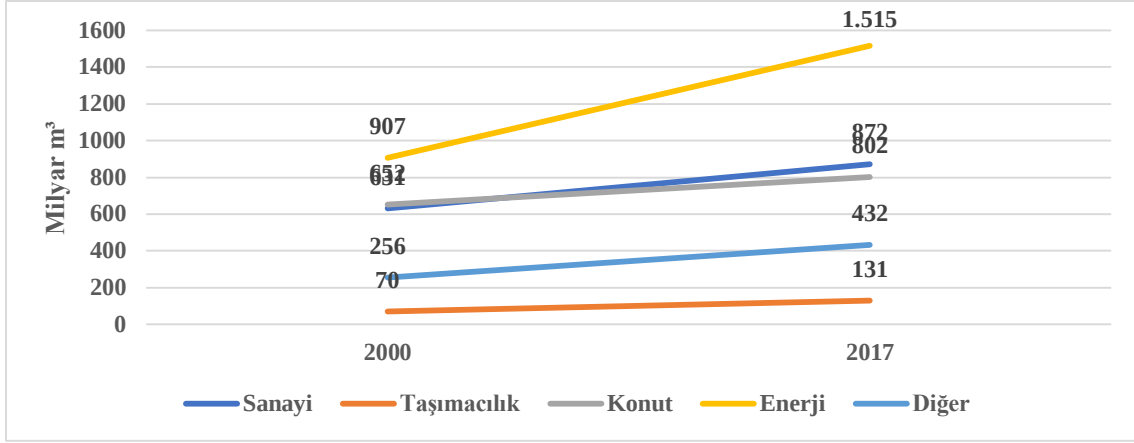
%165'lik artışın %100'ünü Çin, Hindistan ve Japonya gibi ülkeler tarafından oluşturulmuştur. Bu bölgedeki doğal gaz talebinde meydana gelen artışın nedeni Çin, Hindistan ve Japonya gibi ülkelerdeki endüstriyel sektörlerde doğal gaz kullanımının artmasından kaynaklanmıştır. Afrika'da ise 2000 yılında %21 olan doğal gazın elektrik üretimi içerisindeki payının 2017 yılına kadar %39'a çıkmış olması Afrika'nın doğal gaz talebinde ciddi artışın temel sebebidir (IEA, 2018). Bunların haricinde 2000-2018 arasında diğer bölgelerde küresel toplam doğal gaz talebi; K. Amerika'da %28, Orta ve G. Amerika'da %75 ve Avrasya'da %24 artarken Avrupa'da %10 azalmıştır (Grafik 12).



Grafik 12: 2000-2018 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Doğal Gaz Talebi

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

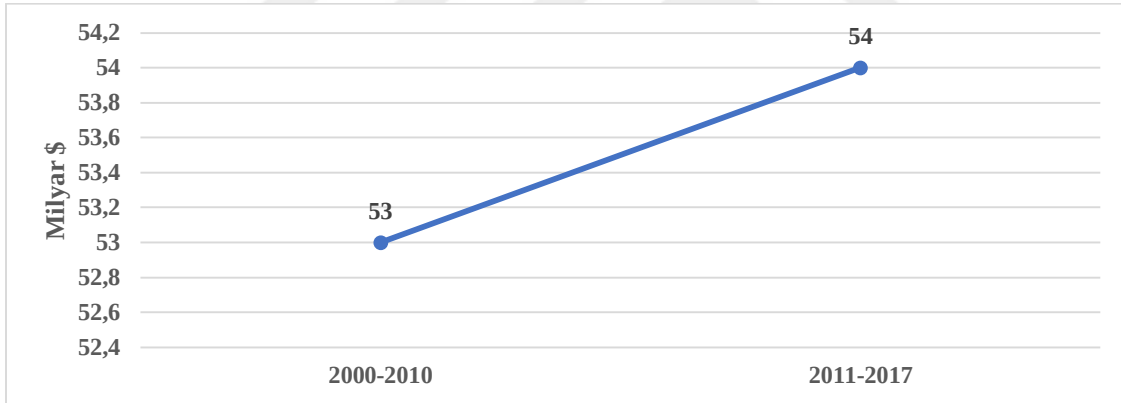
Küresel doğal gaz talebinin sektörel dağılımları incelendiğinde 2000-2017 arası dönemde tüm sektörlerin doğal gaz taleplerinde artış meydana gelmiştir. Bu dönemde doğal gaz talebindeki en yüksek artış %87 ile taşımacılık sektöründe gerçekleşmiştir. Taşımacılık sektörlerini %38 ile sanayi, %23 ile konut, %67 ile enerji ve %69 ile diğer sektörler izlemiştir (Grafik 13).



Grafik 13: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Doğal Gaz Talebinin Sektörel Dağılımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel çapta doğal gaz enerjisi yatırımlar incelendiğinde 2000 yılında 2017 yılına kadar geçen süre içerisinde yıllık bazda yaklaşık %2 artarak 54 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir (Grafik 14).



Grafik 14: 2000-2017 Arası Dönemde Küresel Bazda Yıllık Doğal Gaz Yatırımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

1.2.1.3. Kömür

Kömür, yapısında karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) gibi kimyasalları barındıran, organik ve yanıcı özelliğe sahip olan ve milyonlarca yıl farklı kaya tabakaları arasında değişik basınç ve sıcaklık etkilerine maruz kalmış bitki kalıntılarının bir araya gelmesiyle oluşan bir kayadır (WCI, 2005).

Bu bitki kalıntılarının her birinin mineral ve yer altındaki kayaç yapısının farklı olması farklı kömür türlerini meydana getirmektedir. Bu da kömürün heterojen özellik göstermesine neden olmaktadır. Kömür oluşumu için en uygun ortam geçirgenlik derecesi düşük olan kayaç yapıları ve bataklıkların yoğun olarak bulunduğu ve nemli ve tropikal iklime sahip alanlardır (Koç, 2006). Kömür, oluşumu itibarıyla kendisini beş farklı türde gösterebilmektedir. Bunlar; turba, linyit, alt bitümlü, bitümlü ve antrasit. Tablo 5’te bu kömür türlerinin yapısında bulunan kimyasallar ve içerikleri verilmektedir.

Tablo 5: Kömürün Yapısında Yer Alan Kimyasalların Kömürleşme Süreci Boyunca Aldıkları Değerler

Kömürleşme Aşamaları	Karbon (%)	Hidrojen (%)	Oksijen (%)
Turba	40-60	7	35>
Linyit	70-80	6	25
Alt Bitümlü Kömür	75	5	15
Bitümlü Kömür	75-90	5	10
Antrasit	95	4	5

Kaynak: Brown - Skipsey, 1986; MTA, 3 Mart 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömürün değerini belirleyen belirli başlı faktörler vardır. Bunlar; nem, uçucu madde, kül, karbon ve ısı değer miktarları ile kükürt içeriğidir. Nem miktarı; yanma esnasında buharlaşmaya sebebiyet verdiğinden kömürün mevcut ısı değerini azaltmaktadır. Uçucu madde miktarı; Yanmanın daha çabuk gerçekleşmesine ve şiddetinin artmasını sağlamaktadır. Kül miktarı; kömürün yanmayan bölümünü oluşturur. Ayrıca cüruf oluşumuna neden olmaktadır. Karbon miktarı; yanma esnasında kömürün yapısında var olan uçucu maddelerin ayrılmasıyla oluşur. Genel olarak karbon değeri arttığında ısı değer de artmaktadır. Kükürt içeriği; kömürde cüruf oluşumu meydana getirir. Kükürt oranının fazla olması aşırı derecede hava kirliliğine neden olmaktadır. Isıl değer miktarı; kömürün yanma olayı sırasında açığa çıkardığı enerji değeridir. Yüksek olması istenmektedir (Boylu - Karaağaçlıoğlu, 2018). Tablo 6’da kömürlerin birtakım özellikleri verilmektedir. Buna göre kömürün kömürleşme süreci boyunca aldığı değerler göz önünde bulundurulduğunda en kaliteli kömürün antrasit olduğu görülmektedir.

Tablo 6: Kömürün Kalitesini Belirleyen Bazı Kimyasal Özelliklerin Kömürleşme Derecelerinde Aldıkları Değerler

Kömürleşme Aşamaları	Nem Miktarı (%)	Kükürt Miktarı (%)	Kül Miktarı (%)	Uçucu Madde Miktarı (%)	Isıl Değer (MJ/kg)
Linyit	30.0-34.0	0.6-1.6	7.0-16.0	45.0	15.0
Alt Bitümlü Kömür	28.0-30.0	0.3-0.5	5.0-6.0	45.0	20.0
Bitümlü Kömür	3.0-13.0	2.0-4.0	7.0-14.0	35.0	27.9
Antrasit	2.1-12.0	0.5-0.7	6.9-11.0	10.0	30.0

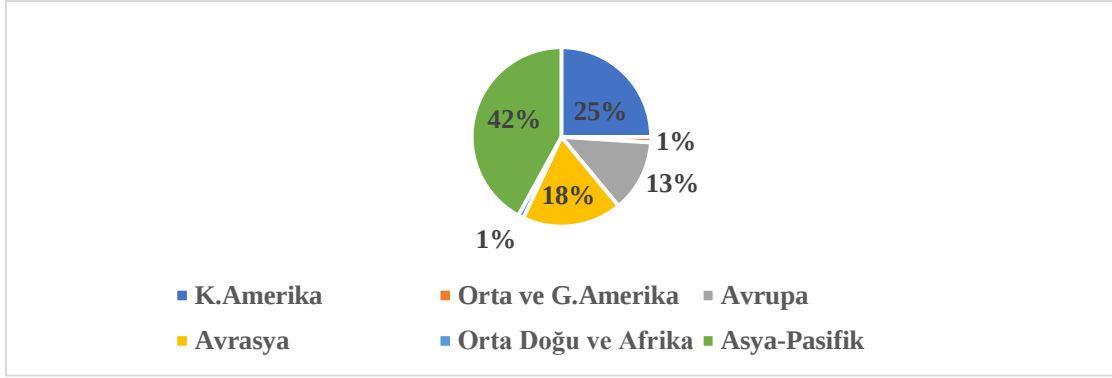
Kaynak: Brown - Skipsey, 1986; MIT, 2007'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömürün Kullanım Alanları

Kömür küresel ölçekte termik santraller aracılığıyla elektrik üretiminde, çimento sektörlerinde yakıt olarak, konut sektöründe ısınma amaçlı olarak, tuğla ve kiremit üretiminde ve yine bazı orta ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarında enerji girdisi olarak kullanılabilir (TKİ, 2009). Ayrıca kömür, demirin çeliğe dönüştürülmesinde de kullanılabilir. Kömür, burada demir cevherinin karbonlaştırılmasında kullanılmaktadır. Bunların yanında kömür, sıvı yakıt olarak ulaşım sektöründe ve sıvılaştırılmış yakıt olarak petrol alt yapısında kolayca kullanabilir. Yakıt olarak sıvılaştırılmış kömür Güney Afrika'nın ulaşımındaki enerji ihtiyacının %30'unu karşılamaktadır (World Coal Association, 10 Mart 2020).

Kömür Rezervleri, Ortalama Ömürleri ve Üretimleri

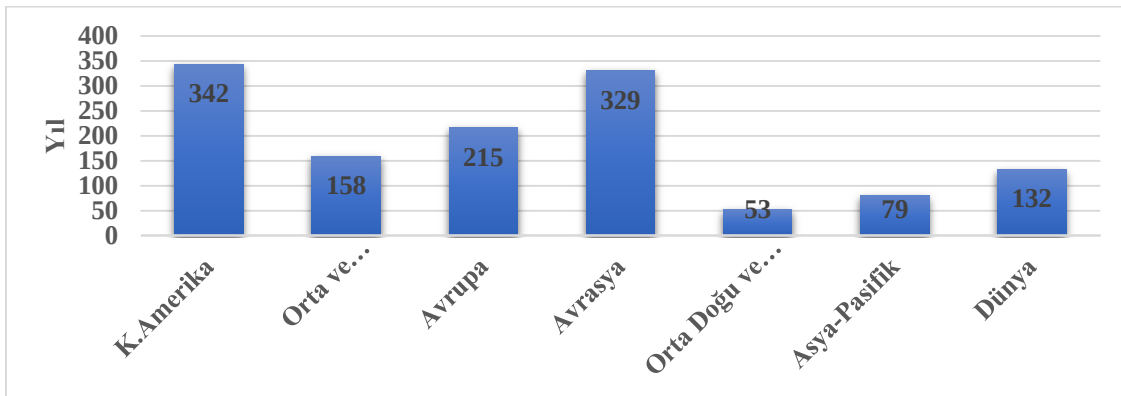
2018 yılı itibarıyla küresel toplam kömür rezervleri 1 trilyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu rezervin %67'si Asya-Pasifik (%42) ve K. Amerika'da (%25) yer almaktadır (Grafik 15). Bu bölgelerde ABD 250 milyar ton, Avustralya 147 milyar ton ve Çin 138 milyar ton ile dünya toplam kömür rezervlerinin %51'ini oluşturmaktadır. Bu bölgeleri de 188 milyar ton toplam kömür rezervi ile Avrasya ve 134 milyar ton toplam kömür rezervi ile Avrupa bölgesi takip etmektedir. Asya-Pasifiği, 258 milyar ton toplam kömür rezervi ile K. Amerika, 188 milyar ton toplam kömür rezervi ile Avrasya ve 134 milyar ton toplam kömür rezervi ile Avrupa bölgesi takip etmektedir. Bu bölgelerde de Rusya 160 milyar ton ve Almanya 36 milyar ton ile en fazla kömür rezervine sahip ülkelerdir (BP, 2019).



Grafik 15: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Kömür Rezervlerinin Dağılımları

Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

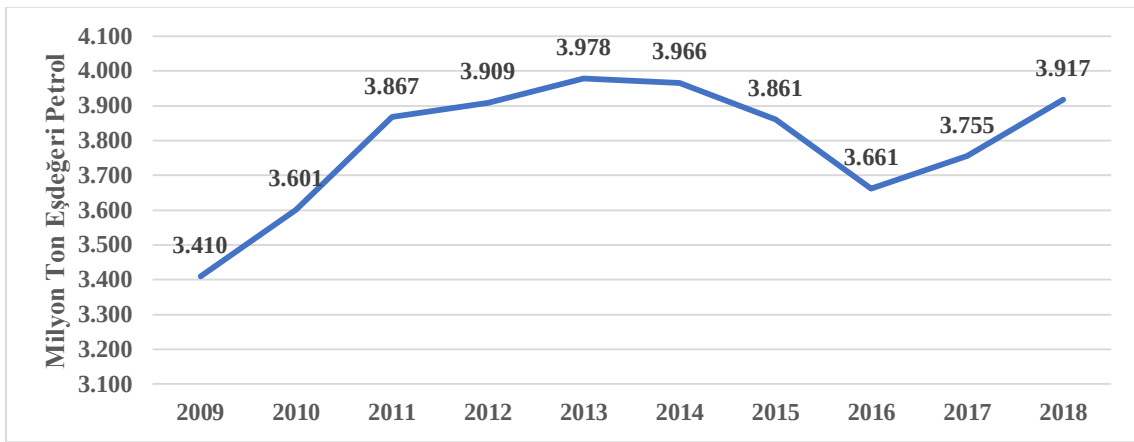
Küresel toplam kömür rezervlerinin kullanım ömürlerine bakıldığında dünya genelinde kömür rezervlerinin ortalama 132 yıl sonra tükenmesi beklenmektedir. Bölgesel olarak ise en fazla kömür rezerv ömürleri K. Amerika, Avrasya ve Avrupa'da yer almaktadır (Grafik 16). Bu bölgelerde kömür rezerv ömürlerinin diğer bölgelere göre fazla olmasının nedeni rezerv miktarından ziyade kömürün bu bölgelerde birincil derecede kullanımda olmayışıdır. Burada dikkat çekici nokta Asya-Pasifik bölgesinin mevcut kömür rezerv miktarları ile mevcut kömür kullanım ömürleri arasında tezatlık olmasıdır. Asya-Pasifik'in, dünyanın en fazla kömür rezervlerine sahip bölgesi konumundayken dünyanın en az kömür rezerv ömrüne sahip bölgesi olmasının nedeni kömürün bu bölgede aşırı tüketiminden kaynaklıdır.



Grafik 16: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Kömür Rezervlerinin Ömürleri ve Dünya Ortalaması

Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel bazda kömür üretimleri incelendiğinde dünya genelinde toplam kömür üretimi 2018 yılında 2017 yılına kıyasla %4,3 oranında artarak yaklaşık 4 milyar ton eşdeğeri petrole ulaşmıştır. 2009-2018 arası dönemde ise dünya kömür üretimleri toplamda %15 oranında artsa da genel itibariyle dalgalı bir seyir izlemiştir (Grafik 17). 2018 yılında bölgesel bazda dünya genelinde en fazla kömür üretimi Asya-Pasifik tarafından gerçekleştirilmiştir. Asya-Pasifik, 2018 yılı itibariyle küresel kömür üretiminin %73'ünü elinde bulundurmıştır. Bu bölgede Çin, 2 milyar ton eşdeğeri petrol kömür üretimiyle küresel kömür üretiminin %47'sine sahip olmuştur (BP, 2019).

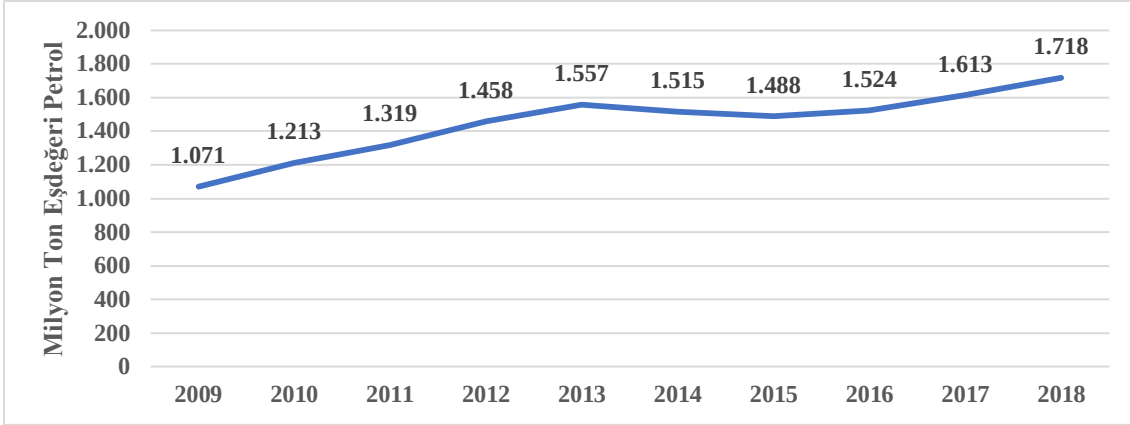


Grafik 17: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelinde Kömür Üretimleri

Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömür Ticareti

Dünya toplam kömür ticareti, 2018 yılında 1,7 milyar ton eşdeğeri petrol olarak gerçekleşmiş, bunun 859 milyon ton eş değeri petrol'ünü ihracat, 859 milyon ton eş değeri petrol'ünü ithalat oluşturmuştur. Kömür ticaret hacmi 2009-2018 arası dönemde ise toplamda %61 oranında artmıştır (Grafik 18). 2018 yılı baz alındığında Avusturalya, Rusya ve Endonezya gibi ülkeler önemli kömür ihracatçısı ülkeler olurken Çin, Hindistan, Japonya ve G. Kore gibi Asya ülkeleri önemli kömür ithalatçısı ülkeler olmuşlardır. Avusturalya, Rusya ve Endonezya küresel toplam kömür ihracatının %70'ini oluştururken Çin, Hindistan, Japonya ve G. Kore ise küresel toplam kömür ithalatının %58'ini oluşturmuşlardır (BP, 2019).



Grafik 18: 2009-2018 Arası Dönemde Dünya Genelindeki Kömür Ticaret Hacimleri

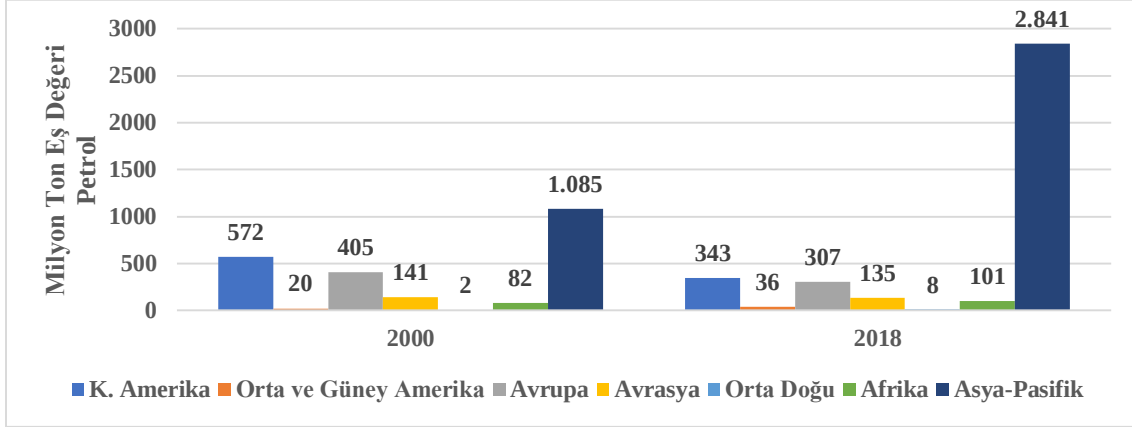
Kaynak: BP, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömür Talebi ve Yatırımlar

Dünya kömür talebi, 2000 yılından 2018 yılına kadar toplamda %63 yıllık bazda ise ortalama %3,5 artarak 2018 yılında 3,7 milyar ton eş değeri petrol olarak gerçekleşmiştir. Bölgesel bazda ise, 2018 yılında en çok kömür talebi 2,8 milyar ton eş değeri petrol ile Asya Pasifik bölgesinde gerçekleşmiştir. Asya-Pasifik bölgesi, 2018 yılı itibariyle küresel toplam kömür talebinin %75'ini oluşturmuştur. Bu dönem içerisinde Asya-Pasifik'ten sonra dünya genelinde en fazla kömür talebi 1 milyar ton eş değeri petrol ile K. Amerika olmuştur. K. Amerika, 2018 yılı itibariyle küresel toplam kömür talebinin %9'unu oluşturmuştur. Diğer bölgelerin yüzdesel kömür talep dağılımları ise; Orta ve G. Amerika %1, Avrupa %8, Avrasya %4, Afrika %3 ve Orta Doğu %0,2 olarak meydana gelmiştir (Grafik 19).

2000 yılından 2018 yılına geçen süre 18 yıllık süre içerisinde bölgesel toplam kömür talebinde en yüksek büyüme Asya-Pasifik bölgesinde gerçekleşmiştir. Asya-Pasifiğin 2000-2018 arası kömür talebi toplamda 1,7 milyar ton eşdeğeri petrol artarak %162 oranında büyümüştür. Bu artışta, Asya-Pasifiğin 2017 yılına kadarki süreçte elektrik üretiminde birincil derecede kullanılan kömürün, elektrik üretimi içerisindeki payının toplamda %219 oranında artmasının etkisi büyük olmuştur (IEA, 2018). Bu dönem içerisinde diğer bölgelerin kömür taleplerinde toplamda; Orta ve G. Amerika'da 16 milyon ton eşdeğeri petrol, Orta Doğu'da 6 milyon ton eşdeğeri petrol ve Afrika'da 19 milyon ton eşdeğeri petrol artış gerçekleşirken K. Amerika'da 229 milyon ton eşdeğeri

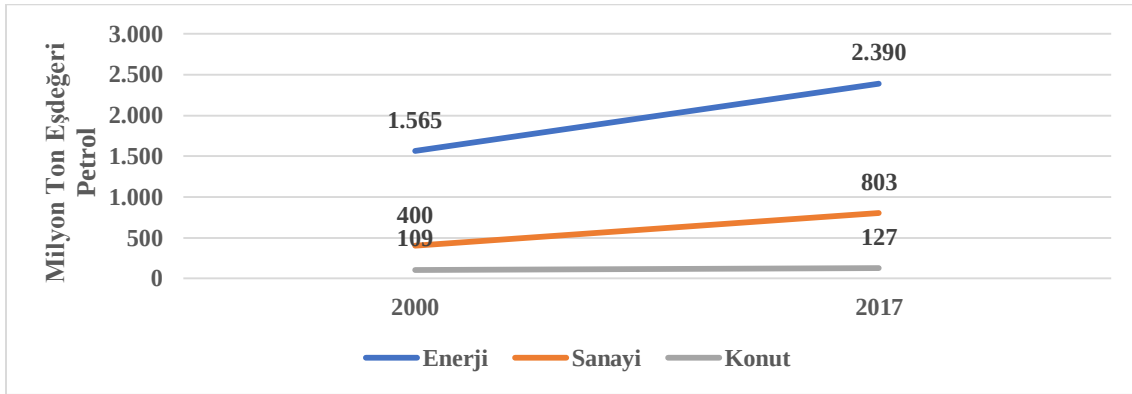
petrol, Avrupa’da 98 milyon ton eşdeğeri petrol ve Avrasya’da 6 milyon ton eşdeğeri petrol azalış gerçekleşmiştir (Grafik 19).



Grafik 19: 2000-2018 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Kömür Talebi

Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

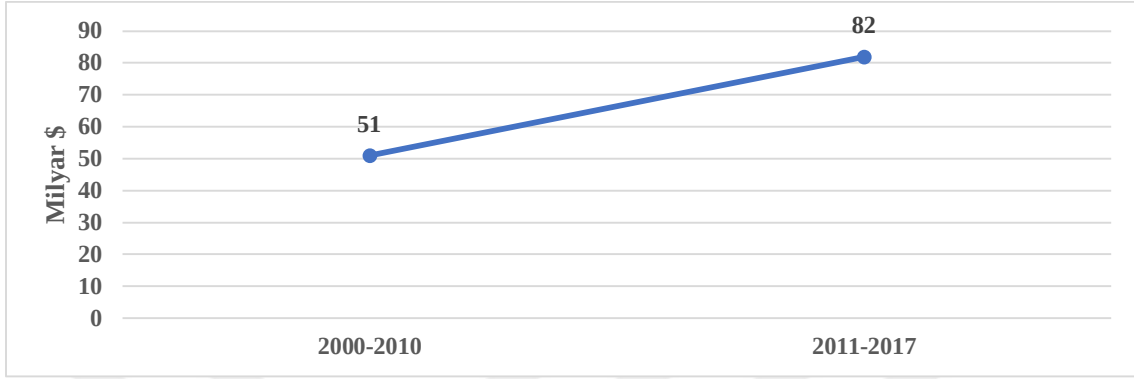
Küresel toplam kömür talebinin sektörel dağılımlarına bakıldığında, 2017 yılında kömürün en çok kullanıldığı sektör enerji dönüşüm sektörleri olmuştur. Enerji sektörünün 2017 yılı itibariyle toplam kömür talebi 2,3 milyar ton eşdeğeri petrol olarak gerçekleşmiştir. Özellikle dünya genelinde termik santrallere dayalı elektrik üretimi, kömürün bu sektörde kullanımını öncü hale getirmiştir. Enerji sektöründen sonra kömürün en fazla talep edildiği sektör sanayi sektörü olmuştur. Sanayi sektörünün 2017 yılı itibariyle toplam kömür talebi 803 milyon ton eşdeğeri petrol olarak gerçekleşmiştir. Konut sektörünün ise ısınma amaçlı olarak 2017 yılındaki toplam kömür talebi 127 milyon ton eşdeğeri petrol olarak gerçekleşmiştir (Grafik 20).



Grafik 20: 2000-2017 Arası Dönemde Dünya Kömür Talebinin Sektörel Dağılımları

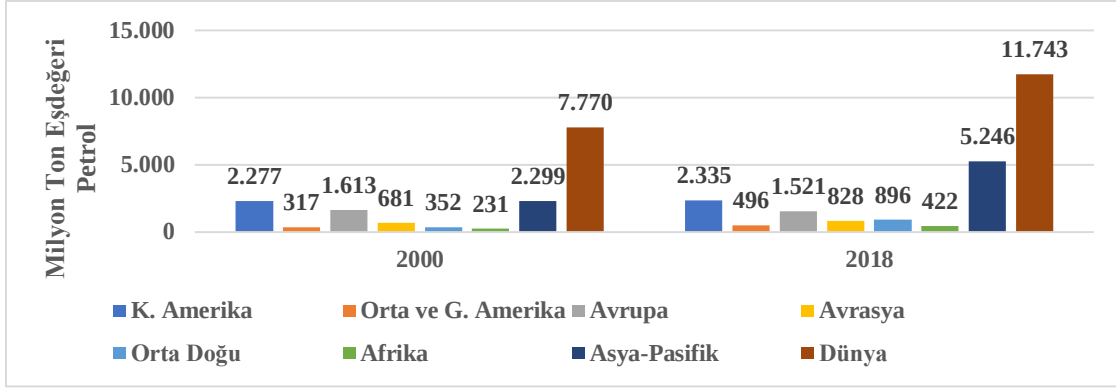
Kaynak: IEA, 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel çapta kömür enerjine yıllık bazda yapılan yatırımlar ise 2000-2017 arası dönemde %61 oranında artarak 51 milyar \$'dan 82 milyar \$'a yükselmiştir (Grafik 21).

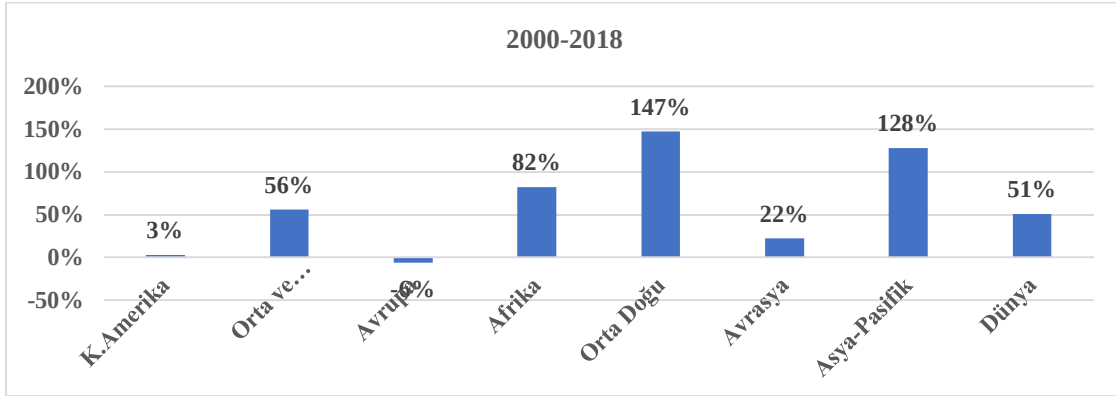


Grafik 21: 2000-2017 Arası Dönemde Küresel Bazda Yıllık Kömür Enerjisine Yapılan Yatırımlar
Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya genelinde fosil enerji kaynaklarının buraya kadar ki bölümü incelendiğinde fosil enerji kaynaklarının enerji kaynağı bazında genel itibariyle üretim, kapasite, yatırım ve talep yapılarının artmasına rağmen rezervlerinin yakın gelecekte tükeneceği tespit edilmiştir. Ancak fosil enerji kaynakları küresel çapta hala en fazla tüketilen enerji kaynağı konumundadır ve bu konuda önemini korumaktadır. Fosil enerji kaynaklarının genel itibariyle talep yapısı incelendiğinde 2000 yılından 2018 yılına kadar toplamda %51 oranında artarak 7,7 milyar ton eşdeğeri petrol'den 11,7 milyar ton eşdeğeri petrole yükselmiştir (Grafik 22). Bölgesel bazda ise bu dönem içerisinde Avrupa haricinde tüm bölgelerde artışlar meydana gelmiştir. Bu dönemde fosil enerji talebi toplamda K. Amerika %3, Orta ve G. Amerika'da %56, Afrika'da %82, Orta Doğu'da %147, Avrasya'da %22 ve Asya-Pasifik'te %128 artarken Avrupa'da %5 oranında azalmıştır (Grafik 23).

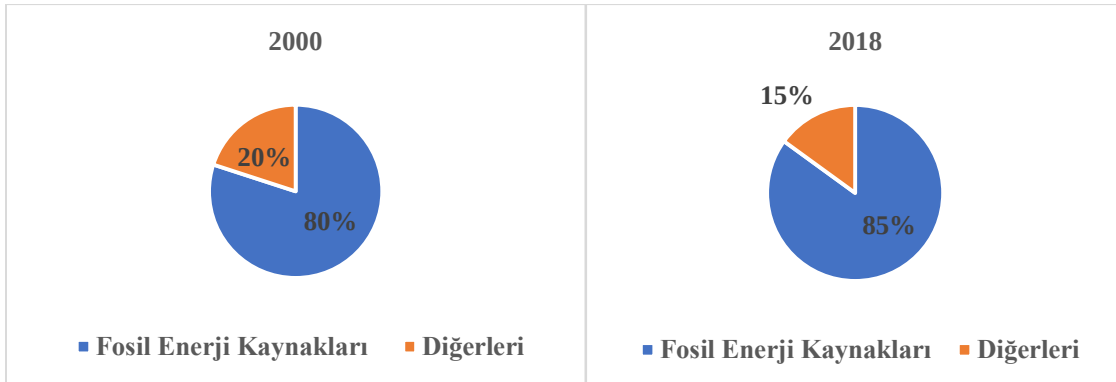


Grafik 22: 2000-2018 Arası Dönemde Dünya Geneline ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebi
Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.



Grafik 23: 2000-2018 Arası Dönemde Dünya Geneline ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebinde Meydana Gelen Değişimler
Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunlar neticesinde de fosil enerji kaynaklarının dünya birincil enerji talebi içerisinde 2000 yılında %80 olan payı 2018 yılında %85'e yükselmiştir (Grafik 24).



Grafik 24: 2000-2018 Arası Dönemde Fosil Enerji Talebinin Dünya Toplam Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Görünümleri (%)

Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Dünya genelinde fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte rezervlerinin tükenecek olması ve mevcut durumda yüksek karbon emisyonlarına neden olması sebebiyle dünya ülkelerini ihtiyacı olan enerjiyi farklı kaynaklarından elde etme konusunda bir yönelim içerisine sokmuştur. Bu yönelimin başında da yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; mevcut enerjisini doğadan alabilen, doğayı kirletmeyen ve belirli bir rezerv yapısına ve ömrüne sahip olmayan enerji kaynaklarıdır. Bu enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyoenerji, jeotermal enerji ve hidroenerji gibi enerji kaynaklarından oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, gelecekte fosil enerji kaynaklarını ikame edebilecek bir enerji kaynağı olarak görülmekte ve bu sebepten dolayı dünyanın birçok ülkesi tarafından bu enerji kaynakları hakkında ciddi çalışmalar ve yatırımlar yapılabilmektedir.

1.2.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi

Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin yapısında güneş patlamaları da denilen füzyon olayları sırasında açığa çıkan enerji şeklinde meydana gelmektedir. Bu füzyon olayları sırasında saniyede 564 milyon ton hidrojen molekülü 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve bu dönüşüm sırasında 4 milyon tonluk bir kütle kaybı oluşmaktadır. Bu oluşan kütle kaybı da yaklaşık 386 milyon EJ değerinde bir enerjiyi açığa çıkarmaktadır. Bu açığa çıkan enerji dünyanın yıllık enerji ihtiyacının 16.000 katından daha fazla olmakla birlikte dünyada bir yılda elektrik santrallerinden üretilen enerjinin 61000, nükleer santrallerden üretilen enerjinin ise 527.000 katına eş değer gelmektedir (Ültanır, 1996).

Güneş enerjisi; 1370 W/m² sabit yoğunluğa, 0-1100 W/m² yüzey alanına ve 6000 °C civarında yüzey sıcaklığına sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş, sahip olduğu enerjiyi gönderdiği elektromanyetik dalgalar yani radyasyonlar aracılığıyla yayabilmektedir. Bu gönderilen elektromanyetik dalgalar da atmosferi ve yeryüzünü ısıtabilmektedir. Güneşin yaydığı elektromanyetik dalgaların ise sadece %47'si yeryüzüne ulaşabilmektedir (Artkın, 2018; Doğanay, 1998).

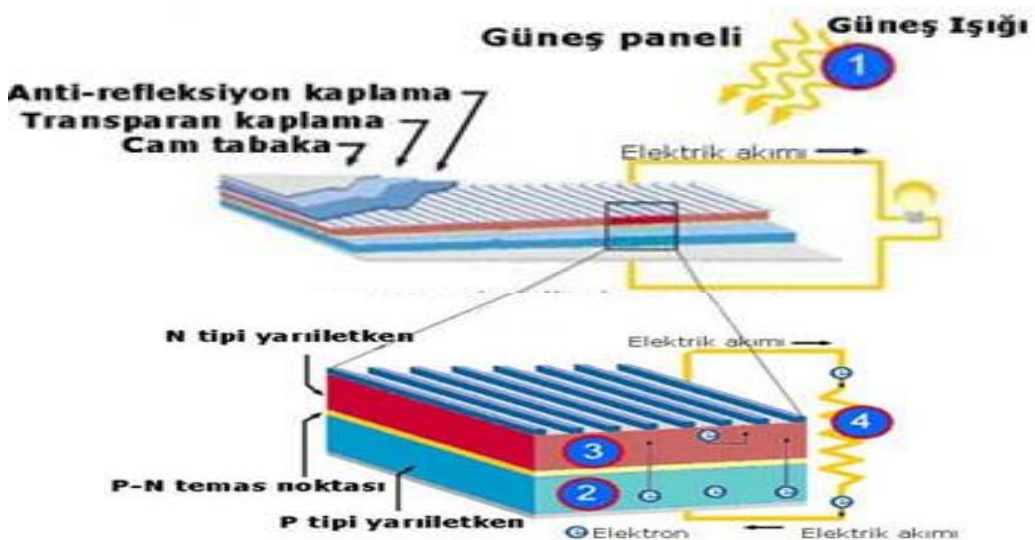
Güneş enerjisi, konutlarda ısıtma ve soğutmada, sıcak su elde edilmesinde, tarım ürünlerinin kurutulması işlemlerinde, tuzlu sudan tatlı su elde edilmesinde, haberleşme istasyonlarında, alarm ve sinyalizasyon sistemlerinde, kırsal bölgelerde suyun pompalanması işlemlerinde, aydınlatmada, ilaç sektöründe aşıların ve ilaçların soğutulmasında, hidrojen ve özellikle de elektrik üretiminde kullanılmaktadır (Çakar vd., 2009; Doğanay vd., 2003).

Günümüzde güneş enerjisinden en yaygın bir şekilde güneş pilleri (güneş panelleri) aracılığıyla yararlanılabilmektedir. Güneş pilleri, yarı iletken bir özellikte olup güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayabilen yapılardır (Öner, 2007). Güneş panellerinin görünümü Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1: Güneş Panelleri

Kaynak: REN 21, 2020.



Şekil 2: Güneş Panelinin Çalışma Prensibi

Kaynak: Robotik Sistem, 15 Mart, 2020.

Güneş pillerinin çalışma prensibinde, öncelikle güneşten gelen fotonlar üzerinde cam tabaka ve kaplama bulunan güneş panelinin üzerine düşerler. Bu güneş panelinin üzerine düşen fotonlar güneş panelinin içerisinde bulunan güneş pillerindeki fotovoltaiik hücreler tarafından emilir. Ayrıca güneş pillerinin içerisinde P ve N tipi iki tane yarı iletken madde bulunur. Bunlardan P tipi yarı iletken madde çok sayıda elektrona sahipken, N tipi yarı iletken madde ise az sayıda elektron bulunur. Daha sonra fotovoltaiik hücreler tarafından emilen bu fotonlar, P tipi yarı iletken maddeden elektron kopararak N tipi yarı iletken maddeye doğru taşınır. Bu taşınma sırasında bir doğru akım oluşur ve bu oluşan doğru akım neticesinde de elektrik üretimi gerçekleşmektedir (Robotik Sistem, 15 Mart 2020).

Güneş pilleri (Panelleri) 12-24 panellik bir güneş enerji sistemi normal bir evin günlük tüm enerji ihtiyacını karşılar. Bu sistemin elektrik santrallerinde ve endüstride kullanılması için çok sayıda panelin kullanıldığı bir sistemin inşası gerekmektedir. Güneş pillerinden yıllık ortalama 50 ila 100 MW arası enerji üretilebilmektedir (Rustemli vd., 2009).

Bunların haricinde güneş enerjisi ve güneş enerji sistemleri belli başlı bazı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bunlar Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7: Güneş Enerjisi ve Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
. Enerjisini doğrudan güneşten alır. . Güneş enerjisi sistemleri dayanıklı, güvenilir ve uzun ömürlüdür. . Sera gazı salınımına neden olmaz. . Güneş enerjisi sistemleri doğal, sağlıklı zararlı olmayan malzemelerle yapılır. . Doğal bir ısıtma sistemi olduğundan konutlar- da aşırı enerji tüketimini engeller. . Enerji kayıplarını ortadan kaldırır. . Elektrik şebekesinin bulunmadığı ya	. Mevsimsel etkiye bağlı olarak enerji verimi düşebilmektedir. . Güneş enerji sistemlerinin kurulmasında ilk yatırım maliyetleri yüksektir. . Güneş enerjisinin depolanması sınırlıdır. . Depolama birimlerinin bakımı ve ömrü enerji maliyetlerini arttırarak sistemin verimliliği azaltır.

da şebe- ke hattının pahalı olduğu alanlarda kullanımı daha ekonomiktir.	

Kaynak: Artkın, 2018; Çakar vd., 2009.

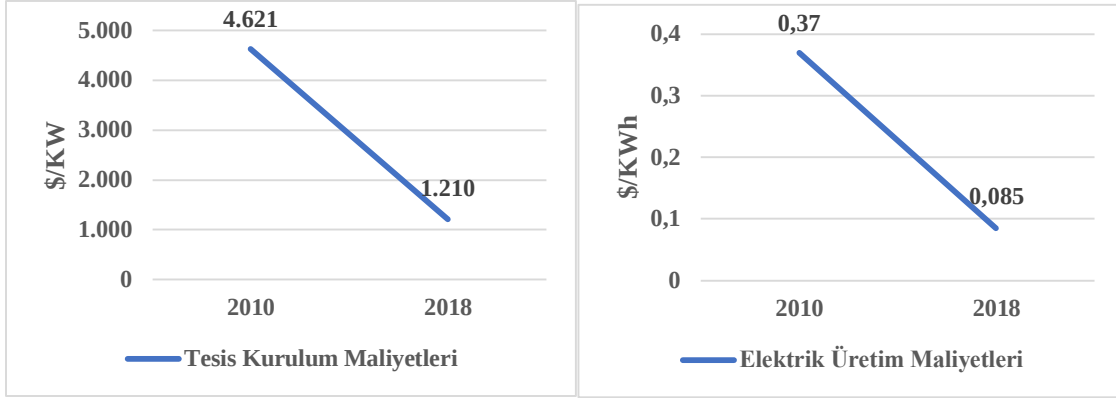
Dünya’da güneş enerjisinden elde edilen enerjinin büyük bir kısmı güneş panelleri ve dolayısıyla da güneş pilleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Buna göre yıllar itibariyle güneş enerjisinden elde edilen enerji üretimleri dikkatle incelendiğinde dünya genelinde güneş enerjisi ile üretilen enerjinin yaklaşık %95-98’inin güneş pilleri aracılığıyla üretildiği görülmektedir (Tablo 8).

Tablo 8: 2009-2017 Yılları Arasında Dünya Genelinde Güneş Enerjisinden ve Güneş Pillerinden Elde Edilen Elektrik Üretimleri

Yıllar	Güneş Enerjisinden Elde Edilen Elektrik Enerjisi (GWh)	Güneş Pillerinden Elde Edilen Elektrik Enerji (GWh)	Güneş Pillerinden Elde Edilen Elektrik Enerjisi/ Güneş Enerjisinden Elde Edilen Elektrik Enerjisi (%)
2010	33.825	32.160	95
2011	65.501	62.443	95
2012	101.387	96.352	95
2013	137.921	131.701	95
2014	192.985	183.943	95
2015	252.630	242.372	96
2016	325.098	314.060	97
2017	437.287	425.810	97
2018	562.033	549.833	98

Kaynak: IRENA, 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunun yanında güneş pili sistemleri üretimlerinde yüksek teknoloji içermesi nedeniyle pahalıya imal edilebilmektedirler. Güneş pili sistemleri, ilk üretildikleri tarih olan 1950 yılında %5 verimlilik düzeyi ile 750 bin \$/KW gibi yüksek maliyetlerinde üretilirken, 2009 yılında %20 gibi daha yüksek bir verimle 5-6 bin \$/KW gibi daha düşük bir maliyetle üretilenmiştir. Güneş pillerini daha düşük maliyetle üretme yönündeki çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir. (Rustemli vd., 2009).



Grafik 25: 2010-2018 Arası Güneş Pillerinin Kurum ve Elektrik Üretim Maliyetleri

Kaynak: IRENA 2019a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Grafik 25'te 2010-2018 yılları arasında dünya genelinde güneş pili teknolojisine sahip bir sistemin KW cinsinden kurulum ve KWh cinsinden de elektrik üretim maliyetleri verilmektedir. Buna göre güneş pili tesis maliyetlerinde meydana gelen iyileşmelerin elektrik üretim maliyetlerini de aşağıya çektiği görülmektedir. 2010 yılında 1 Kw değerinde güneş pili tesisinin kurulum maliyeti 4621 \$, 1 KWh elektrik üretim maliyeti de 0,37 \$ olarak belirlenmiştir. 2018 yılında 1 Kw güneş pili tesis kurulum maliyetinin %74 azalarak 1.210 KW değerine düşmesi elektrik üretim maliyetlerini de %77 azaltarak 0,085 \$ seviyelerine inmesine neden olmuştur.

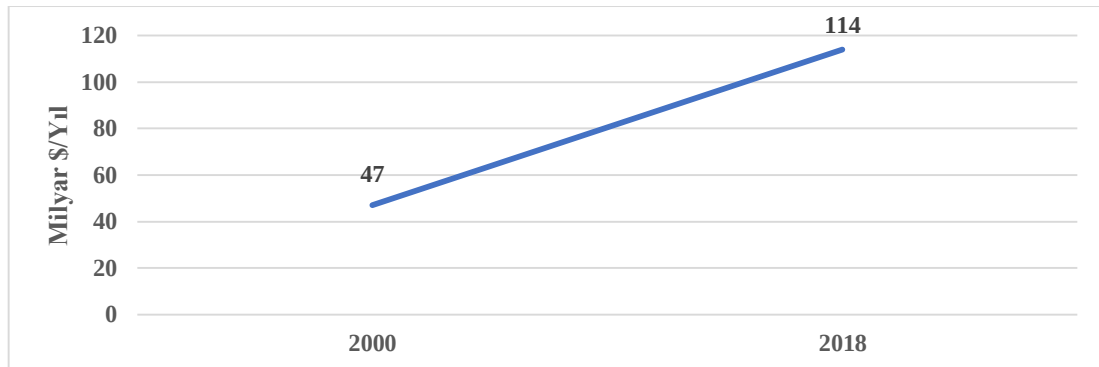
Fosil enerji kaynaklarından bugün itibariyle elektrik üretim maliyetleri Kwh başında 0,05-0,17 \$ arasındadır (IRENA, 2019a). Buna göre güneş pillerinin şuanki elektriksel üretim maliyetleri fosil enerji kaynaklarına kıyasla rekabetçi değildir. Ancak gelecek vaatetmektedir. Güneş enerjisi ve buna bağlı olarak da güneş enerji sistemleri, küresel çapta bir gelişim içerisinde. Tablo 9'a bakıldığında bu durum açıkça görülmektedir. 2010-2018 arası dönem referans alındığında küresel bazda güneş pili kurulu kapasiteleri toplamda 445 PW (%1.072) ve güneş pili enerji üretimleri de 524 MWh (%1.562) artarak toplam yenilenebilir kurulu kapasite içerisindeki payları %3'ten %21'e, toplam yenilenebilir enerji üretimleri içerisindeki payları da %0,80'den %9'a yükselmiştir.

Tablo 9: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Güneş Pillerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Güneş Pili Kurulu Kapasite (MW)	Güneş Pili Enerji Üretimi (GWh)	Güneş Pili Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Güneş Pillerinden Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2010	41.545	33.813	3,40	0,80
2011	73.738	65.641	5,55	1,49
2012	104.085	101.788	7,22	2,14
2013	139.596	137.649	8,93	2,73
2014	176.088	192.792	10,40	3,62
2015	222.091	252.358	12,02	4,80
2016	295.948	325.680	14,73	5,52
2017	388.569	438.034	17,83	7,05
2018	486.721	562.033	20,66	8,53

Kaynak: IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Güneş pili teknolojilerinin küresel çapta gelişmesine yönelik dünyanın önde gelen ekonomileri tarafından her yıl milyarlarca \$'lık yatırımlar yapılabilmektedir. Bu doğrultuda 2010 yılında güneş pili teknolojilerine toplamda 77 milyar \$'lık yatırım yapılmıştır. 2018 yılına geçen süre içerisinde bu yatırımlar %143 oranında artarak yıllık bazda 114 milyar \$'a kadar yükselmiştir (Grafik 26). 2018 yılında güneş pili teknolojilerine ABD 33 milyar \$, Almanya, Avustralya, Hindistan, Japonya ve Hollanda da birer milyar \$'lık yatırımlar yaparak toplam yapılan yatırımların %33'ünü oluşturmuştur (IRENA, 2019a).



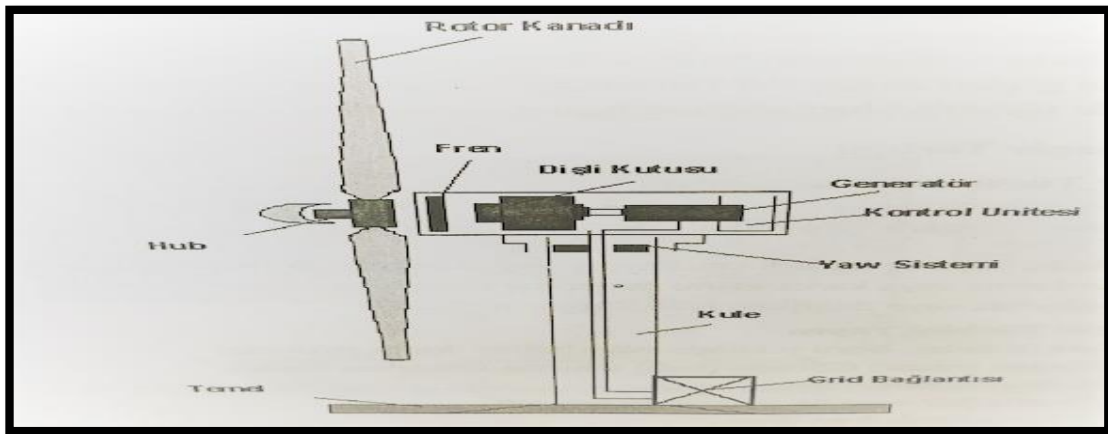
Grafik 26: 2000-2018 Arası Dönemde Güneş Pili Sistemlerine Yıllık Bazda Yapılan Yatırımlar

Kaynak: IRENA, 2019a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, kaynağını güneşten alan farklı basınç merkezlerinin oluşturduğu hava akımlarıdır. Rüzgar, güneşten dünyaya gelen enerjinin yalnızca %1-2'sini alabilmektedir. Dünya, küresel anlamda güneş ışınlarının geliş şekline bağlı olarak farklı derecelerde ısınabilmektedir. Bu ısınmanın en yoğun olduğu alan ise ekvator bölgesidir. Sıcak hava soğuk havaya göre daha hafiftir ve bu nedenden dolayı farkı ısınma derecelerine sahip hava kütleleri çeşitli hava akımlarını beraberinde getirmektedir. Sıcak hava ekvator'dan kuzeye ve güneye doğru yükselir. Yükselen hava, dünyanın dönme hareketi sonucunda kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede sola sapar ve bu sapmalar bu yarımkürelerde termik ve dinamik kökenli alçak ve yüksek basınç merkezlerini oluştururlar. Bu oluşan basınç merkezlerinde yüksek olandan alçak olana doğru hava akımları meydana gelir ve bu hava akımları neticesinde de rüzgarlar meydana gelmektedir (Acaroğlu, 2003).

Rüzgar enerjisinden de tıpkı güneş enerjisinde olduğu gibi en etkili olarak elektrik üretimi şeklinde yararlanılabilmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ise rüzgar türbinleri aracılığıyla oluşabilmektedir. Rüzgar türbinleri, havada bulunan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonrasında da mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Dönüştürülen bu elektrik enerjisi de trafolar ve enerji nakil hatları aracılığıyla dağıtılmaktadır.



Şekil 3: Tipik Bir Rüzgar Türbininin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi

Kaynak: Acaroğlu, 2003.

Tipik olarak çift rotor (pervane) yapısına sahip bir rüzgar türbininde elektrik üretim süreci şu aşamalardan meydana gelmektedir:

İlk olarak rüzgardan türbine doğru bir kinetik enerji gelmekte ve bu gelen kinetik enerji bir hub yardımıyla bağlanan pervane kanadını döndürmeye başlamaktadır. Dönen pervane kanadının şiddeti, fren mekanizması aracılığıyla yavaşlatılmakta ve pervaneden gelen hareket, dişli kutusuna iletilmektedir. Daha sonra dişli kutusunda, bu gelen hareketin hızı arttırılarak bir şaft yardımıyla jeneratöre gönderilmekte ve gelen hareket jeneratör yardımıyla elektriğe dönüştürülmektedir. Burada, dönüştürülen elektrik enerjisinin kontrol ünitesi tarafından orta seviyeli olması sağlanmakta ve oradan da şebekeye aktarılmaktadır. Son olarak şebekeye aktarılan elektrik enerjisi enerji nakil hatları aracılığıyla kullanıma sunulmaktadır (Acaroğlu, 2003).

Rüzgar enerjisinden yeteri düzeyde faydalanabilmek için bu enerji kaynağından elde edilecek olan enerjinin ekonomik olması oldukça önemlidir. Bu bakımdan kurulacak rüzgar türbinlerinin konumu oldukça önem arz etmektedir. Rüzgar türbinlerinin ekonomik olabilmesi için rüzgar potansiyelinin yüksek ve rüzgarın sürekli olduğu alanlarda inşa edilmeleri gerekmektedir (Doğanay, 1998).

Bununla birlikte rüzgar türbinlerinin birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar, Tablo 10'da verilmektedir.

Tablo 10: Rüzgar Enerjisinin ve Enerji Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
. Rüzgar, havayı kirletici hiçbir zararlı gaz salınımına sebep olmayan temiz bir enerji kaynağı olma özelliğine sahiptir. . Tükenmeye tabii olmayan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. . Enerji kaynakları arasında ikame etkisine sahiptir. . Enerji maliyetleri düşük seviyelerdedir.	. Depolama ihtiyacı oluşabilmektedir. Rüzgar hızının düşük olduğu zamanlarda enerji kesinlikle olmaması için enerjinin önceden depolanması gerekmektedir. . Rüzgar türbinleri kuruldukları bölgelerde gürültü kirliliğine neden olmaktadır. . Rüzgar enerji santralleri, bulunduğu bölgedeki

. Yerleşim yerlerinden uzak kırsal bölgelere kurulacak rüzgar türbinleriyle elektrik sağlanabilmektedir.	kitle iletişim araçlarını olumsuz yönde etkilemektedir. . Diğer enerji santrallerine göre daha fazla yer kaplayabilmektedir. . Rüzgar türbinleri yüksek hızlarda dönen pervaneleri nedeniyle kuş ölümlerine sebebiyet vermektedir.

Kaynak: Hayli, 2001

Rüzgar enerjisinden, su pompalarında, karada (onshore) ve denizde (offshore) kurulan türbinler aracılığıyla elektrik üretiminde ve bu üretilen elektriğin, depolanmasında, iletişim istasyonlarında, deniz fenerlerinde ve gözetleme noktalarında kullanımı şeklinde yararlanılmaktadır (Çetinkaya – Karaosmanoğlu, 2003).

Rüzgar enerjisi ve buna bağlı enerji teknolojilerinin küresel çaptaki görünümüne bakıldığında bu enerji sistemlerinin güneş enerji sistemlerine kıyasla daha yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak gelişim hızı güneş enerji teknolojileri kadar yüksek değildir. Tablo 11'e bakıldığında bu durum anlaşılmaktadır. Buna göre, 2000-2018 arası dönemde dünya genelinde rüzgar enerji teknolojilerine bağlı kurulu kapasiteler toplamda 382 GW (%211) ve enerji üretimleri de toplamda 920 TWh (%268) olarak artmıştır. Bunların neticesinde toplam yenilenebilir kurulu kapasite içerisindeki payları %15'ten %24'e, toplam yenilenebilir enerji üretimi içerisindeki payları da %8'den 19'a yükselmiştir (Tablo 11).

Tablo 11: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Rüzgar Türbinlerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Rüzgar Türbini Kurulu Kapasite (MW)	Rüzgar Türbini Enerji Üretimi (GWh)	Rüzgar Türbini Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Rüzgar Türbini Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2010	180.846	342.831	14,78	8,16
2011	220.015	433.750	16,56	9,84
2012	266.905	525.684	18,51	11,05
2013	299.916	636.151	19,18	12,62

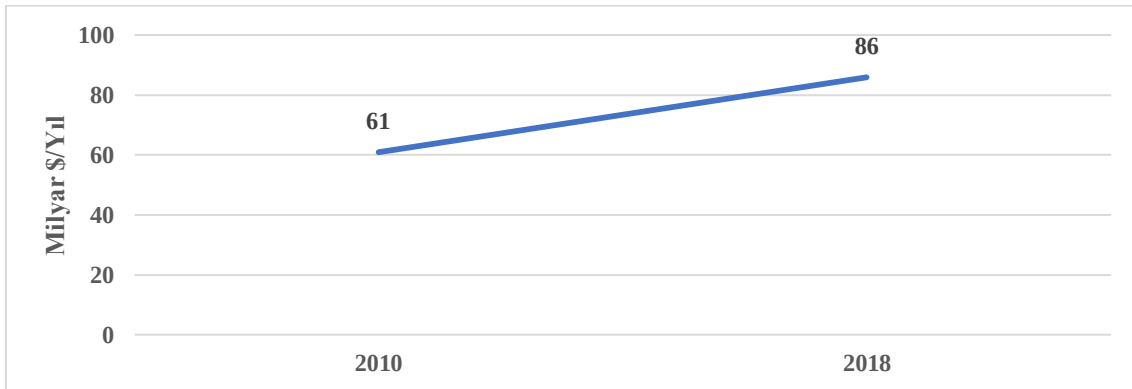
2014	349.297	713.163	20,63	13,38
2015	416.241	829.825	22,54	15,79
2016	468.844	955.955	23,33	16,21
2017	514.376	1.133.623	23,60	18,26
2018	563.186	1.262.914	23,90	19,18

Kaynak: IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu dönemler arasında en yüksek kapasite ve enerji üretimlerindeki artış sırasıyla Brezilya, Çin, Birleşik Krallık ve Kanada gibi ülkeler tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde kurulu kapasiteler bakımından toplamda Brezilya'da %1.500 (927 MW'dan 15 GW'a), Çin'de %523 (30 GW'dan 185 GW'a), Birleşik Krallık'ta %302 (5 GW'dan 22 GW'a) ve Kanada'da %223 (4 GW'dan 13 GW'a) oranında artmıştır. Enerji üretimlerinde ise yine sırasıyla toplamda Brezilya'da %2.300 (2 TWh'den 48 TWh'e), Çin'de %647 (49 TWh'den 366 TWh'e), Birleşik Krallık'ta %470 (10 TWh'den 57 TWh'e) ve Kanada'da %256 (9 TWh'den 32 TWh'e) oranında artış meydana gelmiştir (IRENA, 2020).

Bu artışların neticesinde de Brezilya'nın 2010 yılında %0,4 olan rüzgar enerjisinden elde edilen enerjinin yenilenebilir enerji üretimleri içerisinde %0,4 olan payı 2018 yılında %9,7'ye, Çin'in %6,2 olan payı %20'ye, Birleşik Krallık'ın %39,2 olan payı %52,6'ye ve Kanada'nın %2,3 olan payı da %7,4'e yükselmiştir (IRENA, 2020).

Rüzgar enerjisi teknolojilerine yapılan yatırımlara bakıldığında ise, 2010 yılında 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde yıllık bazda %41 oranında artarak 61 milyar \$'dan 86 milyar \$'a kadar yükselmiştir (Grafik 27).

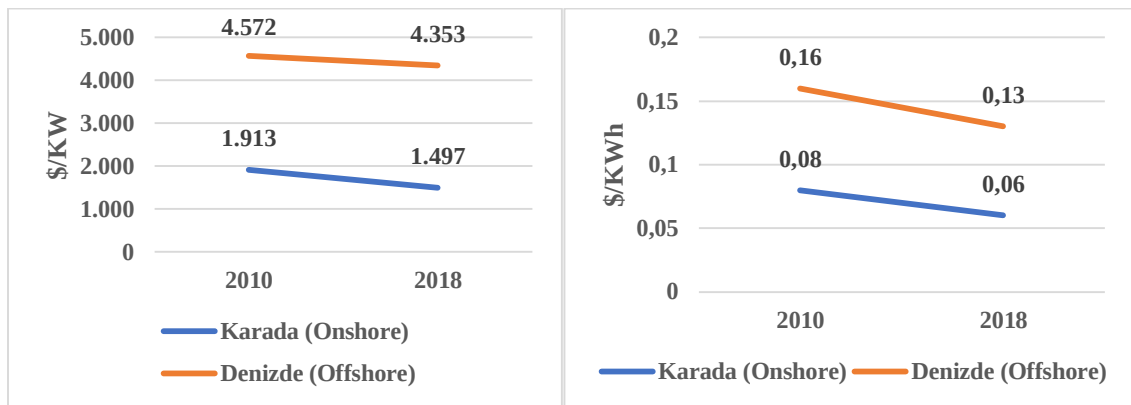


Grafik 27: 2000-2018 Arası Dönemde Rüzgar Enerji Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılan Yatırımlar

Kaynak: IRENA 2019b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Rüzgar enerjisiinden enerji (elektrik) üretimi, kara (onshore) ve deniz (offshore) bağlantılı rüzgar türbinleri aracılığıyla meydana gelebilmektedir. Bölgesel olarak bu iki farklı türdeki rüzgar türbinlerinin kuruluş yerleri nedeniyle farklı donanımlara sahip olması bu türbinlerin kurulum ve elektrik üretim maliyetlerinin de farklı olmalarına sebebiyet vermektedir.

Dünya genelinde 2010 yılı itibariyle karada kurulan rüzgar türbininin KW başında toplam tesis kurulum maliyeti 1.913 \$ ve KWh başına toplam elektrik üretim maliyeti 0.08 \$ iken, denizde kurulan bir rüzgar türbini tesisi için KW başına toplam kurulum maliyeti 4.572 \$ ve KWh başına toplam elektrik üretimi 0.16 \$ olarak gerçekleşmiştir. Daha sonrasında zamanla gelişen teknolojiler ve bu teknolojiler doğrultusunda yapılan olan yatırımlar neticesinde hem kara merkezli hem de deniz merkezli olarak kurulan rüzgar türbinleri için önemli maliyet avantajları beraberinde getirmiştir. Nitekim 2018 yılında kara merkezli olarak kurulan bir rüzgar türbinin kurulum maliyetinin 2010 yılına göre %22, elektrik üretim maliyetinin %25 azalması aynı şekilde deniz merkezli kurulan rüzgar türbinin kurulum maliyetinin %5 ve elektrik üretim maliyetinin de %19 azalması bu gelişen teknolojik yenilikler ve yapılan yatırımlar neticesinde meydana gelmiştir (Grafik 28).



Grafik 28: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Bazda Rüzgar Türbini Kurulum (Solda) ve Enerji Üretim (Sağda) Maliyetleri

Kaynak: IRENA, 2019b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

1.2.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji

Biyoenerji

Biyoenerji, genel olarak çeşitli bitki yapılarının ve kalıntılarının, hayvansal ve tüketimsel atıkların bir dizi transformatif hareketlere uğraması sonucunda meydana gelen düşük karbon salınımına sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyoenerji, elde edildiği kaynak türüne göre temelde; biyokütle, biyogaz ve biyodizel enerjisi olarak ayrışabilmektedir.

Biyokütle enerjisi; temelde bitkilerin yaptığı fotosentez yoluyla ve hayvan tezeklerinin yakılması suretiyle meydana gelen bir enerji çeşididir. Bitkilerin fotosentezi yoluyla oluşan biyokütle enerjisinde bitkiler, klorofillerinde yer alan pigmentler sayesinde güneşten aldığı enerjiyi kimyasal enerjiye çevirerek bünyelerinde depo etmekte ve gerektiğinde kullanılmaktadırlar. Tezek yakımında ise, elde edilen yaş tezek ot ve saman gibi bitkisel kökenli atıklarla harmanlandıktan sonra birtakım serpm ve kurutma işlemlerinden geçirilerek yakıma hazır hale getirilmektedir (Doğanay vd., 2003).

Biyokütle enerjisinin kaynağı olan bazı ürünler;

- Ağaç kabuğu ve talaş gibi ağaç endüstrisinin yan ürünleri
- Enerji bitkileri
- Saman, gübre, budama gibi tarımsal yan ürünler
- Hayvansal yan ürünler ve belediye atıkları
- Su yosunları

şeklinde olabilmektedir (Bioenergy Europe, 2019).

Biyogaz enerjisi; Organik maddelerin, hayvansal, tarımsal ve endüstriyel atıkların oksijen barındırmayan bir ortamda fermente edilmesiyle oluşan, yapısında karbondioksit ve metanla birlikte az sayıda da oksijen, azot, karbonmonoksit, hidrojen sülfür, hidrojen, amonyak ve su bulunan yanıcı özelliğe sahip renksiz ve kokusuz gazdır. Biyogazın, ısı eldesinde, elektrik enerjisi üretiminde ve araçlarda yakıt olarak kullanımı mevcuttur (Çetinkaya - Karaosmanoğlu, 2004).

Biyogaz enerjisi üretimini sağlayan hammadde kaynakları; kağıt, deri, tekstil ve orman endüstriyel atıklardır. Bununla birlikte arpa, çavdar, buğday vb. tahılsal atıklarla çeşitli evsel, zirai kökenli atıklar ayrıca büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan tezeleri gibi organik maddelerdir (Deviren vd. 2017). Bu hammadde kaynaklarından biyogaz üretimi için en verimli olanları Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12: Bazı Organik Maddelerin Biyogaz Verimleri ve Metan İçerikleri

Organik Maddeler	Biyogaz Verimleri (l/kg)	Metan Oranları (%)
Sığır Tezeği	90-310	65
Kanatlı Hayvan Tezeği	310-620	60
Domuz Tezeği	340-550	65-70
Saman (Buğday)	200-300	50-60
Saman (Çavdar)	200-300	59
Saman (Arpa)	290-310	59
Mısır (Sap ve Atıklar)	380-460	59
Keten-Kenevir	360	59
Çim	280-550	70
Sebze (Artıklar)	330-360	Değişken
Zirai Atıklar	310-430	59
Yerfıstığı Kabuğu	365	70
Ağaç Yaprakları (Dökülmüş)	210-290	Değişken
Su Yosunları	420-500	63
Atık Su Çamuru	310-800	65-80

Kaynak: Nacar Koçer vd, 2006.

Biyogaz, kırsal bölgelerde yaşayanların enerji ihtiyaçlarını ucuz yolla karşılamaları açısından oldukça önemli bir enerji kaynağıdır. Biyogaz üretimi için kurulacak bir üretim tesisinin bu bölgelerde basit yapılı ve düşük kapasiteye sahip olacağından ucuza inşa edilebilmektedir. Ayrıca biyogaz üretimi için temel hammadde olan tezek ve bitkisel maddeler bu bölgede yaşayan insanların hemen hemen hepsi hayvancılık ve çiftçilik ile uğraştığı için bol miktarda bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda ve hesaplamalar neticesinde kırsal bölgede yaşan ve ortalama 5-6 büyükbaş hayvana sahip olan bir ailenin bu hayvanlardan yılda ortalama 30 tondan fazla tezek elde edebileceği ve bu elde edilen tezekten de yılda ortalama 2.600 m³ biyogaz üretilerek yıllık enerji ihtiyacının tamamının karşılanabileceği ortaya konulmuştur (Doğanay, 1998).

Biyodizel; bitkisel ve hayvansal yağların, evsel atıkların transesterifikasyon işlemi ile asidik ve bazik bir katalizör eşliğinde esterleşme işlemi sonucunda oluşan yenilenebilir

bir yakıt türüdür. Biyodizel, dizel yakıta alternatif olarak mevcut dizel yapıya sahip motorlarda fazla bir değişikliğe gidilmeden bu motor tiplerinde kullanılabilir (Çalışkan vd., 2004). Tablo 13'te biyodizel üretiminde kullanılan bazı bitkisel yağların özellikleri verilmektedir. Bu özelliklerden viskozite (ağdalık), yakıtın akışkanlığını azalttığından yakıt enjektörlerinde tıkanmalar meydana getirerek yakıtın püskürtülmesini engellemekte ve pistonda tortullaşmalara neden olmaktadır. Artan tortullaşma da piston segmanlarında sıkışmalara neden olarak motorun veriminin düşmesine ve bozulmasına sebebiyet vermektedir. Bu olumsuz durumun minimize edilmesi için transesterifikasyon işlemi uygulanmaktadır (Vellguth, 1985).

Tablo 13: Biyodizel Üretiminde Kullanılan Bazı Bitkisel Yağların Viskozite ve Isıl Değerleri

Bitkisel Yağlar	Viskozite (mm²/s)	Isıl Değer (MJ/kg)
Pamukyağı	34	34
Haşhaş	42	37
Kolza	37	38
Aspir	32	42
Ayçiçeği	34	37
Susam	36	40
Yağ keteni	28	28
Buğday	33	35
Mısır özü	35	38
Hintyağı	30	42
Soya	33	38
Defne	23	34
Yer fıstığı	40	35
Fındık	24	53
Ceviz	37	34

Kaynak: Acaroğlu, 2003.

Biyoenerji, gerek hammadde kaynaklarının temininin kolay olması gerek basit üretim yöntemi nedeniyle özellikle kırsal bölgeler için önemli bir alternatif olması nedeniyle dünya genelinde üretimi ve kurulu kapasitesi her geçen yıl artan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Ancak kullanımı rüzgar türbinleri ve güneş pilleri kadar yaygın değildir. Tablo 14'te 2010-2018 arası dönemde dünya genelinde biyoenerji kurulu kapasiteleri ve üretimleri verilmektedir. Buna göre küresel ölçekte biyoenerjiye dayalı kurulu kapasiteler toplamda %79 artarak 118 GW'a enerji üretimleri de 523 TWh'e yükselmiştir. Kapasite

ve enerji üretimlerinin toplam yenilenebilir içerisindeki payları da sırasıyla %5 ve %8 dolaylarında seyir izlemiştir.

Tablo 14: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Biyoenerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Biyoenerji Kurulu Kapasite (MW)	Biyoenerji Üretimi (GWh)	Biyoenerji Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Biyoenerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2010	65.603	317.134	5,36	7,55
2011	71.777	340.405	5,40	7,73
2012	76.629	374.731	5,32	7,88
2013	83.848	407.221	5,36	8,08
2014	90.004	443.385	5,32	8,32
2015	96.764	466.697	5,24	8,88
2016	104.576	484.270	5,20	8,21
2017	110.539	495.401	5,07	7,98
2018	117.738	522.552	5,00	7,93

Kaynak: IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu dönemde küresel ölçekli olarak biyoenerji kapasitelerinde ve üretimlerinde yüzdesel olarak en yüksek artış Letonya, Tayland, Kore ve Çin gibi ülkelerde meydana gelmiştir. Kurulu kapasiteler bakımından toplamda bu ülkelerden Letonya'da %738 (16 MW'tan 134 MW'a), Tayland'ta %137 (1,7 GW'tan 4,1 GW'a), Kore'de %803 (161 MW'tan 1,4 GW'a) ve Çin'de %284 (3,4 GW'tan 13,2 GW'a) oranında artış yaşanmıştır. Enerji üretimlerinde ise toplamda yine bu ülkelerden Letonya'da %1.352 (65 GWh'den 944 GWh'e), Tayland'ta %739 (3,4 TWh'den 29 TWh'e), Kore'de %728 (915 GWh'den 7,5 TWh'e) ve Çin'de %260 (19 TWh'den 67 TWh'e) oranında artmıştır. Artışlar neticesinde Letonya'da biyoenerji üretimlerinin toplam yenilenebilir enerji üretimi içerisinde 2010 yılında %2 olan payı 2018 yılına gelindiğinde %27'ye, Kore'de %15'ten %33'e, Çin'de %2'den %4'e ve Tayland'ta da %38'den %45'e yükselmiştir (IRENA, 2020).

Üretim maliyetlerine bakıldığında biyoenerji kaynaklı enerji üretim maliyetlerinin diğer yenilenebilir ve fosil enerji kaynakları ile rekabet edebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda bölgesel bazda biyoenerji kaynaklı enerji üretim maliyetleri KWh başına 0,03 \$ ila 0,23 \$ arasında değişkenlik göstermektedir (Tablo 15).

Bu da fosil enerji kaynaklarından KWh başına elektrik üretim maliyetlerinin 0,27 \$ olduğu bir ortamda oldukça makul seviyelerdedir.

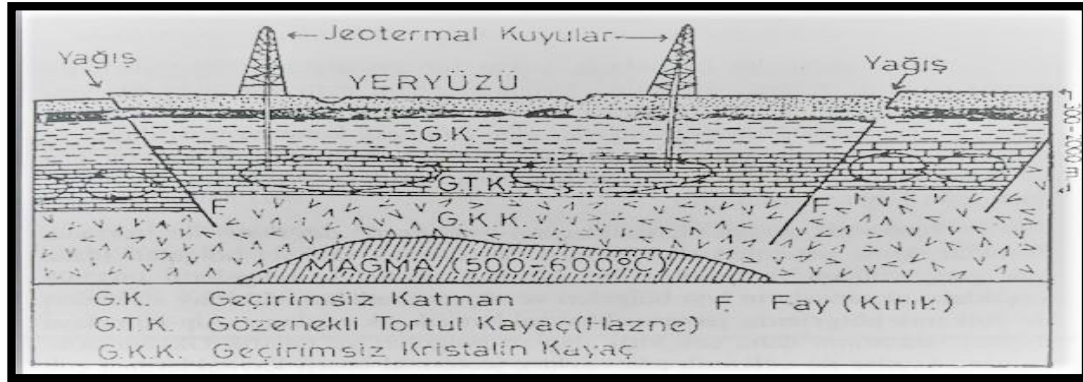
Tablo 15: 2018 Yılı İtibariyle Bölgesel Bazda Dünya Biyoelektrik Üretim Maliyetleri

Bölgeler	Biyoelektrik Üretim Maliyetleri (\$/KWh)
Afrika	0,07
Asya	0,06-0,11
Avrasya	0,06
Avrupa	0,04-0,13
Orta Doğu	0,06-0,16
K.Amerika	0,03-0,23
G.Amerika	0,03-0,04

Kaynak: REN 21, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Jeotermal Enerji

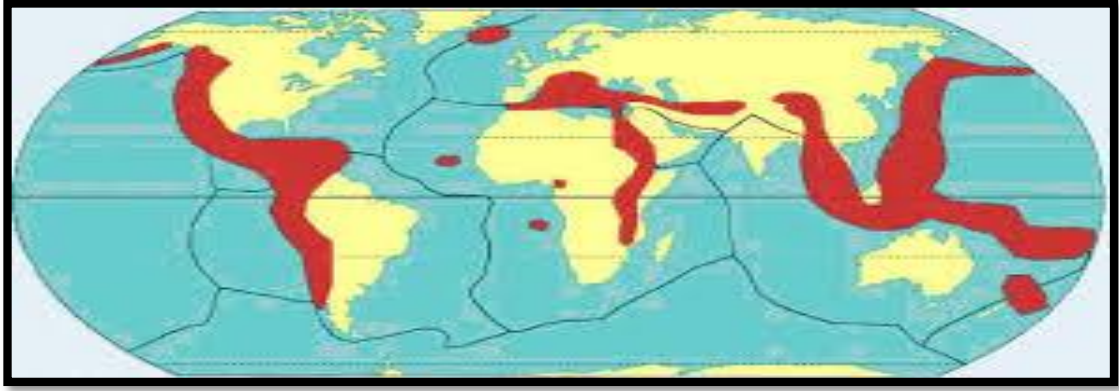
Jeotermal enerji; kelime kökeni olarak yerin ısısı anlamına gelen, temelde yağışlar vasıtasıyla yer altına sızan ve burada bulunan magmadan ve yerin çeşitli katmanlarından gelen yüksek sıcaklık ve basınç altında depolanan suların geçirimli tabakalar sayesinde kırık ve çatlak hatlar boyunca yüzeye ulaşarak kendilerini burada buhar ve ılıca, kaplıca gibi sıcak su kaynakları olarak gösteren yenilenebilir bir enerji kaynağıdır (Gökçen, 2009).



Şekil 4: Jeotermal Enerji'nin Oluşumu

Kaynak: Doğanay, 1998.

Jeotermal enerji kaynakları, genel olarak volkanizmanın ve tektonik hareketlerin yoğun olduğu genç arazi yapısına sahip yerlerde görülmektedir. Buna göre dünya jeotermal enerji sahaları Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5: Dünya Jeotermal Enerji Sahaları

Kaynak: Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri, 20 Haziran 2020.

Jeotermal enerjiden dünya çapında dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki şekilde yararlanılmaktadır. Jeotermal enerji, dolaylı olarak elektrik üretiminde kullanılırken doğrudan ise; jeotermal ısı pompalarında, alanların, sera ve kapalı yerlerin ısıtılmasında, tarımsal ürünlerin kurutulmasında, turizm ve hayvancılıkta, buzların eritilmesinde ve alanların soğutulmasında yararlanılmaktadır (Lund - Freeston, 2001). Jeotermal enerjinin farklı sıcaklık değerleri altında detaylı kullanım yerleri ve alanları Tablo 16'da Lindal diyagramı yardımıyla verilmektedir.

Tablo 16: Lindal Diyagramı

°C	Kullanım Yerleri ve Alanları
20	Balık yetiştiriciliği
30	Yüzme havuzları, biyolojik ayrıştırma, fermentasyonlar, maden ocakları için ılık su, buz çözme
40	Zemin ısıtma
50	Mantar yetiştiriciliği ve balneolojik havuzlar
60	Hayvancılık, seraların ısıtılması
70	Düşük sıcaklık değerlerindeki soğutma işlemleri
80	Alan ısıtma
90	Balık stoklarının kurutulması ve yoğun buz çözme
100	Organik maddelerin, yosunların, otların, sebzelerin vb. kurutulması
110	Çimento kurutma ve sertleştirme
120	Damıtma yoluyla tatlı su eldesi, buharlaştırma ve tuz solüsyonu konsantrasyonu
130	Şeker rafinasyonunda buharlaştırma
140	Çiftlik ürünlerinin kurutulması

150	Alüminyum oksitlerde
160	Balık unu ve kereste kurutma
170	Hidrojen sülfid ile ağır hidrojenli su eldesi
180	Yüksek konsantrasyonlu çözeltilerin buharlaştırılması ve amonyak emilimi ile soğutma.

Kaynak: Lindal, 1973.

Lindal diyagramına göre 20°C den 120°C'ye kadar olan bölüm jeotermal kaynağın su tarafını, 100°C'den 180°C'ye kadar olan bölüm buhar tarafını oluşturmakta, elektrik üretimi ise 140°C ile 180°C arasında gerçekleşmektedir. Bununla birlikte endüstriyel uygulamalar için çoğunlukla yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulurken, alan ısıtma ve tarımsal uygulamalar için ise düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır (Lindal, 1973).

Jeotermal enerji, doğrudan kullanım alanları içerisinde kaplıcalarda %42, alanların ısıtılmasında %35, jeotermal ısı pompalarında %12, seralarda %9 ve sanayide %6 oranında kullanımı mevcuttur (Fridleifsson, 2001).

Jeotermal kaynaklardan üretilen elektrik ve ısı enerjisi diğer enerji kaynaklarından daha ucuza mal edilmektedir. Yapılan çalışmalara göre yaklaşık 10 kg buhar ile 1000 Wh'lık elektrik üretiminin gerçekleşebileceği ve böylece diğer enerji kaynaklarına göre ortalama %65'lik bir maliyet avantajının oluşabileceği belirtilmiştir (Doğanay, 1998). Fakat jeotermal enerjinin elektrik üretimi dışındaki kullanım alanlarında hem yüksek hem de düşük sıcaklık değerlerine sahip jeotermal kaynaklar kullanılabildiği için düşük maliyetle elektrik üretiminin avantajı ortadan kalkmıştır. Böylece dünya genelinde, jeotermal enerjinin elektrik üretimi dışındaki kullanım alanlarına doğru yönelimler söz konusu olmuştur (Fridleifsson, 2001). Bu durum Tablo 17'de kendisini göstermektedir. Jeotermal enerjinin 2010-2018 arası dönemde dünya genelindeki görünümüne bakıldığında bu süre zarfı içerisinde hem jeotermal kurulu kapasite hem de jeotermal enerji üretimlerinde %33'er oranlarda artış meydana gelse de toplam yenilenebilir kurulu kapasite ve enerji üretimleri içerisindeki payları oldukça düşük kalmıştır.

Tablo 17: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Jeotermal Enerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Jeotermal Enerji Kurulu Kapasite (MW)	Jeotermal Enerji Üretimi (GWh)	Jeotermal Enerji Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Jeotermal Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2010	9.992	66.441	0,82	1,58
2011	10.134	69.739	0,76	1,58
2012	10.481	70.716	0,73	1,49
2013	10.718	72.129	0,69	1,43
2014	11.159	77.153	0,66	1,45
2015	11.814	81.052	0,64	1,54
2016	12.257	83.145	0,61	1,41
2017	12.702	85.891	0,58	1,38
2018	13.227	88.408	0,56	1,34

Kaynak: IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

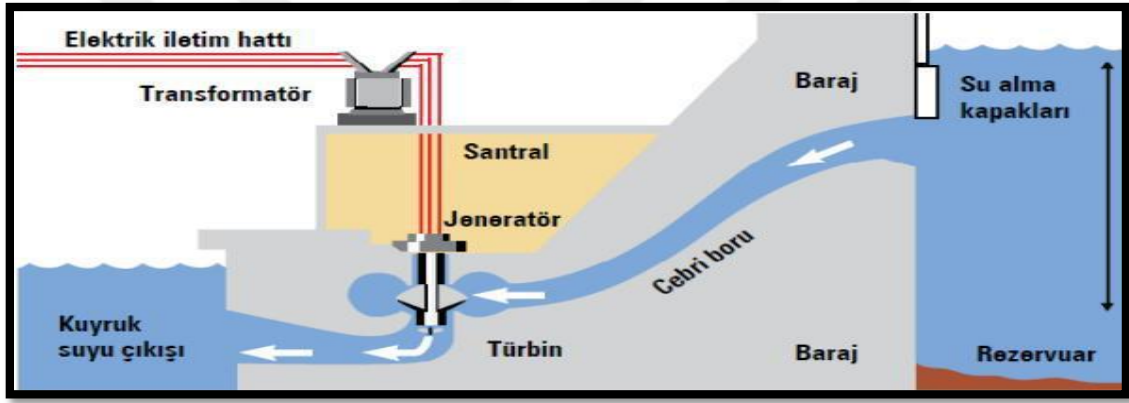
Ancak jeotermal enerji küresel çapta ağırlıklı olarak kullanılmayan yenilenebilir enerji kaynağı olsa da ekonomik açıdan düşük gelirli ülkeler açısından oldukça iyi birer alternatif olmaktadır. Bu ülkelerden Kenya'da tüketilen elektriğin %56'sı jeotermal kaynaklı olurken bu oran, İzlanda'da %32, Yeni Zelanda'da %20 ve Filipinlerde de %11 olarak gerçekleşmektedir (IEA, 17 Haziran 2020; IRENA 2020).

Jeotermal enerji, bu tür fırsatların yanında birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle, oluşumu sırasında açığa çıkan karbondioksit, kükürt oksit ve hidrojen sülfid hava kirliliğine, asit yağmurlarına ve çevrede istenmeyen kokulara neden olmaktadır. Bunun yanında yer altından yüzeye çıkan suların tuz ve mineral yapısı, yüzeyde bulunan sulara karışıp bu suların yapılarında değişikliklere ve nihayetinde kirlenmelerine yol açmaktadır. Jeotermal kaynaklı suların yüzeye çıktığında yüksek sıcaklığa sahip olması çıktığı alandaki bitki ve hayvan türlerini de olumsuz etkilemektedir (İlgar, 2005).

1.2.2.3. Hidro Enerji

Hidro enerji; kelime olarak suyun enerjisi anlamına gelen ve hidrolik enerji olarak da adlandırılan genel olarak akarsular tarafından meydana gelen enerjidir. Akarsular, barajlar vasıtasıyla önlerine set çekilerek belirli bir havzada toplanarak rezervuar

oluşturulmaktadır. Oluşan rezervuarlardan barajların önlerine kurulan santraller aracılığıyla da elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Elektrik üretimini gerçekleştiren bu santrallere hidroelektrik santraller denilmektedir. Barajların önlerine kurulan hidroelektrik santraller, barajlara göre biraz daha alçak olarak inşa edilmektedir. Bunun nedeni; suyun kinetik enerji kazanmasını sağlamaktır. Hidroelektrik santrallerde, rezervuarlarda biriken sular cebri borular yardımıyla belirli bir eğimle kinetik enerji kazanarak türbinlere aktarılır. Kinetik enerji kazanarak türbinlere aktarılan sular, buralardaki jeneratörler içerisinde yer alan dinamoları döndürmektedir. Dinamonun dönmesiyle, sudaki kinetik enerji elektrik enerjisine dönüşmekte ve elektrik, nakil hatlarıyla kullanıma sunulmaktadır (Oral vd., 2004). Bu oluşum Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6: Hidroelektrik Santraller İle Elektrik Üretimi

Kaynak: Oral vd., 2004.

Hidroelektrik üretiminde, rezervuarın olduğu bölge oldukça önemlidir. Bu bölgedeki zemini oluşturan kayaların geçirimli ve eriyebilen kayalardan oluşmamış olmasına dikkat edilmelidir. Çünkü geçirimli ve eriyebilen kayaların yapısı rezervuardan su sızıntılarına neden olarak rezervuardaki su miktarının azalmasına sebebiyet vermektedir. Bunun yanında rezervuar sahaları, volkanizmanın, fay hatlarının ve dolayısıyla da tektonik hareketlerin bulunmadığı bölgelerde kurulmalıdır. Tektonik hareketler, yerin derinliklerinde meydana gelen çeşitli büyüklükteki sarsıntılardır. Bu sarsıntılar zeminde kırıklara ve çatlaklara ve böylelikle yine rezervuardan su sızıntıları neden olabilmektedir. Yağış rejimi de hidroelektrik üretiminde önemli bir etkidir. Yağış rejiminin düzenli olması akarsuyun daha iyi beslenerek debisinin artmasına neden olmaktadır. Debi, akarsuyun belirli bir kesitinden saniyede akan su miktarıdır. İyi beslenen ve debisi artan

akarsu, rezervuarda daha fazla suyun depo edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca akarsu belirli bir eğime sahip olmalı menderesler oluşturmamalıdır. Çünkü menderes oluşturan bir akarsuyun yatak eğimi azalarak su akış hızı düşmektedir (Doğanay vd., 2003).

Tablo 18’de dünyanın en yüksek hidroelektrik üretim kapasitesine sahip barajları ve bulunduğu ülkeler yer almaktadır. Buna göre Çin, dünyanın en yüksek hidroelektrik üretim kapasitesine ve dolayısıyla da potansiyeline sahip ülkesi konumunda yer almaktadır.

Tablo 18: Dünya’da En Yüksek Hidroelektrik Üretim Kapasitesi Sahip Bazı Barajlar ve Bulunduğu Ülkeler

Barajlar	Elektrik Üretim Kapasitesi (MW)	Bulunduğu Ülkeler
Üç Boğaz	22.500	Çin
Itaipu	14.000	Brezilya-Paraguay
Xiluodu	13.860	Çin
Guri	10.300	Venezuela
Tucurui	8.370	Brezilya
Xiangjiaba	6.448	Çin
Büyük Coulee	6.809	ABD
Longtan	6.426	Çin
Krasnoyarsk	6.000	Rusya
Robert-Bourassa	5.616	Kanada
Bratsk	4.515	Rusya
WAC Bennett	2.916	Kanada
Şef Joseph	2.620	ABD
Hoover	2.080	ABD
Kariba	1.626	Zimbabve-Zambiya
Merowe	1.250	Sudan
Daniel-Johnson	1.064	Kanada

Kaynak: Elektrikport, 25 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel ölçekte hidroelektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en fazla enerji üretiminin gerçekleştirildiği enerji çeşitidir. 2010-2018 arası dönemde küresel çapta yenilenebilir enerji üretimleri içerisindeki paylarında bir düşüş gözükse de 2018 yılı itibarıyla hala dünyanın yenilenebilir enerji üretiminin %65’i hidroelektrik santralleri aracılığıyla karşılandığı görülmektedir. 2010-2018 arası dönemde dünya hidroelektrik enerji kapasiteleri toplamda %26 artarak 1,2 TW, hidroelektrik enerji üretimleri de

toplamda %21 artarak 4,2 PWh değerine ulaşmıştır (Tablo 19). Ülke bazında ise, küresel ölçekte yine bu dönem içerisinde yüzdesel bazdaki en yüksek artışlar Ekvador, Angola, Çin ve Hindistan gibi ülkeler tarafından gerçekleşmiştir. Hidroelektrik enerjisine bağlı kurulu kapasitelerde toplamda Ekvador'da %122 (2,2 GW'tan 4,9 GW'a), Angola'da %250 (772 MW'tan 2,6 GW'a), Çin'de %63 (216 GW'tan 352 GW'a) ve Hindistan'da %23 (41 GW'tan 50 GW'a) oranında artmıştır. Hidroelektrik enerji üretimlerinde ise toplamda, Ekvador'da %139 (9 TWh'ten 21 TWh'e), Angola'da %110 (4 TWh'ten 8 TWh'e), Çin'de %74 (772 TWh'ten 1,2 PWh'e) ve Hindistan'da da %22 (112 TWh'ten 137 TWh'e) oranında artışlar yaşanmıştır (IRENA, 2020).

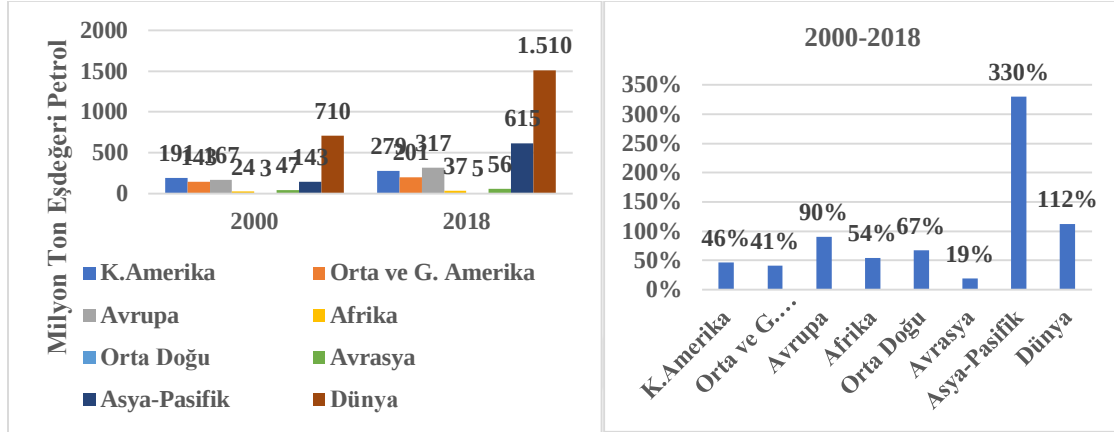
Tablo 19: 2010-2018 Arası Dönemde Küresel Çapta Hidroelektrik Enerjisi Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Hidroelektrik Enerjisi Kurulu Kapasite (MW)	Hidroelektrik Enerji Üretimi (GWh)	Hidroelektrik Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Hidroelektrik Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2010	1.025.054	3.533.189	83,78	84,08
2011	1.055.695	3.586.328	79,44	81,40
2012	1.088.745	3.772.763	75,52	79,30
2013	1.135.615	3.874.420	72,64	76,88
2014	1.174.477	3.993.066	69,37	74,94
2015	1.211.509	3.990.276	65,59	75,90
2016	1.246.425	4.162.864	62,02	70,58
2017	1.272.628	4.177.247	58,39	67,27
2018	1.295.019	4.267.085	54,97	64,79

Kaynak: IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynakları, karbon emisyonu yaratmaması nedeniyle küresel ölçekte fosil enerji kaynaklarına iyi birer alternatif oluşturmakta, bu konuda önemi ve kullanımı her geçen gün daha fazla artmaktadır. Özellikle güneş pilli ve rüzgar türbini teknolojileri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin küresel ölçekli kullanımında son yıllarda önemli aşamalar kaydetmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2000-2018 arası dönemdeki talep ve yatırım görünümüleri incelendiğinde küresel ölçekte gittikçe önemli artan bir enerji kaynağı olma yolunda olduğu görülmektedir. Buna göre Grafik 21'de yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgesel bazdaki talep yapıları incelendiğinde 2000-2018 arası

dönemde tüm bölgelerde arttığı görülmüştür. Bu dönemde dünya yenilenebilir enerji talebi toplamda %112 artarken K. Amerika'da %46, Orta ve G. Amerika'da %41, Avrupa'da %90, Afrika'da %54, Orta Doğu'da %67, Avrasya'da %19 ve Asya-Pasifik'te %330 oranında artış meydana gelmiştir (Grafik 29).

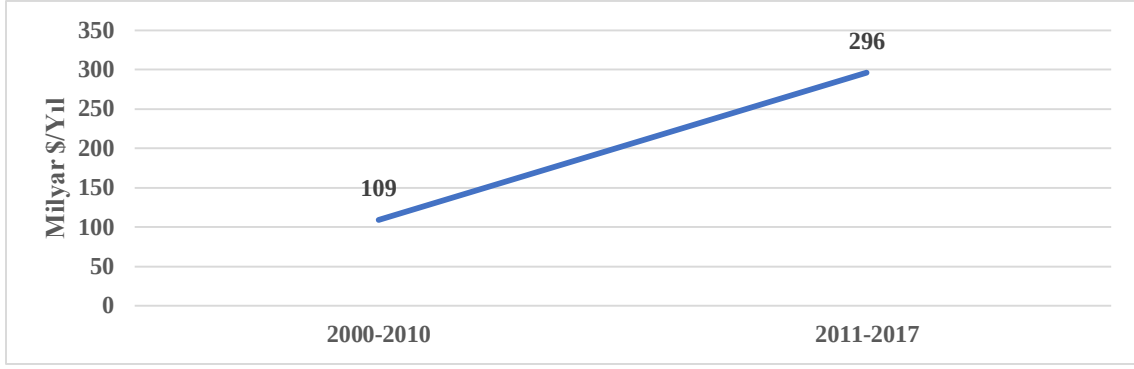


Grafik 29: 2000-2018 Arası Dönemde Küresel Bazda Yenilenebilir Enerji Talebi Görünümleri

Kaynak: BP, 2019; IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu talep artışlarında sektörel bazda ise, talep artışının en yoğun yaşanacağı sektörün enerji sektörü olacağı tahmin edilmektedir. Enerji sektörünün 2017 yılında %25 olan yenilenebilir elektrik üretiminin 2040 yılına kadar %41'e ulaşması beklenmektedir. Bunun yanında sanayi ve inşaat sektörlerinin ısınma amaçlı olarak 2017 yılında %10 olan yenilenebilir enerji talebinin 2017 yılında %15'e, taşımacılık sektörünün yenilenebilir yakıt talebinin de 2017'de %3'ten 2040 yılına kadar %6'ya çıkacağı muhtemel gözükmemektedir (IEA, 2018).

Yenilenebilir enerji kaynaklarına 2000-2017 dönemde yıllık bazda yapılan yatırımlara bakıldığında bu süre içerisinde yıllık bazda toplama %172 oranında artarak 109 milyar \$'dan 296 milyar \$'a ulaşmıştır (Grafik 30). Küresel ölçekteki toplam enerji yatırımları içerisinde ise 2000-2010 arası dönemde %29 olan payı 2011-2018 arası dönemde %39,5'e yükselmiştir (IEA, 2018).



Grafik 30: 2000-2017 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Geneline Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri

Kaynak: IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Tüm bunların neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya birincil enerji talebi içerisinde 2000 yılında %8 olan payı 2018 yılında %11'e kadar yükselmiştir (Grafik 31).



Grafik 31: 2000-2018 Arası Dönemde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dünya Toplam Enerji Talebi İçerisindeki Görünümleri

Kaynak: BP, 2019; IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynakları, küresel çapta gittikçe önem kazanmasına rağmen bazı olumsuz durumları da bünyelerinde barındırmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynakları, meteorolojik kökenli enerji kaynakları olduğundan meydana gelebilecek meteorolojik dengesizlikler hiç kuşkusuz ki yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek olan enerji üretimlerini de olumsuz yönde etkileyecektir. Küresel ısınmanın ciddi boyutlara ulaşması, rüzgar esme hızının istenilen seviyelerde olmaması, güneşli gün sayısının az olması vb. gibi meteorolojik kökenli durumlar karşısında yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimlerinde istenilen verim sağlanamayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında yaşanabilecek bu türden olumsuzluklar karşısında dünya enerji

talebinin karşılanabilmesi ve enerji arzının kesintiye uğramaması, için bu enerji kaynaklarına alternatif oluşturabilecek enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bakımda gerek temizliği nedeniyle karbon emisyonu üretmemesi ya da çok az, gerekse yüksek enerji verimlilikleri nedeniyle alternatif enerji kaynakları olan hidrojen, nükleer füzyon ve dördüncü bölümde anlatılacak olan bor enerjisi bu kapsamda iyi birer seçenek oluşturmaktadırlar.

1.2.3. Hidrojen Enerjisi

Hidrojenle ilgili çalışmaların temeli yaklaşık 1500'lü yıllara dayanmasına rağmen hidrojene element özelliği 1776 yılında Henry Cavandish tarafından kazandırılmıştır. Hidrojen, kelime kökeni olarak “hydro” ve “genes” kelimelerinin birleşimiyle oluşan ve Yunanca “su meydana getiren-su oluşturan” anlamlarına gelen bir kelimedir. Hidrojen, sembolü “H” ve atom numarası 1, renksiz, kokusuz, tatsız ve saydam bir görünüme sahip, 0°C’de ve 1 atm basınçta yaklaşık 0,0898 g/l ile ağırlık bakımından yeryüzünde en hafif element olup periyodik tablonun sol üst köşesinde bulunan 1A grubunda yer alan bir elementtir. Hidrojen, bunların yanında 0,79 A atom yarıçapına ve mol başına 0,05868 KJ değerinde füzyon enerjisine sahip olabilmektedir. Hidrojen, oksijenle birleşerek suyu oluşturan iki ana elementten biridir ve bu sebeple deniz, okyanus vb. suyun bol bulunduğu alanlarda yüksek mertebelerde bulunmaktadır. Gaz formundaki hidrojenin ise atmosferdeki oranı düşüktür. Hidrojen aynı zamanda fosil enerji kaynaklarından olan petrolün ve kömürün ve doğadaki bitkilerin yapılarında da bulunabilmektedir. Ayrıca hidrojen, ^2H (döteryum) ve ^3H (trityum) olmak üzere iki izotopa sahiptir ve bu izotoplar helyum oluşumunu sağlayarak füzyon enerjisinin ana kaynağını oluşturmaktadır (Noyan, 2003; Oral - Çelik, 2005).

Tüm bunların yanında hidrojen son derece verimli bir enerji kaynağıdır. Hidrojenin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 20’de verilmektedir. Buna göre hidrojen, fosil enerji yakıtlarıyla mukayese edildiğinde kg başına enerji değeri bakımından yaklaşık olarak doğalgaza göre 2,5 kat, benzin ve dizele göre 3’er kat, LPG’ye göre 2,82 kat ve kömüre göre de 4-9 kat daha fazla enerji değerine sahiptir (bk. Tablo 2; Tablo 4; Tablo 6). Ayrıca hidrojen yaklaşık -260 °C’lik donma derecesi ile benzine göre soğuğa karşı yaklaşık 5 kat daha fazla mukavemet gösterebilmektedir (Tablo 20).

Hidrojenin difüzyon katsayısı bakımından da fosil yakıtlara göre üstünlüğü söz konusudur. Difüzyon katsayısının yüksek oluşu yanma olayını gerçekleştiren hava - yakıtın birbirlerine geçişini kolaylaştırmakta ve bir homojenite sağlayarak yanma verimini arttırmaktadır. Hidrojenin stokiometrik karışım oranları benzinli yakıta göre yaklaşık 7-8 kat daha fazladır. Bu durum yanmanın daha çabuk gerçekleşmesini sağlamakta ve ısı verimi yükseltmektedir. Hidrojen, 130 ROS gibi yüksek oktan değerine sahiptir. Benzin için bu değerler 91-100 ROS ve LPG için ise 85-102 ROS aralığındadır. Oktan değerinin yüksek olması aracın vuruntusuz çalışmasına ve motorun içerisindeki pistonların havayı daha fazla sıkıştırarak motor gücünün artmasını sağlamaktadır. Hidrojenin yüksek laminar alev hızına sahip olması yine ısı değerini attıran başka bir parametredir. Bunlara ek olarak hidrojen, geniş bir tutuşma sınırları içerisinde faaliyetini sürdürmektedir. Bu da hidrojene geniş bir karışım kompozisyonu sağlayarak yanma olayının daha etkili bir şekilde gerçekleşmesine ve zararlı gazların açığa çıkmasını engellemektedir (Şahin, 2009).

Tablo 20: Hidrojenin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Parametreler	Değerler
Kimyasal Formülü	H²
Özgül Ağırlığı (sıvı) (kg/dm³)	0,07
Isıl Değeri (Mj/kg)	119,90-141,90
Stokiometrik Karışımı (%)	29,53
Tutuşma Aralığı (%)	4,1-74
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	0,15-4,36
Difüzyon Katsayısı (m²/s)	0,61
Laminar Alev Hızı (m/s)	2,91
Kaynama Derecesi (°C)	-252,85
Donma Derecesi (°C)	-259,15
Kendi Başına Tutuşma Sıcaklığı (°C)	585
Oktan Sayısı (ROS)	130

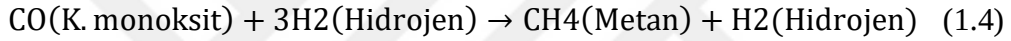
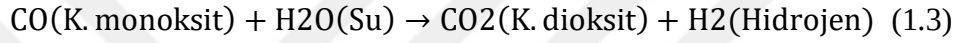
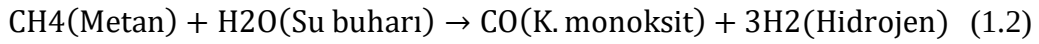
Kaynak: Soruşbay, 2003; Veziroğlu - Barbir, 1998'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidrojenin diğer enerji kaynaklarına karşı tüm bu üstünlüklerinin yanı sıra hidrojenin, bir enerji kaynağı olarak kullanabilmesi için onun saflaştırılması gerekmektedir. Bu nedenden ötürü geçmişten günümüze dek yapılan ve yapılmakta olan çalışmalar neticesinde saf hidrojenin eldesinde; fosil enerji kaynakları, yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer enerji kaynakları ve kimyasal kaynaklı bileşikler kullanılmak üzere

çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu üretim yöntemleri ise aşağıda belirtilmektedir.

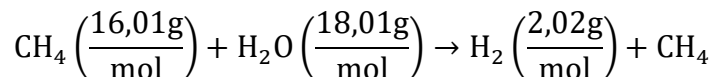
Metan-Buhar Yapılandırılması Yöntemi

Metan-Buhar yapılandırma yönteminde, temel olarak doğalgazın da tamamına yakınının oluşturan metan gazının su buharı ile tepkimeye girmesi sonucunda oluşan hidrojen eldesini içermektedir. Bu yöntem, saf hidrojen eldesinde en çok kullanılan yöntem olmakla birlikte kimyasal reaksiyon;



şeklinde ve 3 aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama endotermik (içsel) bir aşamadır. Bu aşamada metan gazı, su buharı ile karıştırılarak alaşımly yapıya sahip bir çelik boru sisteminin içerisinde bulunan nikel bazlı bir katalizör ile reaksiyona sokularak sentez gazı elde edilir ve bu reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan enerji metan gazının yanmasıyla elde edilmektedir. Bu reaksiyon maksimum 700-950 °C'ye kadar olan sıcaklıklar için geçerli olup daha yüksek reaksiyon sıcaklığı durumunda çelik boru sistemi deformasyona uğramaktadır. İkinci aşamada; birinci aşamada elde edilen sentez gazı yaklaşık 350 °C'ye kadar soğutulmuş bir ısı geri kazanım aşamasından geçmekte ve ilave hidrojen üretimi için su-gaz kaydırma reaktöründe beslenmektedir. 3. aşamada ise; soğutulmuş gazın yapısında bulunan CO₂ (karbondioksit) ve CO (karbonmonoksit) gazları, saf hidrojen eldesi için ayrıştırılmaktadır. Üçüncü aşama sonucunda üretilen saf hidrojenin maliyeti GJ başına 6 \$'dır. Ancak bu üretim maliyetine CO₂ (karbondioksit)'nin yakalama ve depolama maliyetleri dahil değildir. Onlar da eklendiğinde üretim maliyetleri artmaktadır (Steinberg - Cheng, 1989; UNEP, 2006).

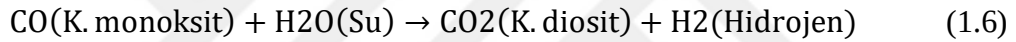
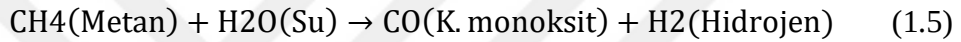
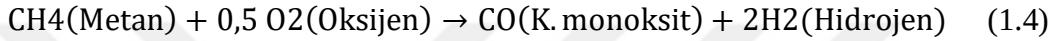
Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği;



buna göre (2,02 g/mol /34,05 g/mol) *100'den %5,93'dir. Bu oran, aynı zamadan reaksiyonun hidrojen depolayabilme kapasitesini göstermektedir.

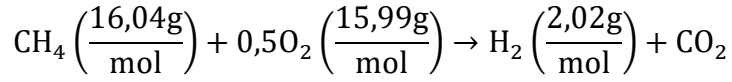
Kısmi Oksidasyon Yöntemi

Kısmi Oksidasyon yöntemi, esas itibariyle metana (doğalgaz) ilave olarak etanol hatta benzin gibi ağır hidrokarbonlardan hidrojen üretimi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, tıpkı metan-buhar yapılandırma yönteminde olduğu gibi sentez gaz üretimi, su-gaz kaydırma ve gaz saflaştırma olmak üzere 3 aşamada gerçekleşmektedir. Oluşan reaksiyon;



şeklindedir. Reaksiyon, 1 mol CH₄ (metan) molekülünün 0,5 mol saf O₂ (oksijen) atomu ile reaksiyona girmesi sonucunda 1 mol CO (K.monoksit) ve 2 mol H₂ (Hidrojen)'in üretilmesi ile başlamaktadır. Birinci aşamada yani sentez gaz üretim aşamasında, hidrokarbon besleme stoku kısmi olarak saf O₂ ile oksitlenmekte ve CO buhar ile değişime girerek CO₂ ve H₂ üretimi gerçekleşmektedir. Bu reaksiyon exotermiktir (dışsal). İkinci aşamada ise yani hidrokarbon-buhar reaksiyonu endotermiktir (içsel) ve reaksiyon için gerekli olan ısı enerji tıpkı metan-buhar yapılandırma yönteminde olduğu gibi yakıtın (metan, etanol, vb.) yakılmasıyla elde edilmektedir. Reaksiyonun çalışma sıcaklığı çok yüksek olup yaklaşık 1200-1500 °C mertebelerindedir ve işlem sonucunda sentez gaz, su ile bastırılmakta ve oluşan cüruf sistemden atılmaktadır. Bununla birlikte hammaddede bulunan S (Sülfür), H₂S'ye (Hidrojen- Sülfür) dönüştürülmektedir. Son aşamada H₂S bileşiğinden, S uzaklaştırılarak serbest kalan H₂ buhar reaksiyonundan gelen gaz ile su-gaz kaydırma ve saflaştırma işlemlerine tabi tutularak saf hidrojen elde edilmektedir. Bu yöntem, karbon emisyonuna olanak tanımakla birlikte ulaştırma ve sabit güç uygulamaları için kullanılabilmektedir. (Veziroğlu - Babir, 1998).

Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği;



buradan $(2,02\text{g/mol} / 24,03\text{g/mol}) * 100$ 'den %8,40 olarak meydana gelmektedir.

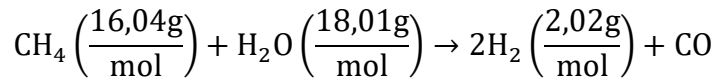
Ototermal Dönüşüm Yöntemi

Bu yöntem, kısmi oksidasyon ile metan-buhar yapılandırma yöntemlerinin kombine edilmiş halidir. Yöntemin kimyasal reaksiyonu;



olarak toplam reaksiyon exotermiktir (dışsal). Reaksiyon, 100 bar gaz basıncı altında gerçekleşirken reaksiyon sonucunda açığa çıkan ısı 950-1100 °C dolaylarındadır ve reaksiyon sonucunda açığa çıkan CO, su-gaz kaydırma işlemi ile uğratarak H₂ üretimi gerçekleşmektedir. Bunun yanında işlem sonucunda açığa çıkan gazların arıtılma ihtiyacı tesis maliyetini önemli ölçüde arttırmakta ve toplam verimliliği azaltmaktadır (Riis vd., 2006).

Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği;



buradan $(4,04\text{g/mol} / 34,05\text{g/mol}) * 100$ 'den %11,86 olarak oluşmaktadır.

Gazlaştırma Yöntemi

Hidrojen üretimi konusunda en eski yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde gazlaştırma işlemi temelde kömür (bitümlü) ve biyokütle hammaddeleri kullanılarak

gerçekleştirilmektedir. Kömür kullanımı suretiyle yapılan gazlaştırma işlemi, Koppers Totzek ve Texaco yöntemleri olmak üzere temelde iki yöntem etrafında gerçekleşmektedir.

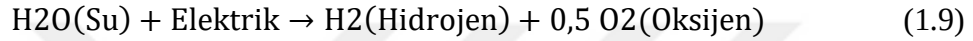
Bu iki yöntemde de kömür, gazlaştırma işlemine alınmadan önce bir dizi öğütme, ufalama ve kurutma işlemlerine tabi tutulmaktadır. Sonrasında sisteme dışarıdan hava ilave edilmekte ve havanın, hava ayrıştırma tesisinde N_2 (Azot) ve O_2 'ye (Oksijen) ayrışması sağlanmaktadır. Ayrışan bu iki kimyasaldan N_2 , sistemden dışarıya atılırken O_2 sisteme dahil edilmektedir. Texaco yönteminde, daha öncesinden hazırlanmış kömür, yaklaşık 5,5 MPa basınç altında oksijen ve yüksek yoğunluğa sahip su buharı ile oksitlenerek gazlaştırma işlemine tutulmaktadır. Gazlaştırma işlemi sonucunda oluşan ham gaz, kükürttten arındırılma işlemine alınırken, oluşan kül ise sistemden atılmaktadır. Ham gazın, kükürttten arındırılma işlemi sonucunda arınan kısmı sentez gaz olarak kaydırma tesisine alınırken, arınmamış kısmı ise yan ürün olarak kükürt oluşumuna gönderilmektedir. Daha sonrasında sentez gaz, kaydırma tesisinde karbondioksit ve hidrojene ayrılarak saflaştırılmaktadır. Koppers Totzek yöntemi ise, Texaco yöntemi ile temelde aynı işlem basamaklarında oluşmasına rağmen aradaki tek fark, sentez gazın kaydırma tesisine gönderilmeden önce yaklaşık 3 MPa basıncına tabi tutulmasıdır. Hidrojen üretimi için katı yakıtların kullanan bu sistemin en önemli dezavantajı, büyük miktarlarda külün uzaklaştırılması gerekliliği nedeniyle karmaşık üretim ve katı maddelerin işlenmesinin beraberinde getirdiği ek maliyet yapısıdır (Steinberg - Cheng, 1989).

Gazlaştırma işleminin diğer bir hammadde kaynağı olan biyokütle ile gazlaştırma işlemi, yüksek kükürt ve kül içeriğine sahip kömürün yerine düşük kükürt ve kül içeriğine sahip (odun, bitki atıkları, gübre vb.) biyokütlesel hammaddelerin gazlaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, sentez gazı üretimi için CH_4 , CO ve CO_2 kısmi oksidasyona uğramakta ve oluşan sentez gazı CO kaydırma işlemiyle zenginleştirilmektedir. Reaksiyon sonucunda oluşan CO bakımından zengin olan sentez gazı, CO_2 ve H_2 oluşumu için ayrı bir işleme tabi tutulmakta, işlem sonucunda oluşan CO_2 ve H_2 , ayrıştırılarak saf hidrojen elde edilmektedir. Bu yöntemle, kömürün gazlaştırılması sonucunda ortaya çıkan karbondioksit, kükürt ve azot gibi çevreye zarar veren zararlı gaz emisyonlarının azaltılabilmektedir. Bunun yanında sistem, yüksek

katran oluşumuna sebebiyet vermektedir. Fakat bu olumsuz durum uygun yöntemler kullanılarak azaltılabilmektedir. Ayrıca biyokütle hammaddelerinin bol ve ucuz bulunduğu alanlar haricinde kıt olması sebebiyle hidrojen üretim maliyetlerini arttırabilmektedir (Özdemir - Mutlubaş, 2019; Seçer vd., 2018; Tolay vd., 2009; UNEP, 2006).

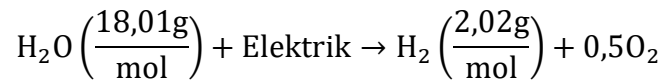
Elektroliz Yöntemi

Elektroliz, genel olarak suyun elektriksel doğru akımla O₂ ve H₂'ye ayrıştırılması işlemidir. Bu işlemin temel kimyasal reaksiyonu;



şeklindedir. Bu reaksiyonun kimyasal açıklaması ise, 1 mol suyun elektriksel güç alarak 1 mol hidrojene ve 0,5 mol oksijene ayrışması şeklinde olabilmektedir. Bir elektroliz sisteminde, elektroliz hücresi içerisinde elektrot plakaları ve kullanılan teknolojiye göre farklı elektrolitler (iletken sıvı, asidik vb.) bulunmaktadır. Sistemin çalışma prensibi olarak öncelikle sistem içerisindeki elektriksel güç, elektroliz hücresi içerisinde yer alan elektrotlarla bir doğru akım oluşturulmaktadır. Oluşturulan doğru akım, iletken su/asidik yapıya sahip elektrolitler içerisinde anottan katoda doğru geçmektedir. Katoda geçen iletken su/asidik yapı da, sonrasında katottan çıkan H₂'ye ve anottan çıkan O₂'ye ayrıışmaktadır (Eroğlu - Özçelik, 2009; Riis vd., 2006).

Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği elektrik hesaba katılmadığında;



Buradan (2,02g/mol / 18,01g/mol)*100'den %11,21 olmaktadır. Reaksiyona girdi olarak elektriğin de hesaba katılması durumunda bu oranın daha da aşağıya düşmesi mümkün gözükmemektedir.

Elektroliz işlemi genel hatlarıyla bu şekilde olmakla birlikte kendisini üç farklı yapı içerisinde gösterebilmektedir. Bunlar; elektroliz pilleri, güneş pilleri (panelleri) ve

nükleer uygulamalar şeklindedir. Elektriz işlemi elektroliz pillerinde; AEC (Alkali Elektroliz Pilleri), PEMEC (Proton Değişimli Membran Elektroliz Pilleri) ve SOEC (Katı Oksit Elektroliz Pilleri) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu pillerden AEC, en eski SOEC ise en yeni elektroliz teknolojisidir. AEC, sabit uygulamalarda ve büyük ölçekli endüstriler için yaygın olarak kullanılabilir. Bu sistem, düşük akım yoğunluklarında ve negatif çalışma basıncında faaliyetini gerçekleştirmektedir. Bu da sistemin boyutunu ve H₂ üretim maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte sistemin aktif çalışma durumu sınırlıdır ve bu nedenden ötürü sistemin verimliliği ve H₂ gazının saflığı önemli ölçüde düşmektedir.

PEMEC, hem sabit hem de mobil uygulamalar için kullanılabilir. Bu sistemin AEC elektrolizörlere göre en büyük avantajı, yüksek güvenliğe, yoğunluğa, çalışma basıncına ve kompakt bir yapıya sahip olmasıdır. Fakat sistemin, pahalı platin katalizör ve florlu membran malzemeler kullanması nedeniyle maliyetli olması ayrıca saf su gerekliliği ve yüksek basınç değerleri altında çalışmasından dolayı karmaşık yapısı ve kısa ömürlü oluşu önemli eksikliğidir. SOEC, yüksek sıcaklık değerlerinde çalışabilir. Bu durum sistemdeki elektrot reaksiyonlarının daha geri dönüştürülebilir olmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanında sistem; yüksek elektriksel verimliliğe, düşük malzeme maliyetine ve yakıt pili olarak ters modda veya su buharından ve karbondioksitten ko-elektroliz modda sentez gaz üretimi şeklinde çalışma imkanına sahiptir. Bunların yanında sistemin en önemli eksikliği ise, yüksek mertebelerdeki çalışma sıcaklıklarından dolayı ciddi malzeme kayıplarının yaşanması olmaktadır. Elektroliz pil sistemlerinin önemli bir sorunu yüksek maliyetli oluşudur. KW başına sermaye maliyetleri baz alındığında bu sistemlerden; AEC'nin 1000 €, PEMEC'nin 2000 € ve SOEC'nin ise 2000 €'nın üzerinde olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber sistemlerin hidrojen üretimi için sermaye maliyetleri göz önüne alındığında, AEC sisteminin metan-buhar yapılandırmasına karşı yaklaşık 2-3 kat, PEMEC sisteminin ise yaklaşık 4-6 kat daha pahalı olduğu belirtilmektedir (Riis vd., 2006; Schmidt vd., 2017).

Güneş pili (panelleri) sisteminde gerçekleştirilen elektroliz işlemi diğer hidrojen üretim yöntemlerine kıyasla (gazlaştırma, metan-buhar yapılandırılması vb.) daha sürdürülebilir

durumdayken hidrojen üretim verimlilikleri oldukça düşük (%16) seyretmektedir (Joshi vd., 2010). Elektroliz yöntemi ile hidrojen eldesinin nükleer uygulamalardaki hali ise, yüksek sıcaklıklı buhar elektrolizi şeklindedir. Bu yöntemin klasik elektroliz yöntemine göre tek farkı, elektroliz işleminin gerçekleşmesi için gerekli olarak elektrik enerjisinin belirli bir bölümünün bertaraf edilerek onun yerine ısı enerjisinin kullanılmasıdır. Bu da H₂ üretim maliyetlerinin, klasik elektroliz yöntemine göre önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca bu sistemin hücreyel ekipmanları seramik yapıli malzemelerden inşa edildiğinden ekipmanların paslanma sorunu ortadan kaldırılabilmekte ve sistemin hiç karbon emisyonu üretmemesi de önemli bir avantaj unsurunu beraberinde getirmektedir (B. Özgener, 2009; H. Özgener, 2009).

Foto-Elektroliz Yöntemi

Suyun, güneşten gelen fotonları emerek yarı iletken özelliğe sahip bir fotokatalizör tarafından üretilen elektriksel yükli parçalanması suretiyle H₂ ve O₂'ye ayrışması işlemidir. Bu işlemde fotokatalizör, güneş fotonlarının emilimi ile elektron delik çiftlerini oluşturmaktadır. Oluşan delik çiftleri, bir taraftan anotta pozitif yüklü hidrojen iyonları ve O₂'yi meydana getirebilmek için su ile kimyasal tepkimeye girerken, diğler taraftan H₂ üretimi için pozitif yüklü hidrojen iyonları ile birleşmek üzere katoda geçerek reaktif oluşumunu tamamlamaktadır. Reaktif oluşumu tamamlanan elektron delik çiftleri, fotokatalizör ve elektrolit arasındaki elektriksel bölgede parçalanarak H₂ ve O₂'ye ayrışmaktadır. Bunun yanında bu sistemin yapılan çalışmalar neticesinde termodinamiksel verimliliği yaklaşık %18 civarında tespit edilmiştir ve bu verim, küçük miktarlardaki hidrojen üretiminden sağlanmıştır. Ayrıca sistemin güneş enerjisi yoluyla hidrojene dönüşüm verimliliğinin güneş spektrumlarını kısıtlaması nedeniyle bu sistem, günlük kullanım için ihtiyaçlara tam olarak cevap verememektedir. Fakat sistemle ilgili iyileştirme çalışmaları devam etmektedir (Nazir vd., 2020; Joshi vd., 2010).

Biyofotoliz Yöntemi

Biyofotoliz yoluyla hidrojen eldesi, doğrudan ve dolaylı biyofotoliz olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu iki yöntemde de fotoliz işlemi başlıca algler, siyanobakteriler, sülfürsüz mor bakteriler, vb. biyolojik organizmalar tarafından gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu bakteriler yoluyla üretilen hidrojen; oksijenli ve

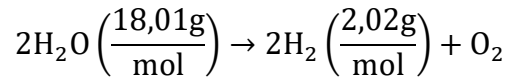
oksijensiz olarak elde edilmektedir. Oksijenli biyofotoliz-hidrojen üretimi, siyanobakterilerin ve tek çekirdek yapısına ve çeşitli organellere sahip alglerin sudaki fotoototrofik gelişimi esasına dayanırken, oksijensiz biyofotoliz-hidrojen eldesi, sülfürsüz mor bakteriler tarafından güneş ışığı bir enerji kaynağı olarak emilerek yapısındaki organik yapıları asitler H₂ üretimine dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır.

Bu bakımdan doğrudan biyofotoliz, suyun içerisinde yer alan algler ve siyanobakteriler gibi çeşitli mikroorganizmaların güneş ışığını kullanarak fotosentez olayı gerçekleştirmesi suretiyle H₂ üretimini kapsamaktadır. Bu şekilde hidrojen eldesinde güneş ışığı, suyu parçalayarak suyun O₂'ye ve H₂'ye ayrışmasının sağlamaktadır ve sistemin kimyasal reaksiyonu;



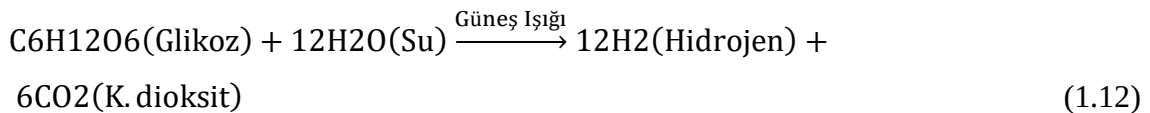
sonucunda 2 mol H₂O atomunun güneş ışığı ile parçalanması sonucunda 2 mol H₂ ve 1 mol O₂ gazı açığa çıkmaktadır (Poudyal vd., 2015).

Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği ise;



buradan $(4,04\text{g/mol} / 36,02\text{g/mol}) * 100$ 'den %11,21 olmaktadır.

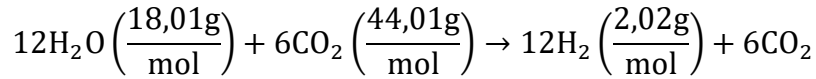
Dolaylı biyofotoliz ise, algler, siyanobakteriler vb. biyolojik mikroorganizmaların fotosentezi yoluyla yapılarındaki glikozun sentezlenerek H₂ üretilmesi işlemidir. Reaksiyon iki aşamada gerçekleşmekte olup;



(Levin vd., 2004).

Birinci reaksiyonda, suyun içerisinde bulunan çeşitli mikroorganizmaların güneş ışığı altında yaptığı fotosentez sonucunda 1 mol glikoz ve 6 mol oksijen üretimi gerçekleşirken, ikinci reaksiyonda; birinci reaksiyonda üretilen 1 mol değerinde glikoz, su ile reaksiyona girerek güneş ışığı ile parçalanması sonucunda 12 mol hidrojen ve 6 mol karbondioksit üretimi gerçekleşmektedir.

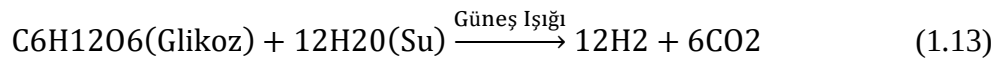
Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği;



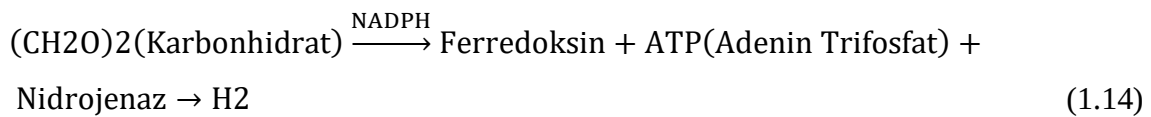
buradan $(24,24\text{g/mol} / 480,18\text{g/mol}) * 100$ 'den %5,04 olarak ortaya çıkmaktadır.

Foto-Mayalanma Yöntemi

Foto-Mayalanma, esas itibariyle fotosentez yapabilme özelliğine sahip bakterilerin klorofil, carotenoidis vb. pigmentleri vasıtasıyla H₂ üretiminin gerçekleşmesi işlemidir. Bu yöntemde, fotosentez oluşumu sırasında güneşten gelen ışınlar klorofil ve carotenoidis gibi pigmentler aracılığıyla emilerek enerjiye dönüştürülmektedir. Daha sonrasında dönüşen enerji, algleri ve membranı güneş ışığıyla reaksiyona sokmakta ve reaksiyon sırasında güneş ışığı da, suyu parçalayarak protonların, elektronların ve O₂'nin oluşumunu sağlamaktadır. Bununla birlikte nitrojenaz ise, H₂'yi oluşturmak için O₂'nin parçalanmasıyla oluşan proton ve elektronları ATP (Adenozin Trifosfat) ile reaksiyona sokmaktadır (Özdemir - Mutlubaş, 2019). Sistemin kimyasal reaksiyonu;

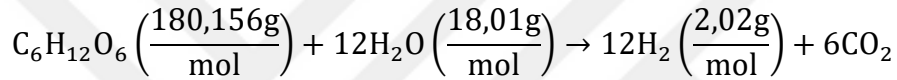


ve genel reaksiyon ise;

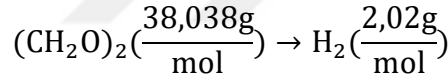


şeklindedir. Bu sistem içerisinde fotosentetik yapıdaki bakteriler önemli miktarlarda enerji üretme kapasiteleri nedeniyle uzun soluklu olarak çalışabilmektedirler. Bunun yanında sistemde, çeşitli kimyasal yapıları bileşiklerden yararlanılarak H₂ eldesi gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin önemli sorunu, H₂ üretimi için gerekli olan güneş enerjisinin doğrudan emilebilmesi için geniş yüzey alanına sahip fotobiyolojik reaktörlere ihtiyaç duyulmasıdır. Bunun yanında bu fotobiyolojik reaktörler, bir yandan maliyetli olduğundan H₂ üretim maliyetlerini arttırırken diğer yandan da ışık dağılımının homojenitesini bozarak sistemdeki ışık dönüşüm verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır (Das vd., 2008).

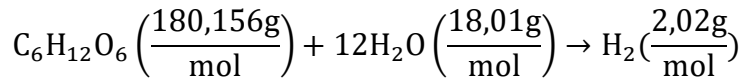
Reaksiyonların teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimlilikleri;



buradan $(24,04g/mol / 396,27g/mol) * 100$ 'den %6,06 ve



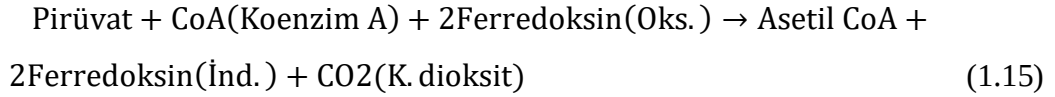
buradan da $(2,02g/mol / 38,038g/mol) * 100$ 'den %6,30 olabilmektedir. Toplamda ise;



$(2,02g/mol / 396,27g/mol) * 100$ 'den %0,5'dir.

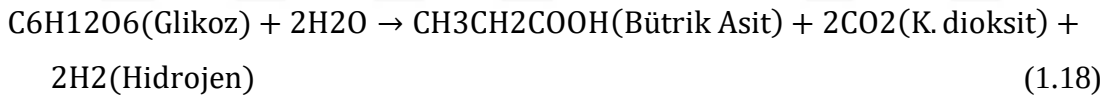
Karanlık Mayalanma Yöntemi

Karanlık mayalanma işleminde glikoz, H₂ üretimi için kimyasal reaksiyona girmeden önce bir takım dönüştürme, oksitlenme ve indirgenme işlemlerine maruz kalmaktadır. Bu işlemlerin yer aldığı kimyasal reaksiyon;



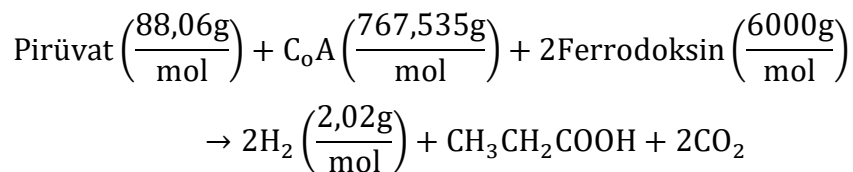
şeklinde olup glikoz öncelikle pirüvata dönüştürülmektedir. Daha sonrasında bu pirüvat, ATP üretimi için Asetil koenzim tarafından oksitlenerek ferredoksin indirgemesine uğratılmaktadır ve indirgenmiş ferredoksin de, pozitif yüklü hidrojen elektronlarını ve oksitlenmiş ferredoksinin yeniden oluşturulması hidrojenaz tarafından oksitlenerek reaksiyona hazır hale getirilmektedir (Das vd., 2008).

Reaksiyona hazır hale gelen glikoz da, oksijensiz bir ortamda çeşitli bakteriler tarafından oksidasyona uğratarak H₂ eldesi elde edilmektedir.



Reaksiyon sonucunda elde edilen H₂ üretimleri, (1.37) reaksiyonunda 1 mol glikoz başına 4 mol H₂ iken, (1.38) reaksiyonunda 1 mol glikoz başına 2 mol H₂ şeklindedir. Reaksiyon (1.17)'ye kıyasla reaksiyon (1.18)'deki hidrojen üretiminin düşük olmasının nedeni, bütrik asitin yapısında yer alan propiyonat ve laktik asitlerin H₂ üretim kapasitelerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Levin vd., 2004).

Bunun yanında toplam reaksiyon (girdi ve hidrojen çıktısı olarak) denklem (1.15)'ten denklem (1.18)'e olan teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği ise;



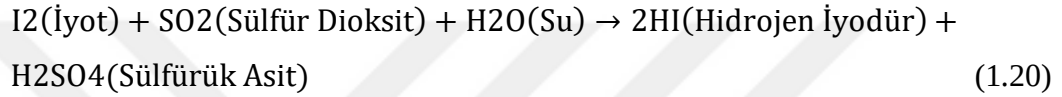
buradan $(4,04 \text{ g/mol} / 12.855,595 \text{ g/mol}) * 100$ 'den %0,03 olmaktadır.

SI (Kükürt-İyot), Cu-Cl (Bakır-Klor) ve Westinghouse Yöntemi

SI yöntemiyle H₂ üretimi 3 aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada H₂SO₄;



yaklaşık 800 °C altında SO₂, H₂O ve O₂'ye ayrılmaktadır. Daha sonra birinci aşamada ürün olarak ayrılan SO₂ ve H₂O ikinci aşamada;

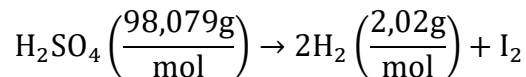


I₂ ile ısı bir ortamda reaksiyona girerek üçüncü aşamada girdi olarak kullanılacak olan HI'nın oluşmasını sağlamaktadır. Üçüncü aşamada ise, HI ayrıştırma işlemine tabi tutularak H₂ ve yan ürün olarak da I₂'ye ayrıştırılmaktadır.



Bu yöntemde H₂, normal elektroliz yöntemine göre %60 daha ucuza üretilmektedir. Bunun nedeni, reaksiyon için gerekli olan enerjinin elektrikten değil nükleer reaktörlerden gelmesinden kaynaklanmaktadır (Forsberg, 2003).

Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği (denklem 1.19'dan denklem 1.21'e);



buradan $(4,04 \text{ g/mol} / 98,079 \text{ g/mol}) * 100$ 'den %4,11'dir.

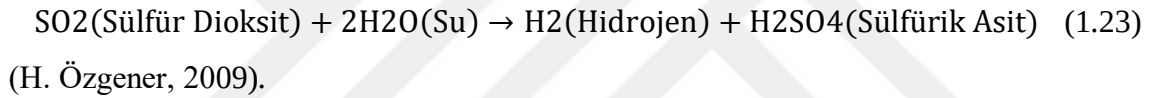
Cu-Cl (Bakır-Klor) yöntemi, SI yöntemine göre daha düşük sıcaklık değerleri altında gerçekleştirilen bir H₂ üretim yöntemidir ve bu yöntem SFR (Sodyum Soğutmalı

Reaktör) ler ile kombineli bir şekilde çalıştırılabilmektedir. Bunun yanında bu yöntemde, H₂ üretimini sağlayan reaktör ekipmanlarının paslanma problemleri SI yöntemine göre azaltılabilmektedir.

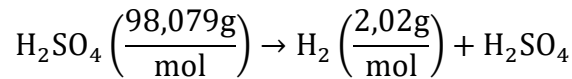
Westinghouse yönteminde ise, H₂ üretimi iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada tıpkı SI yönteminde olduğu gibi H₂SO₄, ayrıştırma işlemine tabi tutularak H₂O ve SO₂'ye ayrışması sağlanmaktadır.



İkinci aşama, H₂ üretiminin gerçekleştiği elektrokimyasal aşamadır. Bu aşamada, birinci aşamada meydana gelen SO₂, H₂O ile elektriksel bir ortamda reaksiyona girerek H₂ ve yan ürün olarak da H₂SO₄'ün oluşumu sağlamaktadır.



Reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği;



buradan da $(2,02 \text{ g/mol} / 98,079 \text{ g/mol}) * 100$ 'den %2,05'dir.

NABH₄ (Sodyum Borhidrit) Yöntemi

Bu yöntem dördüncü bölümde anlatılacaktır.

Hidrojen üretim yöntemleri bu şekilde olmakla birlikte, bir enerji kaynağını sadece üretmek o enerji kaynağının nihai kullanılabilir olması açısından yeterli olmamaktadır. Aynı şekilde o enerji kaynağının pazarlanabilir olması sağlanarak endüstriyel kullanıma açılabilmesi, bunun içinde belirli başlı bazı kriterlerin yerine getirilebilmesi gerekmektedir. Bu kriterlerin başında da enerji kaynağının maliyeti (üretim, depolama, taşıma), verimliliği ve çevresel duyarlılığı (karbon emisyonu yaratmaması) ön planda

olmaktadır. Buna göre bir enerji kaynağı ne kadar düşük maliyetle, ne kadar verimliği yüksek ve ne kadar çok çevreye duyarlı olarak üretilirse o denli pazarlanabilir ve endüstriyel olarak kullanılabilir hale gelmektedir. Tüm bunlara göre bazı hidrojen üretim teknolojilerinin hidrojenin üretim maliyetleri ve karbon emisyon değerleri düzeyleri Tablo 21’de verilmektedir.

Tablo 21: Belirli Başlı Bazı Hidrojen Üretim Teknolojilerinin Hidrojen Üretim Maliyetleri ve Karbon Emisyonu Değerleri

Üretim Teknolojileri	Üretim Maliyetleri (\$/kgH ₂)	Üretim Teknolojileri	Üretim Maliyetleri (kgCO ₂ /kgH ₂)
Metan-Buhar Yapılandırılması	2	Elektroliz(Buhar)	0
Kısmi Oksidasyon	1,5-2	Foto Mayalanma	0,5
Ototermal Yapılandırma	1,5	Foto Elektroliz	2
Gazlaştırma(Kömür)	2	Elektroliz(Güneş)	2
Gazlaştırma(Biyokütle)	1,5-2	Elektroliz(PEMEC)	8
Elektroliz(AEC)	5	Biyofotoliz	3
Elektroliz(PEMEC)	5	Metan-Buhar Yapılandırılması	10
Foto Elektroliz	10	Gazlaştırma(Kömür)	20
Biyofotoliz ve Karanlık Mayalanma	2		
Foto Mayalanma	3		

Kaynak: IEA, 2019; Nazir vd., 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Tablo 21’deki veriler incelendiğinde üretim maliyetleri açısından elektroliz teknolojilerinin hammadesel kaynağının büyük bir bölümünün elektrik enerjisine dayanması nedeniyle diğer hidrojen üretim yöntemlerine kıyasla daha pahalı olduğu, bunun dışında kalan diğer üretim teknolojilerinin ise hammadesel kaynağının büyük bir çoğunluğunun fosil kökenli olması nedeniyle daha ucuz olduğu görülmektedir. Ancak CO₂ emisyonu bakımından ise, özellikle metan-buhar yapılandırması (en çok kullanılan hidrojen üretim yöntemi) ve gazlaştırma teknolojilerinin sırasıyla doğalgaz ve kömüre dayanan hammadesel kaynakları nedeniyle ciddi bir karbon salınımına sebebiyet verdiği görülmektedir. Diğer yöntemlerden elektroliz yöntemi ise, mevcut CO₂ emisyon değerleri bakımından hidrojen üretimi konusunda tercih edilebilecek yöntemler arasında yer almaktadır. Ancak elektroliz teknolojilerinin (buhar hariç), hidrojen üretimi

konusunda fosil kökenli teknolojilerle rekabeti açısından üretim maliyetlerinin kesinlikle düşürülmesi gerekmektedir.

Hydrogen Council'in (Hidrojen Konseyi) (2017a) hidrojen enerjisi raporunda, dünya genelinde 2016 yılı itibariyle kg başına 7-8 \$ dolaylarında olan hidrojen üretim maliyetlerinin 2020 yılına kadar 4-6 \$ ve 2050 yılına kadar da 2-4 \$ seviyelerine düşürülerek hidrojenin dünya çapında daha rekabetçi bir hale gelebileceğini belirtilmiştir.

Hidrojen üretim maliyetleri içerisinde de özellikle hammadde maliyetleri hidrojen üretimi konusunda önemli bir yer tutmaktadır. Tablo 22'de yer alan hidrojen üretim teknolojilerinin maliyet yapısı analiz edildiğinde bu durum açıkça görülmektedir. Tablo 22'ye bakıldığında hammadde maliyetlerinin diğer hidrojen üretim teknoloji maliyetleri içerisinde önemli bir yer tuttuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yine hammadde maliyetlerinin, hidrojen konsantrasyonu arttıkça ya da karbon emisyonu azaldıkça arttığı görülmektedir. Bu da demek oluyor ki temiz, karbon salınımına neden olmayan ya da çok düşük karbon salınımında hidrojen eldesinde hammadde maliyetlerinin payı oldukça önemli olmaktadır. Dolayısıyla karbon salınımı yaratmayan ya da çok düşük karbon salınımına neden olacak hidrojen üretiminde girdiyi oluşturacak olan hammaddeye sahip olmak ve onu ucuza üretebilmek oldukça önemli olmaktadır.

Tablo 22: Belli Başlı Bazı Hidrojen Üretim Teknolojileri Tarafından Üretilen Ürünlerin Kimyasal ve Maliyet İçerikleri

Üretim Teknolojileri	Üretilen Ürünün Kimyasal İçerikleri (%)				Maliyetler (%)		
	H2	CO	CO2	CH4 ve Diğ.	Hammadd e	Yatırı m	İşletme ve Bakım Onarım
Metan-Buhar Yapılandırması	74	18	6	2	61	29	10
Kısmi Oksidasyon	46	46	6	1	35	48	17
Gazlaştırma	29-34	48-60	10-17	1	22-26	55-58	20
Elektroliz (Su)	-	-	-	-	82	14	4
Elektroliz (Buhar)	-	-	-	-	66	18	16
Westinghouse	-	-	-	-	66	18	6

Kaynak: Steinberg - Cheng, 1989'Dan Elde Edilen Verileden Oluşturulmuştur.

Hidrojen üretim teknolojilerinin hidrojen üretim verimlilikleri incelendiğinde metan-buhar yapılandırılmasının diğer hidrojen üretim yöntemlerine kıyasla yüksek hidrojen verimliliği sahip olması hidrojen üretimi konusunda dünya genelinde en fazla tercih edilen hidrojen üretim yöntemi olmaktadır. Ancak bu yöntemin, yüksek karbon emisyonuna neden olması ve teorik hidrojen depolama verimliliğinin düşük olması (bk. denklem 1.2; denklem 1.4) sürdürülebilir olmasını engellemektedir. Keza yine gazlaştırma ve kısmi oksidasyon yöntemlerinin gerek hidrojen üretim verimlilik düzeylerinin metan-buhar yapılandırılmasına göre düşük olması, gerek yüksek karbon salınımlarına sebebiyet vermeleri gerekse de bazı durumlarda hammadde teminindeki güçlükler nedeniyle uzun soluklu yöntemler olarak görülmemektedir. Diğer üretim yöntemlerinden olan elektroliz ve bunun dışındakilerin ise üretim verimliliklerinin artırılması gerekmektedir (Tablo 23).

Tablo 23: Bazı Hidrojen Üretim Teknolojilerinin Hidrojen Üretim Verimlilikleri

Üretim Teknolojileri	Hidrojen Üretim Verimlilikleri (%)
Metan-Buhar Yapılandırması	79
Kısmi Oksidasyon	50
Gazlaştırma	58-63
Elektroliz (Su)	27
Elektroliz (Buhar)	45-56
Westinghouse	45-54
Kükürt- İyot	50+
Bakır-Klor	45-48
Ototermal Yapılandırma	73
Elektroliz (AEC)	65
Elektroliz (PEMEC)	57
Foto Mayalanma	3-10

Kaynak: Dayday - Azaklıoğulları, 2009; Forsberg, 2003; IRENA, 2018; Nazir vd., 2020; Steinberg - Cheng, 1989; Veziroğlu - Babir, 1998'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidrojen Depolama Yöntemleri

Hidrojenin üretilmesinden sonra nihai olarak kullanılabilmesi için diğer enerji kaynaklarında da olduğu gibi depolanmak suretiyle kullanım alanlarına doğru ulaştırılması gerekmektedir. Hidrojen, diğer enerji kaynaklarına göre hafif ve düşük yoğunluk değerlerine sahip bir enerji kaynağıdır (bk. Tablo 2; Tablo 4; Tablo 6). Bu da belirli miktarlarda enerji için daha fazla hacim gerektirdiğinden hidrojenin depolanmasını

zorlaştırmaktadır (Kaur, 2019). Ancak geçmişten günümüze dek yapılan ve devam eden çalışmalar neticesinde bu durum aşılmaya çalışılmıştır.

Hidrojen geleneksel olarak sıvı ve gaz fazlarında fazlarda; yeraltında (tuz mağaraları, akiferler ve tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları) ve tanklarda, alternatif olarak katı halde hidritlerde, hidrokarbonlarda, karbon ve nano yapılarda kendisini göstermektedir. Depolanan hidrojen ise, sabit ve mobil uygulamalarda kullanılabilir. Mobil uygulamalarda (özellikle araç teknolojilerinde) ağırlık (hafif olması) ön plandayken, sabit uygulamalarda ise ağırlık önemli olmamaktadır. Bunun yanında depo edilen hidrojenin yüksek enerji yoğunluğuna ve depolama miktarına sahip olması, az yer kaplaması, hafif olması (mobil uygulamalar için) ve doldur-boşalt süresinin düşük olması istenilen özellikleridir. Bu kriterlere bağlı olarak hidrojen depolama yöntemleri arasında son zamanlarda hidrürler (kimyasal olanlar) ve nano yapılar ön plana çıkmaktadır (IEA, 2019; Mat, 2003; Taylor vd., 1986).

Yeraltı Mağaraları ve Tanklar

Hidrojen, yeraltında; tuz mağaralarında, akiferlerde ve bitmiş petrol ve gaz rezervuarlarda depolanabilirken tanklarda ise; gaz ve sıvılaştırılmış şekilde depolanabilmektedir. Yeraltında tuz mağaraları içerisinde depolama, hidrojeni yığın ve uzun soluklu depolamaya, düşük arazi ve işletim maliyetlerine ve yüksek verimliliğe imkan tanınması sebebiyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde hidrojen yaklaşık %98 verimle ve kg başına 6 cent gibi düşük maliyetlerle depolanabilmektedir. Bu yöntem, 1700’lü yıllardan itibaren İngiltere ve ABD gibi gelişmiş ekonomiler tarafından kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de kullanılmakta olan bir yöntemdir. ABD, bu yöntemle 1 aylık süre boyunca yaklaşık olarak 20 bin kiloton hidrojeni depolayabilirken, İngiltere birer kilotonluk depolama kapasitesine sahip olduğu 3 tuz mağarasıyla hidrojeni stoklayabilmektedir. (IEA, 2019).

Bu yöntemin en büyük problemi, jeolojik açıdan her yerde kullanımının mümkün olmamasıdır. Ayrıca bu mağaralarda depolanan hidrojenin yılda yaklaşık olarak %3’üne yakını da kaybolmaktadır. Bu yöntem alternatif olarak ise metal kap teknolojisi geliştirilmiştir. Hidrojen bu metal kaplarda, atmosferik basınçtan 100 bar’a kadar olan

basınç değerleri altında depolanabilmektedir. Bu yöntem, hidrojen taşıma maliyetlerini arttırsa da hidrojeni daha saf ve kompakt bir şekilde depolamaya olanak tanınması sebebiyle umut vadeden bir yöntem olmaktadır (Andersson - Grönkvist, 2019; Veziroğlu - Babir, 1998).

Hidrojenin tanklarda depolanması sabit uygulamalar için ideal bir uygulamadır. Ancak mobil uygulamalar için pek fazla tercih edilmemektedir. Bunun nedeni özellikle gaz formundaki hidrojenin tanklar içerisinde yüksek basınç değerleri (700 bar) altında sıkıştırılmak suretiyle muhafaza edildiğinden bu basınç değerleri altında tanklar oldukça ağırlaşmaktadır. Bu da mobil uygulamalar için istenmeyen bir durumdur. Hidrojenin gaz formunun mobil uygulamalarda kullanılabilmesi için, yaklaşık 300-350 bar basınç değerlerine kadar sıkıştırılmaları gerekmektedir. Bu da patlama riskini barındırmaktadır. (Mat, 2003).

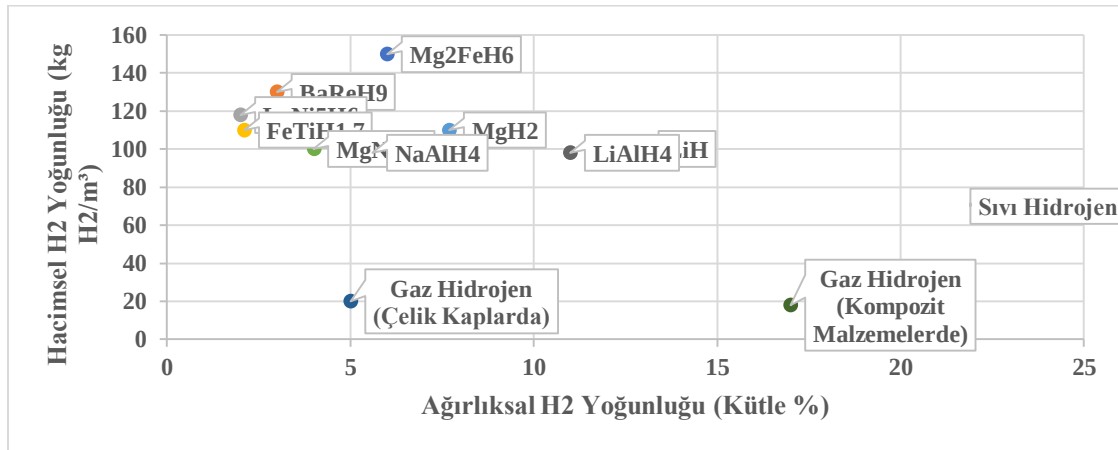
Hidrojenin sıvılaştırılmak suretiyle tanklar içerisinde depolanması gaz fazına daha verimli bir yöntemdir. Bu yöntemde hidrojen tanklar içerisinde sıvı fazda 1 bar basınç altında m^3 başına yaklaşık 70 kg depo edilebilmektedir. Aynı depolama değerleri gaz fazında yaklaşık 850-900 bar'lık basınç değeri altında gerçekleşmektedir. Bu bakımdan hidrojen, tanklar içerisinde gaz fazına göre daha düşük basınç değerleri altında ve daha yüksek yoğunlukta depolanabilme olanağına sahip olmaktadır (Andersson - Grönkvist, 2019). Hidrojen, bu şekilde büyük çaplı olarak havacılıkta, roket fırlatımı olarak uzay uygulamalarında ve küçük çaplı olarak da araçlarda yakıtı olarak kullanılabilir (Veziroğlu - Babir, 1998).

Bu yöntemin önemli sıkıntısı hidrojenin tanklar içerisinde buharlaşmadan kaynaklı olarak zamanla bir bölümünün yok olabilmesidir. Ancak bu durumun deponun ısıya karşı iyi izole edilmesiyle giderilmesi mümkündür. Hidrojenin, gaz fazında tanklarda yüksek basınçlarda depolanması nedeniyle kaza esnasında patlama riski oluşturması nedeniyle güvenlik zafiyetlerini beraberinde getirmesi ve sıvı fazdaki hidrojenin de tank içerisinde belirli bir miktarının buharlaşmaya maruz kalması alternatif depolama yöntemlerini gündeme getirmiştir. Bu yöntemler aşağıda belirtilmektedir.

Hidritler

Hidrojenin depolanmasına yönelik olarak alternatif bir yöntem olan hidritlerde hidrojen; metal ve kimyasal alaşımlı olmak üzere iki şekilde depolanabilmektedir. Metal alaşımlı depolama bu bölümde anlatılacak olup, kimyasal (sodyum borhidrit) bor alaşımlı depolamaya ise dördüncü bölümde değinilecektir.

Hidrojenin metal alaşımlı hidritlerde depolanması; kararlı özellik gösteren nadir toprak veya toprak alkali metallerin tek başlarına veya kararsız özellikte, hidrojenle düşük bağ kurabilen geçiş metaller ile bileşik oluşturmak suretiyle hidrojenin absorbe edilmesiyle gerçekleşmektedir. Hidrojenin metal alaşımlı hidritlerle depo edilmek istenmesinin nedeni hidrit yapıların güvenli oluşları ve hidrojenin hidrit yapıda, sıvı ve gaz fazına göre hacimsel olarak daha yoğun bir şekilde emilebilmesindendir (Jopek vd., 2012). Buna göre hidrojen hidrit yapıda hacimsel olarak sıvı faza göre yaklaşık olarak 1,5 kattan, gaz fazına göre ise yaklaşık olarak 5 kattan daha yoğun bir şekilde emilebilmektedir (Grafik 32). Yani hidrojen bu şekilde daha küçük hacimlerde daha yüksek yoğunluklarda depo edilebilmektedir. Bu özellik, özellikle araç teknolojileri için oldukça önemlidir.



Grafik 32: Bazı Metal Hidritlerin, Sıvı ve Gaz Formundaki Hidrojenin İçerdiği Yoğunluk Değerleri
Kaynak: Jopek vd., 2012'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidrojenin metal hidritlerde depolanması konusunda özellikle magnezyum (Mg), lityum (Li) ve sodyum (Na) gibi element yapıları üzerinde durulmaktadır. Bunun nedeni ise bu element yapılarının ağırlıkça hidrojen depolama kapasitelerinin yüksek oluşudur (özellikle Li ve Mg). Bunların yanında lantan (La), zirkonyum (Zr) ve titanyum (Ti) gibi

elementlerinde hidrojen depolama kapasiteleri de araştırılmaktadır. Bu alaşımların hidrojen depolama kapasiteleri Tablo 24’te verilmektedir.

Tablo 24: Bazı Metal Hidrit Alaşımlarının Hidrojen Depolama Kapasiteleri

Metal Hidrit Alaşımlar	Hidrojen depolama Kapasiteleri (%)
Li3N	10,4
MgH2	7,7
MgH2 + Ni	7,7
Li2NH	6,5
LiNH2	6,5
Li2MgN2	6
MgH2 + Al	5,7
NaAlH4	5,6
Fe0,8Ni0,2TiH6	5,5
MgH2 + Fe	5,3
MgNiH4	4
MgH2 + Ti	2,6
MgH2 + Nb	2,6
Ti0,8Zr0,1Mn1,4V0,2Cr0,4H3,2	2,1
Ti0,98Zr0,02V0,45Fe0,10Cr0,05Mn1,5H3,4	2,1
MgH2 + Cu	1,7
Ca2NH	1,91
TiFeH1,9	1,8
TiFe0,85Mn0,15H1,9	1,8
TiMn1,5H2,47	1,8
Ti0,8Zr0,2Cr0,8Mn1,2H3	1,8
MmNi4,5Mn0,5H6,6	1,5
LaHi3H6,7	1,4
LaNi5H6,3	1,3
TiCoH1,4	1,3

Kaynak: Jopek vd., 2012; Raissi vd.,1996’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre metal hidrit teknolojilerinden Ti, La, Zr ve bazı Mg içerikli alaşımların hidrojen depolama kapasitelerinin oldukça düşük olduğu görülmekte, bu alaşımların geliştirilmeleri gerekmektedir.

Hidrokarbonlar

Etanol, bütanol, metanol vb. hidrokarbon içerikli yakıtlar hidrojenin bir yakıt sistemi içerisinde kullanımına yönelik diğer bir alternatifi oluşturmaktadır. Hidrokarbonları hidrojen yakıt sistemi için alternatif kılan neden, hacimsel olarak (litre) gaz fazındaki

hidrojene göre yaklaşık 3 ila 27 kat, sıvı fazdaki hidrojene göre yaklaşık 4 ila 7 kat daha yoğun enerji içeriğine sahip olmasıdır. Hidrokarbon yapılarında hidrojenin kullanılabilmesi için yüksek sıcaklı buhar eşliğinde ayrıştırılması gerekmektedir. Bu ayrışmayı da en iyi sağlayan hidrokarbon metanoldür. Metanolden bu ayrışma sonucunda teorik olarak yaklaşık %75 oranında hidrojen açığa çıkmaktadır. Bu bakımdan metanol, hidrojen yakıt sistemi için diğer hidrokarbonlardan biraz daha fazla ön planda olabilmektedir. Metanol, benzinden hidrojene dönüşümü sağlanan sıvı bir yakıttır ve benzine göre daha düşük sıcaklık değerleri altında hidrojene dönüşebilmektedir. Bu sistemde, diğer hidrojen depolama yöntemlerine göre araç içerisinde bir hidrojen tankı bulunmamaktadır. Onun yerine araç içerisinde normal bir yakıt tankı ve bir dönüştürücü yer almaktadır ve hidrojen, sisteme bu dönüştürücü aracılığıyla empoze edilmektedir. Bu sistemde dönüştürücü kullanılmasının nedeni, hidrojenin sisteme doğrudan değil dolaylı yoldan yani hidrokarbonların yapısındaki hidrojenin ayrıştırılması suretiyle gelmesindendir (Özdemir - Mutlubaş, 2019; Pettersson - Hjortsberg, 1999).

Geçmişte Daimler-Chrysler'in ürettiği Necar 5 ve Commender 2 tipli hidrojen yakıtlı araçlar yakıt olarak metanolü kullanmışlardır (Mat, 2003). Hidrojenin, hidrokarbonlar yoluyla sisteme bu şekilde entegresi diğer depolama yöntemlerinde önemli sorun teşkil eden büyük hacimli, ağır yapılı ve maliyetli hidrojen tanklarını ve ayrıca yakıt ikmali için hidrojen dolum istasyonlarına olan gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Ancak hidrojen dönüştürücü sistem, aracın çalışma aksamını önemli ölçüde karmaşık hale getirerek maliyet artışlarına sebebiyet vermektedir.

Karbon- Nano Yapılar

Hidrojen karbon ve nano yapılarda; karbon aktivasyonu, grafit ve karbon yapılı nanofiberler ve nonotüpler içerisinde kendisini gösterebilmektedir. Bu yapılardan karbon aktivasyonu içerisinde hidrojen, antrasit de denilen kok kömürlerinin potasyum hidroksit (KOH) ile reakte olması sonucunda meydana gelen kafes benzeri mikro gözenekli geniş yüzey alanlarına sahip karbonların mikro gözeneklerinde depo edilmektedir. Bu yüzey alanları 700 ila 3000 m²/g arasında değişim göstermektedir (Chahine - Bose, 1994).

Aktif karbon yapılarında; Cassa-Lilo vd. (2002), farklı basınç değerleri altında 7 ila 19 kg ağırlığında hidrojeni depolayabilmiştir. Bunun dışında Chambers vd., (1998) aktif karbonlarda %1,6 oranında emilimi sağlanmışlardır. Chahine - Bose (1994), aktif karbon 77 K ve 35 atm basınçta litre başına 25 gram hidrojeni depolamayı başaraabilmiştir. Bu ağırlıkça %30 sıvı hidrojene tekabül etmektedir. Başka bir çalışmada da 175 K ve 35 atm'de m³ başına 8 kg hidrojeni depolayabilmişlerdir. Aktif karbonlarda hidrojen depolanmasına yönelik diğer bir çalışmada Ströbel vd. (1999) bir mikro terazi kullanarak farklı aktif karbon türlerinin 23 °C ve 100 bar basınç altındaki hidrojen emilim özelliklerini incelemiş ve tepe noktası olarak %1,6 oranında hidrojen emilimini rapor etmişlerdir.

Karbon-nano yapılarda hidrojen depolanmasına ilişkin diğer bir yöntemde grafit nano-fiberlerdir. Grafit nanofiberler, belirli başlı bazı hidrokarbonların metal alaşımlı (demir, nikel, kobalt vb.) yapılar üzerinde katalize olarak ayrışması suretiyle meydana gelmektedirler (Rodriguez, 1993). Bu konuda Wang vd. (2014), -196 ° C ve 1 bar basınç altında farklı yüzey alanlarına sahip nano-fiberlere ağırlıkça %0,02 ila %2,5 oranlarında hidrojeni depolamıştır. Browning vd. (2002), farklı metal alaşımlarını (Fe, Ni, Cu) katalizör olarak kullandığı çalışmasında nano-fiber yapılarına ağırlıkça %3,5 ila %6,5 arasında hidrojen emilimini gerçekleştirmiştir. Chambers vd. (1998) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, balıksırtı tipli nono-fiberlerde ağırlıkça %67, levha tipli nono-fiberlerde %54 ve şerit tipli nano-fiberlerde %11 oranında hidrojenin depolanabileceğini ortaya koyulmuştur. Ancak Riis vd.'nin (2006) içerisinde bulunduğu IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) koordinasyon grubu tarafından hazırlanan hidrojen üretimi ve depolanmasına ilişkin raporunda hidrojenin, grafit nano-fiber yapılarda ağırlıkça %30-60 gibi çok yüksek oranlarda depolanmasının mümkün olamayacağını, açıklanan yüksek depolama kapasitelerinin ise ölçüm hatalarından kaynaklı olabileceğini dile getirmişlerdir.

Bunların dışında hidrojen, karbon nanotüperde de depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler tek duvarlı ve çok duvarlı bir şekilde olabilmektedir. Hidrojen, bu yapılar içerisinde tek duvarlı nanotüplerde tüpün içerisinde, çok duvarlı nanotüplerde ise duvar katmanları arasında depolanmaktadır (Hirscher vd., 2002).

Buna yönelik yapılan çalışmalarda Chen vd. (1999), farklı katkı maddeli karbon nanotüpler içerisinde ağırlıkça %14 ila %20 oranlarında hidrojeni empoze edebilmeyi başarmıştır. Nikitin vd. (2008), tek duvarlı karbon nanotüplerde ağırlıkça %7,7 oranında hidrojen emilimini sağlamıştır. Yine Dillon vd. (1997) 21°C’de ve 0,1 MPa basınç altında ağırlıkça %5 ila %10 oranlarında hidrojeni depolamıştır. Wang vd. (2010), çok duvarlı nanotüplere ağırlıkça %1,2 oranında lityum ilavesi ile nanotüplerin depolama kapasitelerini ağırlıkça %4'lere kadar çıkarmayı başaramıştır. Yapılan başka bir çalışmada ise Matsumoto vd. (2020), oda sıcaklığında ve 100 KPa basınçta bir langasit salıngaç kullanılarak çok duvarlı nanotüpler içerisinde ağırlıkça maksimum %1,6 oranında hidrojeni depolayabilmişlerdir.

Hidrojenin depolama yöntemleri genel olarak bu şekilde olmakla birlikte dünya genelinde hidrojenin büyük bir çoğunluğu, sıvı veya sıkıştırılmış gaz şeklinde depolanmakta ve nihai kullanıma sunulmaktadır (IEA, 2019). Özellikle gaz fazındaki hidrojen, ucuz ve basit olması sebebiyle tercih edilmektedir (Dunn, 2002). Ancak yapılan çalışmalar incelendiğinde; gaz fazındaki hidrojenin yüksek basınç değerleri altında depolamaya olanak tanınması, özellikle kaza-çarpma anında yüksek patlama riski barındırması nedeniyle özellikle otomobiller gibi mobil uygulamalar için oldukça riskli bir yöntemi olarak görülmektedir. Ayrıca hacimsel olarak da düşük verimliliğe sahiptir.

Sıvı fazdaki hidrojen ise, gaz fazına göre daha düşük basınç değerleri altında ve hem de sıvı olarak depolanabildiği için kaza-çarpma anındaki patlama riskini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca ağırlıkça diğer depolama yöntemlerine göre daha fazla hidrojeni bünyelerinde hapsedebilmektedir. Fakat hacimsel olarak depolama kapasitesi düşüktür ve hidrojeni sıvı hale getirmek ek maliyet gerekmektedir. Bunların yanında sıvı fazdaki hidrojenin sıcaklık nedeniyle belirli bir bölümünün buharlaşarak yok olmaması için tankın iyi izolasyonu gerekmektedir. Bu sorunlar çözüldüğünde hidrojenin sıvılaştırılmış şekilde kullanımının dünya genelinde daha da cazip olması beklenmektedir.

Diğer depolama yöntemlerinden olan metal hidritlerin bazı alaşımlarının ağırlıkça yüksek depolama kapasitelerine sahip olmalarına bazı alaşımlarının geliştirilmeye ihtiyaç duyulması gerekmektedir. Hidrokarbonlar yoluyla hidrojenin kullanılması özellikle

araçlar içerisinde bir dönüşüm işlemi gerektirdiğinden hem ek maliyet hem de aracın çalışma prensibini karmaşık hale getirmektedir. Depolama yöntemleri arasında en umut verici yaklaşım, karbon nanotüpler ve nano-fiber yapılarıdır. Bu yöntemler, hem hacimsel hem de ağırlıksal olarak yüksek depolamaya imkan tanıdığından cazip bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadırlar. Özellikle karbon nanotüplerde lityum ve potasyum katkılı malzemeler kullanılarak yapıların depolama kapasiteleri ciddi şekilde artırılabilmiştir. Bununla birlikte mevcut hidrojen depolama yöntemlerinin geliştirilmesi ve yeni geliştirilecek olan hidrojen depolama yöntemleri konusunda dünya genelinde Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

Hidrojenin Kullanım Yerleri ve Alanları

Hidrojen, kimya endüstrisinde amonyak ve metanol üretiminde, demir-çelik endüstrisinde demirin çeliğe dönüştürülmesinde, ulaşım endüstrisinde araç yakıtı olarak, inşaat endüstrisinde ısınma ve enerji eldesinde tek başına veya doğalgaz ile karışım halinde, rafinerilerde ham petrolün yakıt ve petro-kimyasal hammaddeye dönüşümünde kullanılmak üzere geniş kullanım ağına sahip bir enerji kaynağıdır (IEA, 2019). Ayrıca uzay endüstrisinde roket fırlatımında ve nükleer füzyon reaktörlerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

Hidrojen bu kullanım alanları içerisinde özellikleri dolayısıyla araç teknolojilerinde yakıt olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Hidrojenin araç teknolojilerinde yakıt olarak; mevcut motor yapılarında birtakım değişiklikler yapılarak otto motorlarda ve içten yanmalı motorlarda bunların dışında yakıt pillerinde kullanımı mevcuttur. Hidrojenin bu yapılar içerisinde kullanımı ciddi avantajları beraberinde getirmektedir.

Hidrojen otto motorlarda herhangi bir depolama işlemine ihtiyaç duymadan yanma odasına oksijen (hava) ile birlikte haricen gönderilmekte, yanma ve sona erme işlemi motorun çalıştırılması ve durdurulması ile tamamlanmaktadır. Burada dikkat edilecek husus yanma işleminin ve verimliliğin yüksek seviyelerde gerçekleşmesi için hidrojenin ve oksijenin yanma odasına belirli bir denge gözetilerek gönderilmesi gerektiğidir. Bu şekilde hidrojen kullanımı otto motorlarında fosil yakıtlara göre %60'a varan bir enerji tasarrufu sağlamaktadır (Eroğlu - Özçelik, 2009).

Hidrojen içten yanmalı motorlarda, tek başında bir yakıt olarak kullanılabildiği gibi farklı yakıtlarla kompozisyonlar oluşturularak da kullanılabilmektedir. Hidrojenin yukarıda da belirtildiği üzere tek başına kullanımı durumunda diğer yakıtlara sağladığı üstünlüğün yanı sıra farklı motor tiplerinde ve yakıt kompozisyonlarında sağladığı iyileştirici etkisi yapılan çalışmalarda da kendisini göstermektedir.

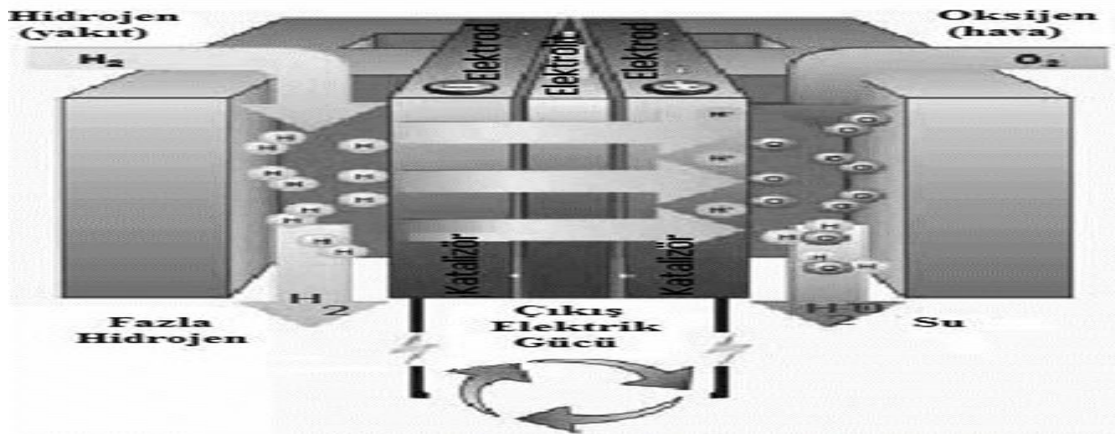
Juste (2006), farklı yakıt türlerine hidrojen ilavesi ile zararlı gaz emisyonlarının sonuçları üzerine yaptığı çalışmada; sisteme yapılan %4 hidrojen ilavesinin karbonmonoksit (CO) emisyonunu %40 azalttığını ve yanma verimini arttırdığını tespit etmiştir. Daha düşük fraksiyonlarda ise sisteme yapılan %1-2,5 hidrojen ilavesi durumunda karbonmonoksit (CO) emisyonunda %30'luk bir azalma gözlemlenmiştir. Bunun yanında hidrojenin ısı verimi diğer fosil yakıtlardan daha yüksek olduğundan sisteme yapılan %50 hidrojen ilavesi durumunda sistemin hidrokarbon (HC) ağırlığı düşürülerek karbondioksit (CO₂) emisyonunun önemli derecede azaltılabileceği belirtilmiştir. Ikegami vd. (1982), hidrojen yakıtlı motorların performans etkileri üzerine yaptığı çalışmada; motora doğrudan hidrojen enjekte edilmesi motorun ateşleme gecikmesini ve dolayısıyla da anormal yanma olaylarını ortadan kaldırarak motorun gücünü arttırdığı ve ayrıca motorun vuruntulu (sesli) çalışmasını engellediği sonucuna ulaşmışlardır. Green - Glasson (1992) ise, içten yanmalı motorlara yüksek basınçlı hidrojen verilmesi durumunda ortaya çıkan etkiyi incelemiş; sonucunda içten yanmalı motorlara hidrojen enjektesi ile motorun fosil yakıt kullanımında kaynaklanan ön ateşleme ve otomatik ateşleme gibi sorunların ortadan kalktığı ve motor performansının arttığı belirtilmiştir.

Swain vd. (1993), doğalgaza hacimce %20 oranında hidrojen ilavesinin motor çalışması üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışma, 2,0, 1,6 ve 1 litrelik olmak üzere toplamda 3 adet Nissan 4 silindirli motorlarda gerçekleştirilmiş ve karışımı oluşturulan yakıtta Hythane ismi verilmiştir. Sonuç olarak Hythane (%20 hidrojen, %80 metan yani doğalgaz)'nin, yakıt olarak saf metan (%100 metan) ile karşılaştırıldığında hem alev başlatma hem de alev yayılım problemlerini azalttığı görülmüştür. Ayrıca Hythane kullanımı saf metana göre ısı verimi artırarak azot tüketimini azalttığı tespit edilmiştir. Jingding vd. (1998), Hidrojen ve benzin karışımının kullanıldığı motorlarda toksit emisyonları üzerine yaptığı çalışmada; hidrojen fakir karışım özelliği nedeniyle benzin

ile birleştğinde karışım hızla yanarak toksit madde oluşumunun azaldığı, benzin-hava karışımına hidrojen ilave edildiğinde azot oksit (NO) konsantrasyonunun karışımın olmadığı duruma göre daha düşük olduğu ve benzin-hava karışımına hidrojen takviyesinden sonra karışımın yanma hızı artarak içerisindeki hidrokarbon konsantrasyonunun %33'ten %20'lere düştüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Buna göre yapılan çalışmalar neticesinde hidrojenin ciddi oranlarda egzoz emisyonlarını azalttığı ve motor performansını arttırdığı görülmektedir.

Yakıt pilleri ise, içten yanmalı ve otto motorlardaki yanma olayı ile enerji üretiminin aksine kimyasal reaksiyonlar sonucu enerji üretme ilkesine dayanmaktadır. Yakıt pilleri, hidrojenin mevcut kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik ve ısı enerjisine çevirebilen basit yapılı cihazlardır (Ege vd. 2009). Bu cihazlar yapı itibarıyla bir elektrolitin etrafına sıkıştırılmış negatif (anot) ve pozitif (katot) yüklü elektrotlardan meydana gelmekte, elektrik ve ısı üretimi için hidrojen ile oksijenin kimyasal reaksiyonunu içermektedir. Reaksiyon sırasında hidrojen anotta, oksijen ise katotta yer almaktadır (UNEP, 2006). Hidrojen yakıt pili ve çalışma düzeneği Şekil 7'de gösterilmektedir.

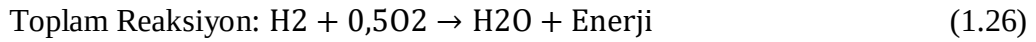


Şekil 7: Hidrojen Yakıt Pili ve Çalışma Düzeneği

Kaynak: Ural - Gençöglü, 2009.

Buna göre hidrojen, başlangıçta anotta pozitif yüklü protonlara ve negatif yüklü elektronlara ayrışmaktadır. Daha sonrasında ayrıışan negatif yüklü elektronlar harici bir devreden katota geçerek elektriksel yük oluşturmaktadır. Protonlar ise, doğrudan katota

geçerek buradaki elektriksel yük oluşturan negatif yüklü elektronlarla birleşip oksijenle reaksiyona girerek su ve enerji açığa çıkarmaktadırlar. İşlemin kimyasal reaksiyonu ise;



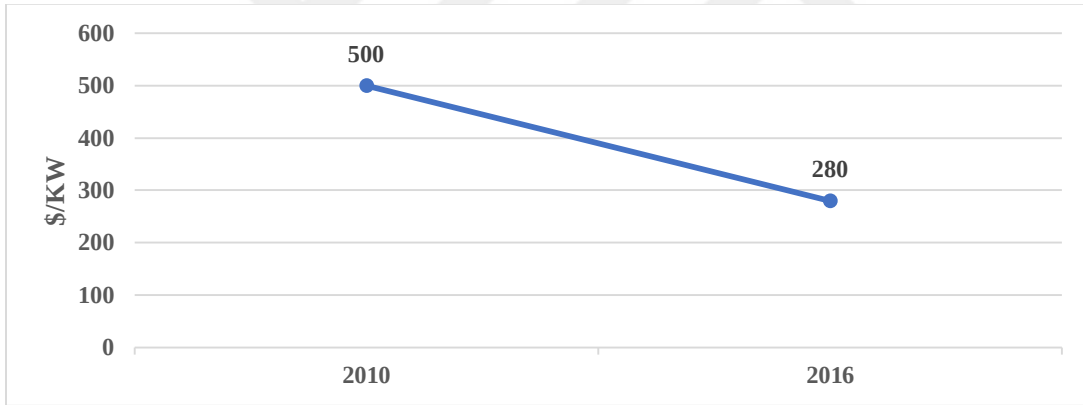
şeklinde ve genel itibariyle ekzotermik olmaktadır. (Onovwiona - Uğursal, 2006). Sistem için gerekli olan hidrojen başta kömür ve doğalgaz gibi fosil kaynaklar olmak üzere çeşitli bitkisel, kimyasal ve elektriksel kaynaklarla da üretilabilmektedir.

Şuanda dünya genelinde farklı gelişmişlik düzeyine sahip birçok yakıt pili teknolojisi mevcuttur. Bunlar genel olarak; alkalın yakıt pilleri (AFC), polimer elektrolit membran yakıt pilleri (PEMFC), fosforik asit yakıt pilleri (PAFC), katı oksit yakıt pilleri (SOFC), erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) ve direkt metanol yakıt pilleri (DMFC) şeklindedir. Bu yakıt pilleri genel olarak birbirlerine benzemekle birlikte birbirlerinden kullandıkları elektrolit türleri ve çalışma sıcaklıklarıyla ayrılmaktadırlar (Onovwiona - Uğursal, 2006).

Yakıt pilleri, taşınabilir modüler yapıdır ve bu yapıları sayesinde başta araç teknolojileri olmak üzere cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, elektrikli aletler vb. uygulamaların yanı sıra konutlarda enerji eldesinde ve enerji santralleri gibi endüstriyel ölçekli sabit uygulamalar gibi geniş kullanım alanları mevcuttur. Yakıt pilleri, yüksek verimliliğe sahip cihazlardır bu bakımdan içten yanmalı motorlara göre iki kat daha verimlidir. Bunun yanında yakıt pilleri içten yanmalı motorlara göre şaft, piston vb. hareketli parçalar içermediğinden çalışma esnasında hareketli parçalar arasında güç aktarımından kaynaklanan verimlilik kayıplarının da önüne geçebilmektedir. Yakıt pilleri, diğer pil teknolojilerine göre özellikle taşınabilir sabit uygulamalar için uzun süre ve yüksek verimlilikte elektriksel güç sağlama potansiyeline sahiptir (European Commission, 2003; UNEP, 2006).

Ayrıca yakıt pilli araç teknolojilerinin, elektrikli araç teknolojilerine kıyasla yakıt ikmal süreleri bakımından da bir üstünlüğü söz konusudur. Elektrikli araçlarda bu süre günlük 60-90 dakika iken yakıt pilli araçlarda günlük 5 dakikadır (Hydrogen Council, 2018). Ayrıca hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pilleri, sıfır karbon emisyonuna sahip olmakla birlikte özellikle araçlarda vurutuya neden olmaması sebebiyle gürültüsüz çalışarak gürültü kirliliğinin de önüne geçebilmektedir (Kozlu vd., 2009).

Yakıt pillerinin diğer enerji uygulamalarına göre bu denli önemli avantajlara sahip olmasına rağmen dünya genelinde küçük çaplı uygulamaları olsa da henüz tam anlamıyla ticarileşmemiştir. Bunun nedeni ise yüksek maliyetli olmalarıdır. Ancak maliyetleri istenilen seviyelere düşürüldüğünde dünya genelinde önemli bir teknolojik enerji uygulaması olmaya aday konumdadır. Grafik 33'te yakıt pili teknolojilerinin 2010-2016 arasındaki maliyet görünümüne bakıldığında düşme eğiliminde olduğu görülmektedir.



Grafik 33: Yıllar İtibariyle Yakıt Pillerinin Maliyet Görünümü

Kaynak: Hydrogen Council, 2017a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Yakıt pillerinin maliyetlerinde meydana gelen düşüşler hidrojen enerji teknolojilerinin küresel çaptaki uygulanabilirliğini de arttırmaktadır. Bu durum Tablo 35'e bakıldığında anlaşılmaktadır. Tablo 25'te adet bazında dünya genelinde mevcut olan hidrojen yakıt pilli araçları ve hidrojen yakıt ikmal istasyonları verilmiştir. Buna göre 2018 yılına kıyasla 2019 yılında küresel ölçekte yakıt pilli araçlarda toplamda %95, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarında ise %25 oranında artışlar meydana gelmiştir. Bu durumda dünya genelindeki hidrojen yakıt pilli araç sayısı 13 bin'den 25 bin'e, hidrojen yakıt ikmal istasyonu sayısı da 376'dan 470'e yükselmiştir (Tablo 25).

Tablo 25: Yıllar İtibariyle Dünya Genelinde Yakıt Pili Araç ve Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu Sayıları

Yıllar	Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu (Adet)	Yakıt Pili Teknolojili Araçlar (Adet)
2018	376	12.952
2019	470	25.212

Kaynak: Samsun, vd., 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

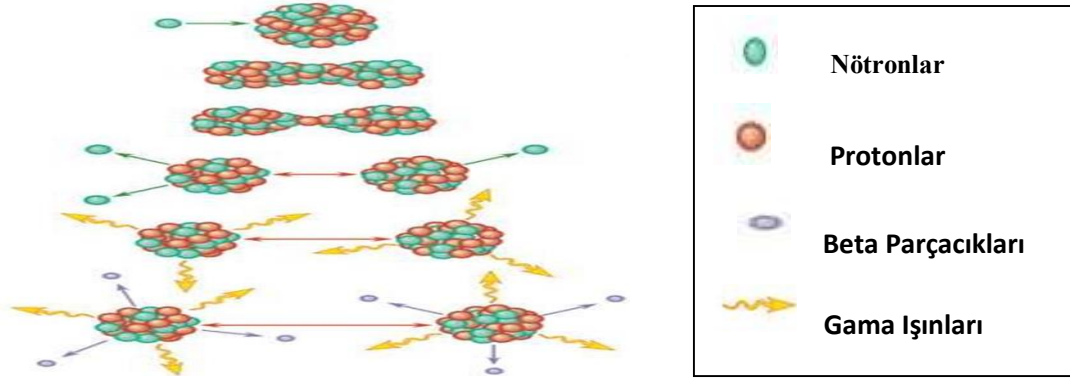
2019 yılı itibariyle dünya genelinde en önemli yakıt pili araç üreticilerinden olan ABD tüm yakıt pili araçların; %32'sini üretirken, Çin %25'ini, Kore %20'sini, Japonya %14'ünü, Almanya %3'ünü ve Fransa %1,5'ini üretmiş, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarında ise bu durum; %24'ü Japonya, %17'si Almanya, %13'ü Çin, %7'si ABD, %5'i Fransa ve Birleşik Krallık, %2'si Norveç ve %1'i Avusturya'nın üretimi şeklinde olmuştur (Samsun vd., 2020).

1.2.4. Nükleer Enerji

Nükleer enerji, ilk olarak Fransız fizikçi Henri Becquerel tarafından 1896 yılında keşfedilmiştir. Becquerel, karanlık bir ortamda uranyum parçasığının yanında bulunan fotoğraf plakalarının X ışınlarına benzer yapıya dönüştüğünü gözlemlemiştir. Atom içerisinde bir nükleer kuvvetin varlığına dayanan bu keşif, daha sonrasında geliştirilerek atom bombası yapımında ve nükleer reaktörlerde kullanılarak nükleer enerjinin önünü açmış ve kullanımı günümüze kadar devam etmiştir (Sciencing, 30 Temmuz 2020). Günümüzde nükleer enerji dünya genelinde, çoğunlukla elektrik üretimi için kullanılmaktadır ve temelde fisyon (parçalanma) ve füzyon (birleşme) olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir.

Nükleer Fisyon

Fisyon, uranyum (U), toryum (Th) ve plütonyum (Pu) gibi radyoaktif içerikli ağır atom çekirdeklerinin parçalanarak kendisinden daha hafif yapıları atomlara ayrışması işlemidir (Raja vd., 2006). Bu işlem Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8: Fisyon Olayı

Kaynak: Steinberg, 1 Ağustos 2020.

Fisyon işlemi teorik olarak 6 aşamadan meydana gelmektedir (Şekil 8). Birinci aşamada nötron, büyük kütleli atom çekirdekleriyle çarpışır ve bu yapı tarafından absorbe edilir. İkinci aşamada absorbe edilen nötron, atom çekirdekleri arasında bozunmalara neden olur ve atom çekirdekleri arasında kopmalar meydana gelmektedir. Üçüncü aşamada, bozunma çok kuvvetlidir ve kopmalar devam etmektedir. Dördüncü aşama, parçalanmanın (ayrışmanın) meydana geldiği aşamadır. Bu aşamada, atom çekirdekleri parçalanarak iki veya üç nötron açığa çıkarırlar. Beşinci aşama, fisyon ürünlerinin meydana geldiği aşamadır. Bu aşamada, parçalanma sonucunda oluşan atom parçacıkları kinetik enerjilerini kaybederek durağanlaşır ve etrafa gama ışınları yayarlar. Son aşamada, meydana gelen fisyon ürünleri radyoaktif bozunma sonucu arta kalan enerjilerini kaybederek beta parçacıkları saçarlar. Tüm bu fisyon işlemleri ise yaklaşık olarak 10^{-12} ila 10^{-14} saniye arasında gerçekleşmektedir. (Steinberg, 1 Ağustos 2020).

Fisyonun gerçekleşmesini sağlayan uranyum, toryum ve plütonyum elementleri aynı zamanda nükleer enerjinin hammaddeleridir. Bu elementler içerisinde nükleer enerji üretiminde en çok kullanılan element uranyum ve onun uranyum-235 ve uranyum-238 izotoplarıdır. Uranyum, nükleer reaksiyona girmeden önce yaklaşık %3 oranında zenginleştirme işlemine tabi tutularak reaksiyona hazır hale getirilmektedir. Bu şekilde zenginleştirilmiş uranyum, fisyon reaksiyonunun sürekliliğini ve başlamasını kolaylaştırmaktadır (Breeze, 2005). Diğer elementlerden olan toryum ve onun toryum-232 izotopu ve plütonyum ve onun plütonyum-239 izotopunun nükleer enerji üretiminde kullanımı yok denecek kadar azdır.

Nükleer reaksiyon (filyon-füzyon) işlemleri sonucu açığa çıkan teorik enerji Albert Einstein'ın kütle-enerji ilişkisini veren ünlü formülü $E=mc^2$ ile hesaplanmaktadır. Bu ilişkiye göre, bir cismin toplam enerjisi cismin kütlesinin hareket etmesiyle beraber artmaktadır.

$$E_t = m \times c^2 \quad (1.27)$$

E_t = Toplam Enerji

m = Cismin Kütlesi

c = Işık hızı

Bu denklemden hareketle bir cismin durgun kütlesinin enerjisi;

$$E_d = m_d \times c^2 \quad (1.28)$$

olmaktadır. Burada E_d = durgun cismin enerjisini, m_d = durgun cismin kütlesini ifade etmektedir. Bir cismin kinetik enerjisi ise, cismin durgun enerjisi ile toplam enerjisinin farkına eşittir.

$$E_k = E_t - E_d \quad (1.29)$$

(Muray - Holbert, 2015)

Bununla birlikte bir nükleer reaksiyonda enerjinin korunumu yasası gereğince reaksiyon girdilerinin toplam enerjileri ile reaksiyon çıktılarının (ürünler) toplam enerjileri birbirlerine eşit olmak zorundadır;

$$\sum_{Girdi} E_t = \sum_{Çıktı} E_t \quad (1.30)$$

Denklem (1.30)'daki eşitlik $\alpha(x, y)\beta$ reaksiyonunu içerecek şekilde üstel bir olarak yazıldığında;

$$E_t^\alpha + E_t^x = E_t^y + E_t^\beta \quad (1.31)$$

halini almaktadır ve bu denklemde toplam enerji (E_t) yerine (1.29)'daki eşitlik yazıldığında yeni eşitlik;

$$E_d^\alpha + E_k^\alpha + E_d^x + E_k^x = E_d^y + E_k^y + E_d^\beta + E_k^\beta \quad (1.32)$$

şeklinde olmaktadır. Bu eşitliğe kütle-enerji dönüşümü yapıldığında;

$$M_\alpha \times c^2 + E_k^\alpha + m_x \times c^2 + E_k^x = m_y \times c^2 + E_k^y + M_\beta \times c^2 + E_k^\beta \quad (1.33)$$

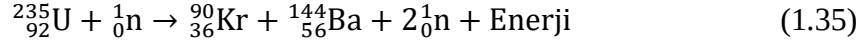
ve c^2 ortak paranteze alındığında nükleer reaksiyon sırasında açığa çıkan teorik enerji (Q) ortaya çıkmaktadır.

$$Q = [(M_\alpha + m_x) - (m_y + M_\beta)] \times c^2 = (E_k^y + E_k^\beta) - (E_k^\alpha + E_k^x) \quad (1.34)$$

Burada unutulmaması gereken önemli bir nokta ışık hızının karesi (c^2)'nin atomik kütle birimi (akb) cinsinden belirtilmesi gerektiğidir. Gerekli dönüşümler yapıldığında $c^2=931,5$ Mev/akb değerini almaktadır (Muray - Holbert, 2015).

Eşitlik (1.34), nükleer reaksiyon sonucu açığa çıkan teorik enerjinin iki şekilde de hesaplanabilmesini mümkün kılmaktadır. Bunlardan eşitliğin sağ tarafı nükleer reaksiyona girenlerin ve çıkanların kinetik enerjilerinin bilinmesi durumunda, eşitliğin sol tarafı ise nükleer reaksiyona girenlerin ve çıkanların atomik kütlelerinin bilinmesi durumunda hesaplamanın mümkün olabileceğini göstermektedir. Buna göre eşitliğin sol tarafından hareketle bir nükleer reaksiyon sonucunda açığa çıkan teorik enerji, reaksiyona girenlerin ve çıkanların toplam kütlelerinin farkının ışık hızının karesinin atomik kütle birimi cinsinden değeri ile çarpılmasıyla ya da başka bir deyişle reaksiyona girenlerin ve çıkanların toplam kinetik enerjilerinin farklarının alınmasıyla hesaplanabilmektedir.

Bu veriler ışığında bir nükleer fisyon hammadde olan Uranyum-235 izotopunun fisyon olayı sonucunda açığa çıkan teorik enerjisini nükleer reaksiyon denkleminde hareketle hesaplayacak olursak;



(Muray - Holbert, 2015)

Denklemin sol tarafı nükleer reaksiyona girenleri sağ tarafı ise nükleer reaksiyon sonucunda açığa çıkanları yani ürünleri temsil etmektedir. Reaksiyonda fisyonun tanımında da olduğu gibi bir uranyum-235 izotopunun bir nötronla reaksiyona girmesi sonucunda fisyonla uğrayarak ya da parçalanarak kendisinden daha küçük kütleli kripton (Kr), baryuma (Ba) ve nötrona (n) ayrılmaktadır. Bunun yanında elementlerin sol üst köşesindeki sayılar elementlerin kütle numaralarını, sol alt köşesindeki sayılar ise atom numaralarını göstermektedir. Denklemden de görüleceği üzere enerjinin korunumu yasası gereği reaksiyona girenlerin ve çıkanların kütle ve atom sayılarının toplamı birbirine eşittir.

Ayrıca reaksiyona giren tüm elementlerin atomik kütle sayıları ayrıntılı bir şekilde Tablo 26’da verilmektedir.

Tablo 26: Nükleer Fisyon Reaksiyonunu Oluşturan Atomik Yapılar ve Kütleleri

Atom Yapıları	Atomik Kütleleri (akb)
Uranyum-235	235.043929
Nötron	1.008664
Kripton-90	89.919516
Baryum-144	143.922952

Kaynak: Muray - Holbert, 2015.

Buna göre denklem (1.34)’ün sol tarafındaki eşitlik ele alındığında;

$$Q = [(M_{\alpha} + m_x) - (m_y + M_{\beta})] \times c^2$$

ve denklem reaksiyon süreci içerisindeki elementleri kapsayacak şekilde yeniden düzenlendiğinde;

$$Q = [(M_{\text{U-235}} + m_{\text{n-1}}) - (2m_{\text{n-1}} + M_{\text{Ba-144}} + M_{\text{Kr-90}})] \times c^2$$

buna ek olarak bu denklem içerisinde Tablo 26'daki veriler yerine yazıldığında uranyum-235 çekirdeğinin fisyon tepkimesine bağlı olarak elde edilen olan teorik enerji;

$$Q = [(235.043929 + 1.008664) - (2 \times 1.008664 + 143.922952 + 89.919516)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

$$Q = 179.5 \text{ Mev olarak hesaplanabilmektedir.}$$

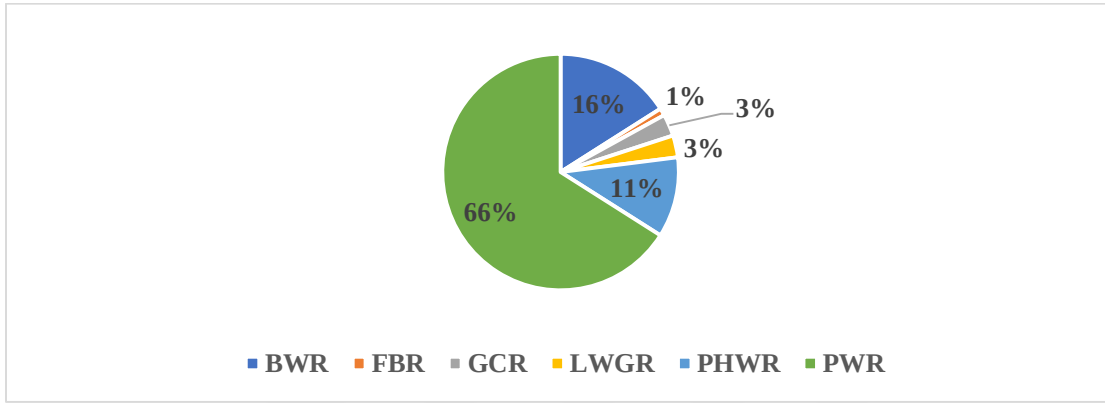
Bu değer, uranyum-235'in tek bölünmeye maruz kalması sonucunda meydana gelen enerjidir. Buradan kütle başına açığa çıkan enerji ise, Q/K 'dan. K burada uranyum-235'in kütle numarasıdır. $179.5/235 = 0.76 \text{ Mev/akb}$ olarak bulunmaktadır

Tek bir nükleer fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan teorik enerji bu şekilde olmakla birlikte nükleer fisyon, fisyon reaksiyonlarının zincirleme olarak şekilde gerçekleştiği süreçler bütünüdür. Bu süreçler içerisinde her bir fisyon reaksiyonu kendisi haricinde birden fazla fisyon reaksiyonunu meydana getirmekte, sonucunda da muazzam derecede enerji açığa çıkmaktadır (Breeze, 2005).

Buna göre kütle olarak 1 ton uranyum-235'in yanması sonucunda elektriksel değer bazında yaklaşık olarak 2,3 milyar KWh'lik enerji açığa çıkmaktadır. Bu değer fosil enerji kaynakları ile mukayese edildiğinde yaklaşık 3,5 milyon ton kömürün, 2,2 milyar m³ doğalgazın, 2 milyon ton fuel-oil'in ve 1,3 milyon varil ham petrolün yakılması sonucunda elde edilebilmektedir (NÜKTE, 2 Ağustos 2020). Ayrıca yenilenebilir enerji teknolojilerinden olan güneş panelleri ve rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında ise, yaklaşık 900 MW değerinde üretim kapasitesine sahip bir nükleer tesisten yıllık olarak elde edilecek elektriksel üretimin ancak 70 milyon m²'lik güneş panelleriyle veya binlerce adet rüzgar türbinlerinin kurulmasıyla mümkün olabilmektedir (TAEK, 2 Ağustos 2020). Bu açıdan bakıldığında nükleer fisyon, gerek yüksek mertebe enerji eldesinde gerek arazi kullanımı açısından oldukça verimli olmaktadır.

Dünya genelinde fisyon enerjisi nükleer reaktörler aracılığıyla üretilmektedir. Buna göre 2018 yılı itibarıyla dünya genelinde aktif olarak kullanımda olan toplam 451 adet

nükleer fisyon reaktörü bulunmaktadır. Bu reaktörlerden en çok kullanımda olan ise basınçlı su reaktörleridir (PWR). Bu reaktörlerin ardından en çok tercih edilen reaktör türleri, kaynar su reaktörleri (BWR) ve basınçlı ağır su reaktörleridir (PHWR). Bunların dışında hafif su soğutmalı grafit moderatörlü reaktörler (LWGR), gaz soğutmalı reaktörler (GCR) ve hız üretim reaktörleri (FBR) en az kullanımda olan reaktör türleridir (Grafik 34).



Grafik 34: 2018 Yılı İtibariyle Dünya Geneline Aktif Olarak Kullanılan Nükleer Fisyon Reaktörleri

Kaynak: IAEA, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu reaktörlerin genel çalışma prensibi buhar-enerji dönüşümüne dayanmaktadır. Fisyon reaksiyonu sırasında açığa çıkan enerji reaktör içerisindeki suyu ısıtarak buhara dönüştürmekte, oluşan buhar da türbini döndürerek enerji üretimini sağlamaktadır (Suri, 2013). Bu tesisler aynı zamandan yüksek kapasite kullanım oranlarına sahiptirler. Tablo 27'de dünya genelinde nükleer fisyon ve diğer enerji üretim tesislerinin ortalama kapasite kullanım oranları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 27: Dünya Geneline Bazı Enerji Teknolojilerinin Kapasite Kullanım Oranları

Enerji Teknolojileri	Kapasite Kullanım Oranları (%)
Nükleer (Fisyon) Enerji Tesisi	75-90
Kömür Enerji Üretim Tesisi	40-60
Doğalgaz Enerji Üretim Tesisi	40-50
Rüzgar Türbini (Deniz)	40-50
Rüzgar Türbini (Kara)	25-42
Güneş Panelleri	12-20

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Tüm bunların yanında nükleer fisyon tesisleri, karbon emisyonu açısından fosil enerji üretim tesisleriyle, enerji devamlılığı açısından da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ayrışabilmektedir. Nükleer fisyon tesisleri fosil enerji tesislerine kıyasla buhar-enerji dönüşümüne dayanan çalışma yapısı nedeniyle karbon emisyonuna neden olmamakta ve 24 saat boyunca kesintisiz olarak çalışabilmektedirler. Yenilenebilir enerji tesislerinin (güneş panelleri, rüzgar türbinleri) de karbon emisyonu üretmemeleri veya çok düşük karbon emisyonlarına neden olmamalarına rağmen enerji üretimleri meteorolojik olaylara bağlı olduğundan bu tesisler enerji sürekliliği konusunda dezavantajlı durum teşkil edebilme potansiyeli taşımaktadırlar (Sciencing, 30 Temmuz 2020). Bu bakımdan nükleer fisyon tesisleri günümüzde kesintisiz ve yüksek potansiyelli enerji kaynağının ana mercii konumundadırlar.

Tablo 28’de 2018 yılı itibariyle dünyanın önde gelen nükleer fisyon üreticileri ve nükleer enerji görünümleri verilmektedir. Bu veriler ışığında dünyanın nükleer fisyondan en fazla elektrik enerjisi üreten ülkesi, aynı zamanda en çok kurulu kapasiteye ve reaktöre sahip ülkesi olan ABD’dir. ABD, 808 TWh nükleer elektrik üretimi, 95 adet aktif nükleer reaktör ve 97 GW kurulu kapasite ile elektrik üretiminin ve tüketiminin %20’sini nükleer fisyondan sağlamaktadır. Nükleer elektrik üretiminde ABD’yi sırasıyla Fransa, Çin, Rusya ve G. Kore gibi ülkeler takip etmektedir. Bunların dışında en az nükleer elektrik üreten ülkeler ise, Çekya, Belçika, Brezilya ve Romanya şeklinde sıralanmaktadır.

Tabloda dikkat edilecek diğer bir husus ise Fransa, Ukrayna, İsveç, Çekya ve Belçika gibi ülkelerin elektrik ihtiyaçlarının büyük bir kısmını nükleer fisyondan karşılayabiliyor olmalarıdır. Özellikle Fransa, elektrik ihtiyacının %90’nını ürettiği nükleer fisyondan karşılamaktadır. Elektrik üretiminin ise %72’si fisyondan meydana gelmektedir. Diğer ülkelerden olan Ukrayna’da bu durum %65, İsveç’te %49, Çekya’da %48 ve Belçika’da da %32 olarak gerçekleşmektedir. Bu da gösteriyor ki nükleer fisyon, ülkelerin elektrik üretimlerini ve tüketimlerini karşılamada oldukça önemli yer teşkil etmektedir.

Tablo 28: 2018 Yılı İtibariyle Dünya Geneline En Fazla Nükleer (Fisyon) Enerjiye Sahip Ülkeler ve Nükleer Enerji Görünümleri

Ülkeler	Mevcut Reaktör Sayıları (Adet)	Kurulu Kapasiteleri (GWe)	Nükleer Elektrik Üretimleri (TWh)	Nükleer Elektrik Üretimleri/ Toplam Elektrik Üretimleri (%)	Toplam Elektrik Tüketimleri (TWh)	Nükleer Elektrik Üretimleri/ Toplam Elektrik Tüketimleri (%)
ABD	95	97	808	19	3.953	20
Fransa	56	61	396	72	441	90
Çin	47	45	277	4	6.230	4
Rusya	38	28	191	18	918	21
G. Kore	33	23	127	24	560	23
Kanada	19	14	94	15	543	17
Ukrayna	15	13	80	56	124	65
Almanya	6	8	72	12	525	14
İsveç	7	8	66	40	134	49
İngiltere	15	9	59	18	308	19
İspanya	7	7	53	21	243	22
Japonya	33	32	49	6	960	5
Hindistan	22	6	35	3	1.227	3
Çekya	6	4	28	35	59	48
Belçika	7	6	27	39	84	32
Brezilya	2	2	15	3	528	3
Romanya	2	1	10	17	50	20

Kaynak: Enerdata, 27 Haziran 2020; World Nuclear Association, 4 Ağustos 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Nükleer fisyonunda en büyük sorun radyoaktivitedir. Radyoaktivitenin kontrolsüz bir şekilde salınımı canlı yaşamını ciddi boyutlarda tehdit etmekte özellikle yüksek derecede maruz kaldığında kanser, cilt, saç dökülmesi, organ yetmezliği vb. hastalıkları beraberinde getirmektedir. Tarihteki iki önemli nükleer fisyon kazası olana Çernobil ve Fukuşima'da yüksek radyasyona maruz kalınması sonucunda bu tip durumlar

gözlemlenmiştir. 1986 yılında Ukrayna'nın Çernobil nükleer fisyon tesisinde meydana gelen kaza sonucunda atmosfere yaklaşık 400 Hiroşima bombasına eş değer oranda radyasyon salınımı gerçekleşmiş, bu radyasyon sadece Ukrayna'da değil aynı zamanda Belarus ve Rusya gibi çevre ülkelerdeki milyonlarca insanın hayatını etkilemiştir (Ehrlich, 2013).

Birleşmiş Milletlerin 2011 yılında yayımladığı UNSCEAR'ın (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi) 2008 yılı Çernobil kazasından kaynaklanan radyasyona bağlı sağlık etkileri raporunda, Çernobil nükleer fisyon tesisinde meydana gelen kaza sonucunda Ukrayna ve çevre ülkelerde (Rusya, Belarus) yüksek derecelerde radyoaktif kirlenmenin meydana geldiği ve bundan dolayı milyonlarca insanın yerleşimlerini değiştirmek zorunda kaldığı bildirilmiştir. Ayrıca kaza sonrasında uzun süre bu ülkelerdeki et, süt ve tarımsal gıda ürünlerinde radyasyon tespit edilmiştir. Yine aynı raporda Belarus'ta kaza sonrasında doğan 10 yaş altı kız çocuklarında yaklaşık %600, erkek çocuklarda ise %400'e varan tiroid kanseri vakalarında artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında nükleer tesiste çalışan 600 işçiden 134'ünde yüksek derecede radyasyon belirlenmiş ve bunlardan 23'ünün ilk dört içerisinde ölümü gerçekleşmiştir.

2011 yılında Fukuşima'da meydana gelen nükleer kaza sonucunda ise açığa çıkan radyasyon 20 km'lik bir alanı etkisi altına almış ve daha sonra yapılan değerlendirmeler neticesinde 167 çalışandan 135'inin 100 ila 150 mSv, 23'ünün 150 ila 200 mSv ve 3'ünün de 200 ila 250 mSv aralıklarında radyasyona maruz kaldığı tespit edilmiştir (AFAD, 5 Ağustos, 2020). Ayrıca uluslararası standart belirlemelerine göre de bir insanın yıllık olarak en fazla 100 mSv radyasyona maruz kalması gerektiği bunun üzerindeki her bir birim radyasyonun kanser riskini arttırabileceği belirtilmiştir (AFAD, 6 Ağustos 2020). Bununla birlikte bu kaza sonrasında Japonya nükleer fisyon dayalı enerji üretimini kademeli olarak kaldırma kararı almıştır (Ehrlich, 2013).

Nükleer fisyon'da dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli hususta nükleer atıklardır. Nükleer atıklar, fisyon reaksiyonu sonucunda meydana gelen fisyon atıklarıdır. Fisyon atıklarının imha edilmesi ise hemen gerçekleşmemektedir. Fisyon atıkları, yeraltında ya

da yer üstünde izolasyonu güçlü depolarda ya da tesislerde depo edilmektedir. Radyo aktif atıkların tesislerde depo edilirken hava ile temas etmemesi oldukça önemlidir. Eğer bir radyoaktif atığın 6 saatten fazla hava ile teması gerçekleşirse kendiliğinden yanarak zehirli radyoaktivite yaymaktadır. Yer altında depolanan nükleer atığın ise izolasyonu oldukça önemlidir. Çünkü bir nükleer atığın radyoaktiflik süresi yaklaşık olarak 40 yıl sürmektedir (Campos, 2019; Parenti, 2010). Bundan dolayı nükleer atıkların hemen imhası ya da özellikle de yer altında kontrolsüz bir şekilde depo edilmesi canlı yaşamı için önemli tehdit unsuru oluşturacağı aşikardır. Bu bakımdan nükleer atıkların yüksek önem ve ciddiyetle muhafaza edilmeleri gerekmektedir.

Nükleer fisyonun yüksek mertebelerde enerji sağlama potansiyelinin yanı sıra nükleer atıkların depolanması ve radyoaktivite önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bundan dolayı dünyanın önde gelen pek çok sanayileşmiş nükleer fisyon üretici ülkeleri enerji üretimlerini kademeli olarak azaltma yoluna gitmişlerdir.

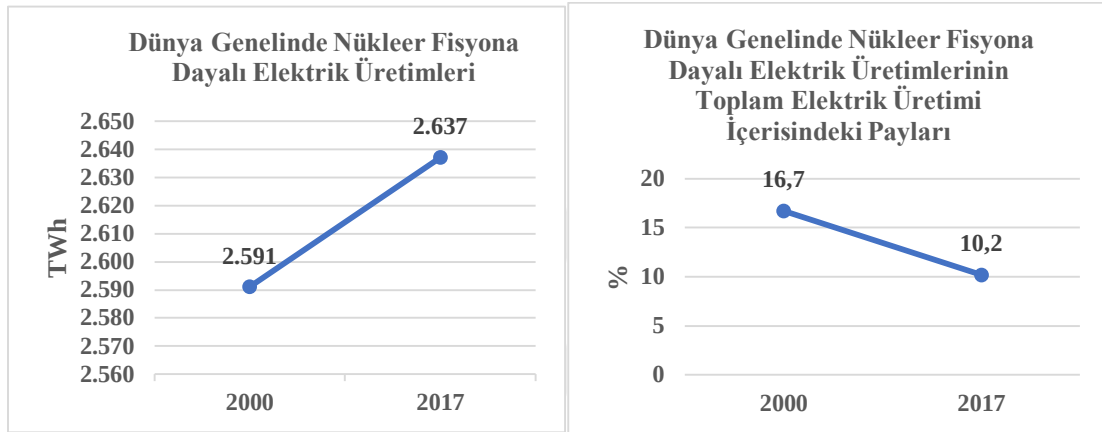
Bu ülkelerden Japonya, Fukuşima nükleer kazasından bugüne kadar olan süreç boyunca nükleer reaktörlerinin %45'ni kapatmış ve nükleer kapasitesini de %34 oranında azaltma yoluna gitmiştir. Bu reaktör kapanışlarının yaklaşık % 92'si (15,7 GWe) ise son sekiz yıl içerisinde gerçekleşmiştir. Ukrayna'nın ise, Çernobil'den sonra nükleer reaktör kapasitelerinde %21 (3,5 GWe) oranında düşüş gözlemlenmiştir (Tablo 28; Tablo 29). Diğer ülkelerden ABD ve Almanya tarihsel süreç boyunca Japonya ile birlikte en fazla nükleer kapasite kapanışlarının yaşandığı ülkeler olmuşlardır. Bu kapasite kapanışlarının ABD'de yaklaşık %45'i, Almanya'da ise %41'i son 7-8 yıl içerisinde gerçekleşmiş ve bunların yerlerine yapım aşamasına herhangi bir nükleer reaktör alınmamıştır. Ayrıca nükleer fisyonun en çok enerji (elektrik) ihtiyacını karşılayan ülke olan Fransa ve bununla birlikte İsveç ve Kanada gibi ülkelerin de kapattıkları reaktörleri tedarik etme yoluna gitmedikleri görülmüştür. (Tablo 29).

Tablo 29: Dünya Geneline En Fazla Nükleer (Fisyon) Enerjiye Sahip İlk 11 Ülkenin Tarihsel Süreç Boyunca Reaktör Göstergeleri

Ülkeler	Kapatılan Reaktör Sayıları (Adet)	Kapatılan Reaktörleri n Toplam Kapasiteleri (GWe)	Kapatılma Tarihleri-Adet-Gwe	Yapım Aşamasında ki Reaktörler (Adet)	Yapım Aşamasında ki Reaktörleri n Toplam Kapasiteleri (GWe)
ABD	38	17,5	(2013-2020)-10-7,7 (1966-1998)-28-9,7	0	0
Fransa	14	5,5	(2010-2020)-3-1,8 (1973-1998)-11-3,6	1	1,6
Çin	0	0	0	12	10,9
Rusya	8	2	(2016-2019)-3-1,3 (1983-2002)-4-0,7	3	4,4
G. Kore	2	1,2	(2017-2019)-2-1,2	4	5,3
Kanada	6	2,1	(2008-2012)-3-1,6 (1977-1984)-3-0,4	0	0
Ukrayna	4	3,5	(1986-2000)-4-3,5	2	2
Almanya	30	18,2	(2011-2019)-11-12,3 (1974-2005)-19-5,8	0	0
İsveç	6	3,1	(2016-2019)-3-1,9 (1974-2005)-3-1,2	0	0
İngiltere	30	4,7	(2000-2015)-20-3,3 (1977-1994)-10-1,7 (2011-2019)-23-15,7	2	3,2
Japonya	27	17,1	(1976-2009)-4-1,4	2	2,6

Kaynak: World Nuclear Association, 4 Ağustos 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre nükleer fisyona dayalı elektrik üretimlerinin küresel boyuttaki görünümüne bakıldığında küçük çaplı bir artış olsa da dünya elektrik üretimi içerisindeki paylarında azalışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda küresel bazda nükleer fisyona dayalı elektrik üretimi 2000 yılında 2017 yılına kadar geçen süre içerisinde toplamda %1,7 artarak 2,5 PWh'den 2,6 PWh'e yükselmiş olsa da küresel elektrik üretimi içerisindeki payı %17'den %10'a kadar düşmüştür (Grafik 35).



Grafik 35: 2000-2017 Arası Dünya Nükleer (Fisyon) Enerji Görünümü

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

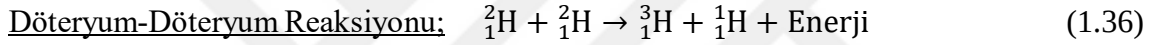
Nükleer Füzyon

Nükleer enerjinin oluşumunu sağlayan bir diğer yapı olan nükleer füzyon, temelde atom çekirdeklerinin birleşmesi-kaynaşması yoluyla meydana gelen bir olaydır. Nükleer füzyon, fisyonun aksine küçük kütleli atom çekirdeklerinin çok yüksek sıcaklık değerleri altında birbirleriyle reaksiyona girmesi sonucunda kaynaşıp kendilerinden daha yüksek kütleli atom çekirdeklerini meydana getirerek yüksek miktarlarda enerji açığa çıkarma işlemidir. Nükleer füzyonda, füzyon reaksiyonu oluşturan belli başlı hammaddeler, hidrojen (H) ve onun protium (^1_1H), döteryum (^2_1H), trityum (^3_1H) izotopları, helyum (He) ve onun helyum-3 (^3_2He) izotopu ve bor (B) ve onun bor-11 ($^{11}_5\text{B}$) izotopudur (Kembleton, 2019).

Bu izotoplardan protium, hidrojen atomu içerisinde % 99 ile en çok bulunma oranına sahip hidrojen izotopudur ve sadece tek bir protondan meydana gelmektedir. Döteryum,

birer nötron ve protondan oluşan ve radyoaktivite içermeyen kararlı yapıdaki hidrojen izotopudur. Döteryumun hidrojen içerisindeki yoğunluğu yaklaşık olarak % 0,01'dir. Bu oran çok düşük olmakla birlikte hidrojenin sularda bol miktarda bulunması sebebiyle önemli bir sorun olarak görülmemektedir. Tritiyumun, proton sayısı döteryumla aynı olmakla birlikte nötron sayısı döteryumdan bir fazladır (bir proton – iki nötron). Tritiyum, radyoaktiftir ve hidrojen atomu içerisinde doğal olarak bulunmamakta, lityum ve nötrondan elde edilebilmektedir. Helyum-3, doğada az bulunan bir helyum izotopudur ve yapay olarak trityumun β çözünmesi yoluyla elde edilebilmektedir. Bor-11, radyoaktif olmayan ve nötron içermeyen bir bor izotopudur ve bor elementi içerisinde bol miktarda yer almaktadır (%80) (Kembleton, 2020; Wikipedia, 8 Ağustos 2020).

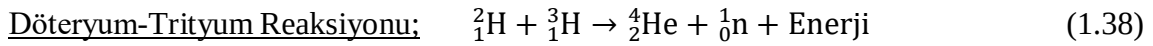
Bunlara göre temel olarak oluşan nükleer füzyon reaksiyonları;



ve



şeklindedir ve reaksiyon, iki nükleer procesten meydana gelmektedir. Birinci proceste 1'er mol trityum izotopu (${}^3_1\text{H}$) ve protium izotopu (${}^1_1\text{H}$)'nun yanı sıra bir miktar enerji açığa çıkmaktadır. İkinci proceste ise, 1 mol helyum-3 izotopu (${}^3_2\text{He}$), nötron (${}^1_0\text{n}$) ve yine bir miktar enerji elde edilmektedir.



olarak gerçekleşmektedir. Reaksiyon, tek bir nükleer proses olarak 1 mol helyum-4 (${}^4_2\text{He}$) izotopu, nötron (${}^1_0\text{n}$) ve bir miktar enerji çıktısını vermektedir.



olarak reaksiyon tek bir procesten oluşmuş olup ürün olarak 1'er mol helyum-4 (${}^4_2\text{He}$) izotopu ve protium (${}^1_1\text{H}$) bir miktar enerji salınımı şeklinde gerçekleşmektedir.

Döteryum çekirdeğinin helyuma evrilışinin toplam etkisini veren reaksiyon ise;



dir ve reaksiyonda 4 mol döteryum (${}^2_1\text{H}$) çekirdeğinin 2 mol helyuma (${}^4_2\text{He}$) dönüşümü gerçekleşmektedir. Bu dönüşüm sırasında tıpkı diğer reaksiyonlarda da olduğu gibi bir miktar enerji salınımı meydana gelmektedir (Muray - Holbert, 2015).

Bor-11 izotopuna ait füzyon reaksiyonu ikinci bölümde anlatılacak olup, bu üç nükleer füzyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerji tıpkı fisyonda olduğu gibi Albert Einstein'ın kütle-enerji ilişkisini veren $E=mc^2$ eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Füzyon enerjisini hesaplamaya yönelik ihtiyaç duyulan atom yapıları ve kütleleri Tablo 30'da yer almaktadır.

Tablo 30: Nükleer Füzyon Reaksiyonunu Oluşturan Atom Yapıları ve Kütleleri

Atom Yapıları	Atomik Kütleleri (akb)
Protium (H-1)	1.007825
Döteryum (H-2)	2.014102
Tritiyum (H-3)	3.016049
Helyum-3 (He-3)	3.016029
Helyum-4 (He-4)	4.002603

Kaynak: Krane, 1996'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre döteryum-döteryum reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji;

denklem (1.34)'ün sol tarafındaki eşitlikten hareketle

$$Q = [(M_{\alpha} + m_x) - (m_y + M_{\beta})] \times c^2$$

İlk proses için;

$$Q = [(M_{H-2} + M_{H-2}) - (M_{H-3} + M_{H-1})] \times c^2$$

$$Q = [(2.014102 + 2.014102) - (3.016049 + 1.007825)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

den $Q = 4.03 \text{ Mev}$ ve kütle başına açığa çıkan enerji Q/K 'dan 1.03 Mev/akb olmaktadır. ikinci proses için;

$$Q = [(M_{H-2} + M_{H-2}) - (M_{He-3} + M_{n-1})] \times c^2$$

$$Q = [(2.014102 + 2.014102) - (3.016029 + 1.008664)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

den $Q = 3.27 \text{ Mev}$, kütle başına açığa çıkan enerji ise, Q/K 'dan 0.81 Mev/akb olarak gerçekleşmektedir.

Döteryum-trityum reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji;

$$Q = [(M_{H-2} + M_{H-3}) - (M_{He-4} + M_{n-1})] \times c^2$$

$$Q = [(2.014102 + 3.016049) - (4.002603 + 1.008664)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

için $Q = 17.59 \text{ Mev}$ ve kütle başına $Q/K = 3.5 \text{ Mev/akb}$ 'dir.

Döteryum-helyum-3 reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerji;

$$Q = [(M_{H-2} + M_{He-3}) - (M_{He-4} + M_{H-1})] \times c^2$$

$$Q = [(2.014102 + 3.016029) - (4.002603 + 1.007825)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

ve buradan Q değeri 18.32 Mev , Q/K ise, $3,66 \text{ Mev/akb}$ olarak hesaplanmaktadır. Son olarak döteryumun helyuma dönüşümünün toplam etkisi;

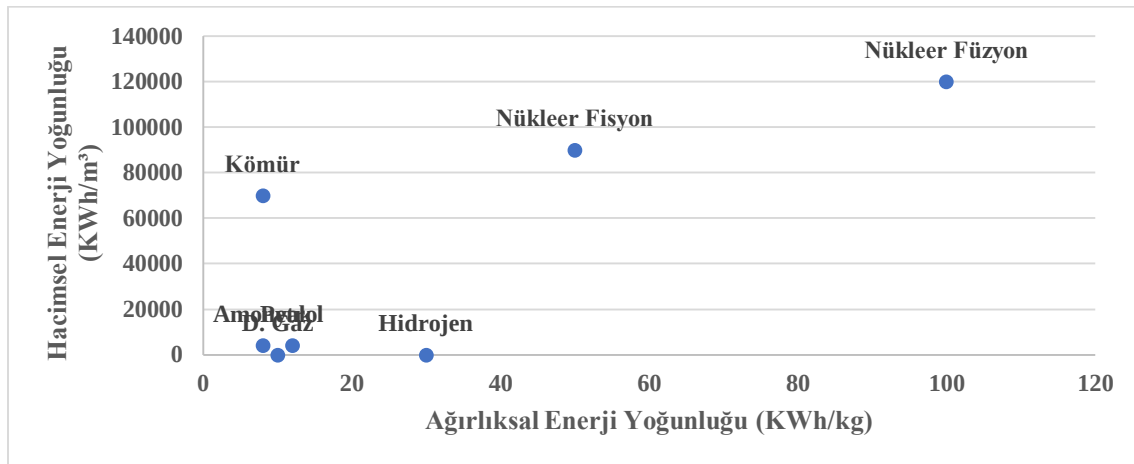
$$Q = [(4 \times M_{H-2}) - (2 \times M_{He-4})] \times c^2$$

$$Q = [(4 \times 2.014102) - (2 \times 4.002603)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

buradan açığa çıkan toplam etki $Q = 47.69$ Mev ve $Q/K = 5.96$ Mev/akb'dir.

Burada hesaplanan değerler tek bir füzyon reaksiyonu sunucunda açığa çıkan toplam ve kütle başı enerji değerler olup, füzyon reaksiyonları saniyede yaklaşık olarak 10^8 kez gerçekleşebilmektedir (Krane, 1996).

Füzyon reaksiyonlarına ilişkin buraya kadar yapılan hesaplamalar neticesinde tek bir füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan toplam enerjinin tek bir fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan toplam enerjiye göre düşük kaldığı görülmektedir. Ancak kütle başı enerji değerleri bakımından ise, tüm füzyon reaksiyonlarının kütle başı açığa çıkan enerji değerlerinin fisyon reaksiyonunun kütle başı açığa çıkan enerji değerlerinden üstün olduğu dikkat çekmektedir. Bunun anlamı, füzyon reaksiyonu ile üretilen enerjinin fisyon reaksiyonu ile üretilen enerjiye göre daha verimli olmasıdır. Bu verimlilik, toplam etki reaksiyonunda yaklaşık 8 kat, diğer reaksiyonlarda ise 1 ila 5 kat arasında değişkenlik göstermektedir. Yani atomu birleştirmek-kaynaştırmak, atomu parçalamaya göre daha verimli olabilmektedir. Atomu parçalayarak birim miktarda daha fazla enerji eldesi sağlanabilir ancak atomu birleştirerek-kaynaştırarak enerji daha verimli bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca füzyon ve fisyon arasındaki enerji verimlilik ilişkisi Grafik 36'da verilen değerler neticesinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



Grafik 36: Dünya Geneline Bazı Enerji Kaynaklarının ve Enerji Teknolojilerinin Enerji Yoğunlukları

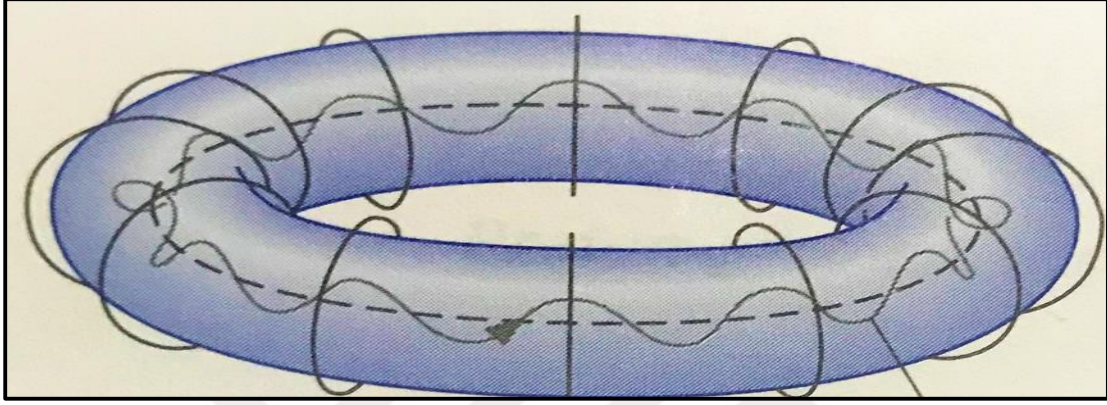
Kaynak: Züttel vd., 2010'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre nükleer füzyon enerjisi verimlilik açısından, dünya genelinde hem nükleer fisyon enerjisine hem diğer enerji kaynaklarına ve teknolojilerine göre oldukça önde gözükmemektedir. Ayrıca nükleer füzyon, radyoaktivite açısından nükleer fisyonu kıyasla daha avantajlı konumdadır. Nükleer füzyon, fisyonu göre daha düşük radyoaktiviteye neden olurken bazı reaksiyonları (D-He-3 ve P-B-11) hiç radyoaktivite üretmemektedir (Ryzhkov - Chirkov, 2019).

Füzyon reaksiyonları genel itibariyle birer termonükleer reaksiyondur. Çünkü içlerinde füzyon reaksiyonunun oluşumunu sağlayan elektrostatik itme meydana gelmektedir. Füzyon reaksiyonları bünyelerinde çok sayıda proton ve elektron barındırmaktadırlar. Bunlardan protonlar pozitif yüklü, elektronlar negatif yüklü atom taneciklerinden meydana gelmektedirler. Füzyon olayında birleşmenin-kaynaşmanın güçlü bir şekilde gerçekleşebilmesi için aynı yüke sahip bu atom taneciklerinin sert bir şekilde çarpışması gerekmektedir. Bunun içinde yani elektriksel itmenin güçlü bir şekilde meydana gelebilmesi için çok yüksek sıcaklıklara gereksinim duyulmaktadır. Çünkü bir gaz (hidrojen, helyum vb.) ne kadar çok sıcaklığa maruz bırakılırsa içerisindeki pozitif ve negatif yüklü taneciklerin hareketleri ve birbirlerine karşı olan itme kuvvetleri artmakta ve kaynaşma olayı bu şekilde de daha hızlı bir şekilde gerçekleşebilmektedir (Schlager - Weisblatt, 2006).

Nükleer füzyonun ve dolayısıyla da elektriksel itmenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan sıcaklık değerleri; döteryum-döteryum reaksiyonu için yaklaşık olarak 100 milyon °C, döteryum-trityum reaksiyonu için ise 150 ila 200 milyon °C arasında değişim gösterebilmektedir. Bu sıcaklık değerleri oldukça yüksek olup, güneşin merkezinde açığa çıkan enerjiden yaklaşık olarak 15 kat, uranyum-235 fisyonu için gerekli olan sıcaklık değerinden 100 bin kat ve kömürün enerjiye dönüşümü için gerekli olan sıcaklık değerinden ise yaklaşık 145 bin kat daha fazladır. Füzyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan toplam enerji, döteryum-döteryum reaksiyonu için yaklaşık 3.400 TJ olabilmektedir. Bu değer uranyum-235 fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan toplam enerji değerinden yaklaşık 2 bin kat daha fazladır (Ongena - Ogawa, 2016; Viswanathan, 2017).

Görüldüğü üzere füzyonun gerçekleşmesi için gerekli olan sıcaklık değerleri çok yüksek olup bu sıcaklık değerine sahip reaksiyondaki tüm maddeler, maddenin dördüncü hali de denilen plazma halinde bulunmakta ve reaksiyon da plazma halinde gerçekleşmektedir (Breeze, 2005). Plazmanın görünümü Şekil 9’da verilmektedir.



Şekil 9: Nükleer Füzyona Ait Plazma

Kaynak: Krane, 1996.

Buna göre Şekil 9’daki simit şeklindeki plazmada, plazmayı enine ve boyuna çevreleyen güçlü manyetik alanlar mevcuttur. Bu güçlü manyetik alanlar, reaktörün duvarı ile plazma arasında kalkan görevi görmekte ve yüksek sıcaklıktaki plazmanın içerisindeki füzyon parçacıklarının reaktörün duvarına ulaşmasını engelleyerek füzyonun güvenli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadırlar (Ongena - Ogawa, 2016).

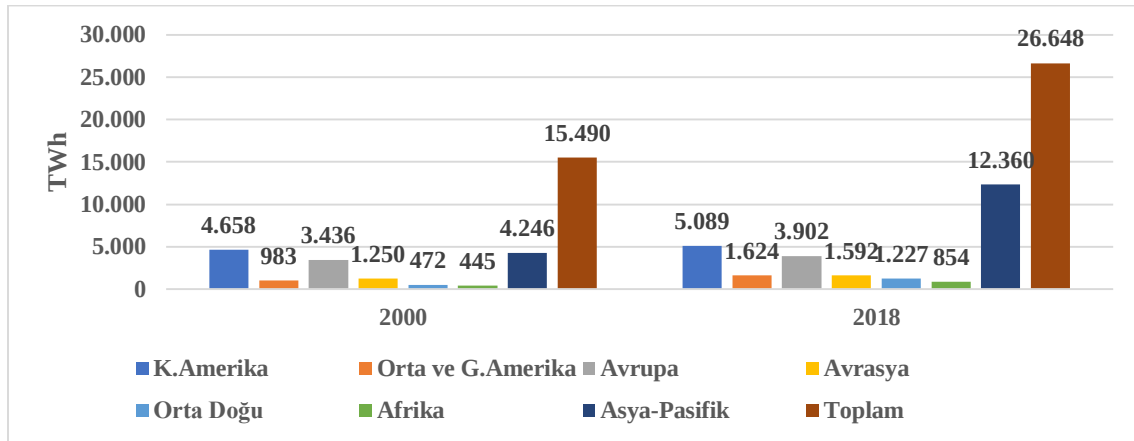
Günümüzde dünya genelinde enerji üretiminin yönelik aktif olarak kullanımda olan herhangi bir füzyon reaktörü olmamakla birlikte deneme ve yapım aşamasında olan çok sayıda füzyon reaktörü bulunmaktadır. Deneme aşamasındaki reaktörlerin odak noktası füzyon oluşumunun gerçekleşebilmesi için gerekli olan yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmeye ve bu sıcaklıkları belirli bir süre boyunca plazma içerisinde hapsederek füzyonun sürekliliğini sağlamaya yönelik olmaktadır. Bu yönde çalışmalar devam etmekte olup pek çok bilim insanı, füzyon sürekliliğinin sağlanması durumunda füzyon enerjisinin gelecekte dünyanın en önemli enerjisi olabileceği konusunda hem fikir görüşe sahip olmaktadır (Schlager - Weisblatt, 2006).

1.2.5. Elektrik Enerjisi

Elektrik Üretimi

Dünya elektrik üretimi, küresel talebi karşılamaya yönelik olarak 2000-2018 arası dönemde toplamda %72 oranında (11 PWh) artış göstermiştir. Küresel anlamdaki bu %72'lik artışın büyük bir kısmını %57'sini Asya Pasifik (%52) ve Orta Doğu (%5) bölgeleri oluşturmuştur. Aynı zamanda 18 yıllık süre içerisinde bu bölgelerden Asya-Pasifik'te toplamda %191 (8 PWh) ve Orta Doğu'da %160 oranında (755 TWh) elektrik üretimlerinde artışlar meydana gelmiştir. Diğer bölgelerde ise bu dönemde toplam elektrik üretimindeki artış K. Amerika'da %10 (431 TWh), Orta ve G. Amerika'da %65 (641 TWh), Avrupa'da %14 (466 TWh) ve Afrika'da %92 (409 TWh) olarak gerçekleşmiştir (Grafik 37).

Asya Pasifik'te ve Orta Doğu'da meydana gelen bu artışlarda bu bölgelerdeki Çin, Hindistan, S. Arabistan, İran ve BAE gibi ülkelerin etkisi büyük olmuştur. Bu dönemde Asya-Pasifik'te meydana gelen %52'lik artışın %46'sı Çin (%39) ve Hindistan (%7), Orta Doğu'da meydana gelen %4'lük artışın yaklaşık %3'ü ise S. Arabistan (%1,14), İran (%1,08) ve BAE (%0,5) gibi ülkeler tarafından gerçekleştirilmiştir (Enerdata, 27 Haziran 2020).

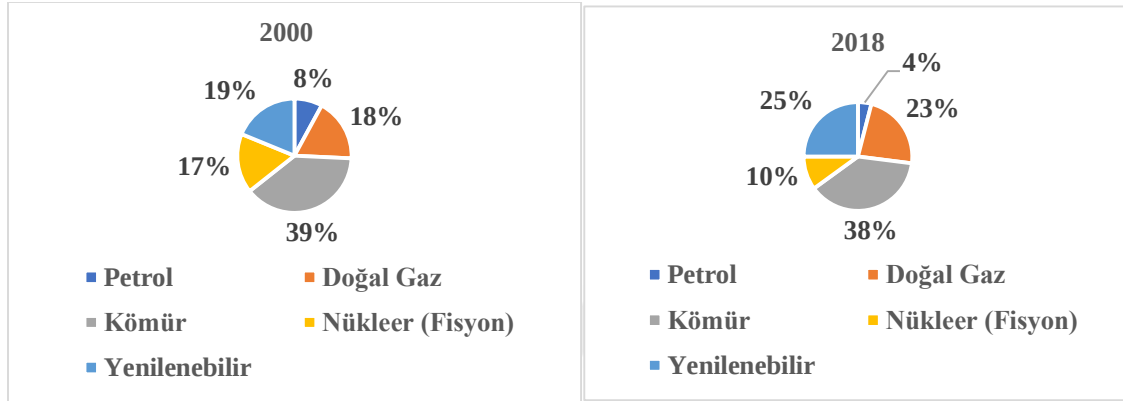


Grafik 37: 2000-2018 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Üretimi

Kaynak: Enerdata, 27 Haziran 2020; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımlarına bakıldığında ise yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya genelinde elektrik üretiminde gittikçe önem kazandığı

görülmektedir. Buna göre yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretiminde 2000 yılında %19 olan payı 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde %25'e kadar yükselmiştir. Bu dönem içerisinde fosil enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimi içerisindeki toplam payı ise (%65) değişmemiştir. Sadece fosil enerji grubunda bulunan enerji kaynaklarının dağılımlarında değişiklikler meydana gelmiştir (Grafik 38).



Grafik 38: 2000-2018 Arası Dünya Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Dağılımı (%)

Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya genelinde elektrik enerjisi üretimine yönelik olarak kaynak dağılımındaki bu denli değişimin nedeni; yüksek karbon emisyonuna neden olan ve gelecekte rezervi tükenecek olan fosil enerji kaynaklarına (bk. Grafik 2; Grafik 9; Grafik 16) ve yüksek radyasyonlu nükleer (filyon) enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynakları yaratabilmek yanında küresel ısınmanın beraberinde getirdiği iklim değişikliklerini önlemek amacıyla dünya genelinde temiz enerjiye geçiş kapsamında yürütülen hükümet politikaları, kamu-özel sektör yatırımları, Ar-Ge çalışmaları ve bunlar neticesinde de meydana gelen ve gelmeye devam edecek olan yenilenebilir elektrik üretimindeki maliyet düşüşleridir (bk. Tablo 25; Tablo 28).

Grafik 38'de belirtilmeyen fakat yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beraber geleceğin elektrik üretimlerinde önemli bir rol oynayacağı düşünülen diğer elektrik üretim kaynakları ise bataryalar, yakıt pili teknolojileri ve nükleer füzyon santralleridir. Şuanda tam olarak küresel çapta yaygın olarak kullanılmayan bataryaların ve yakıt pili teknolojilerinin ve kısmının yapım bir kısmının deneme sürecinde olduğu füzyon

santrallerinin gelişimlerini tamamladığında dünya elektrik üretiminde önemli bir güç oluşturacağı düşünülmektedir.

Elektrik Talebi

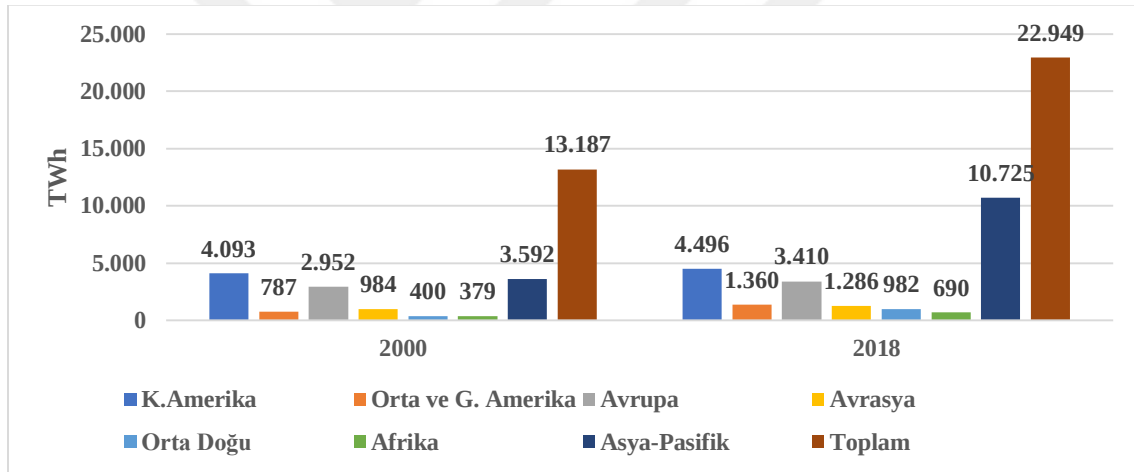
Diğer enerji kaynaklarında oluşu gibi dünya genelinde var olan elektrik enerjisinin de talep-üretim miktarı ve yapısı pek çok faktörde meydana gelen değişiklikler neticesinde şekillenebilmektedir. Bu faktörlerin başında demografik bir faktör olarak nüfus, teknolojik ve ekonomik büyüme, hükümet politikaları gelmektedir. Bu faktörden nüfusta meydana gelen değişimler kişi başına düşen elektrik ihtiyaçlarına, büyümede meydana gelen değişimler ülkelerin üretim kapasitelerine ve hacimlerine, teknolojik büyümede meydana gelen değişimler ülkelerdeki ekipman (cihaz, makine vb.) yapılarına ve mevcudiyetlerine ve hükümet politikaları ülkelerdeki enerji dönüşümlerine, enerji keşiflerine ve enerji altyapılarına etki ederek ülkelerin bölgesel ve sektörel elektrik ihtiyaçlarını ve buna bağlı olarak da elektrik üretimlerini şekillendirebilmektedirler.

Bu bilgilerin ışığında 2018 yılında küresel elektrik talebi 2000 yılına kıyasla %74 artarak yaklaşık 23 PWh olarak gerçekleşmiştir. Yine bu dönemde dünya nüfusu %24 artarak 7,6 milyara ve buna bağlı olarak da kişi başı elektrik ihtiyacı da % 41 artarak 3.007 KWh'e ulaşmıştır. Bunların yanında dünya ekonomisi bu süre zarfında ortalama %3,6 büyümüştür (IEA, 2018; UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020). Bölgesel olarak ise bu dönemde en fazla elektrik ihtiyacı Asya Pasifik bölgesinde gerçekleşmiştir. Asya-Pasifik'te 2000 yılında toplamda yaklaşık 4 PWh olan elektrik ihtiyacı 18 yıl içerisinde toplamda yaklaşık %200 artarak yaklaşık 11 PWh ulaşmış ve küresel anlamda elektriğin en fazla ihtiyaç duyulduğu bölge olmuştur. Aynı dönem içerisinde 2000 yılında küresel elektrik talebinin en fazla olduğu bölge olan K. Amerika'da bu 18 yıllık süre içerisinde elektriğe olan talep sadece %10 artarak 2018 yılında küresel anlamda en çok elektrik ihtiyacı olan ikinci bölge konumuna gelmiştir (Grafik 39).

Bu değişimlerde bölgelerin ekonomik büyümelerinde ve kişi başı elektrik ihtiyaçlarında meydana gelen değişimlerinin etkisi büyük olmuştur. 2000-2017 arası dönemde Asya-Pasifik bölgesi ekonomik ortalama %6 büyürken K. Amerika ortalama %1,9 büyüme göstermiştir. Asya-Pasifiğin bu denli büyümesinde Çin ve Hindistan gibi ülkelerin etkisi

büyük olmuştur. Çin ekonomisi bu dönemde % 9 büyürken Hindistan ekonomisi %7 büyüme göstermiştir. K. Amerika’da ise ABD ekonomisi %1,8 büyümüştür (IEA, 2018). Aynı şekilde bu dönem içerisinde kişi başı elektrik ihtiyacı Çin’de toplamda yaklaşık %400 (972 KWh’den 4.786 KWh’e), Hindistan’da %151 (386 KWh’den 968 KWh’e) oranında artmış, ABD’de ise toplamda yaklaşık %4 azalmıştır (13.513 KWh’den 12.987 KWh’e) (IEA, 17 Haziran 2020; UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020).

Yine bu dönem içerisinde Asya-Pasifiğin dışında elektrik talebinde en büyük artış Orta Doğu bölgesinde gerçekleşmiştir. Bu bölgede elektriğe olan talep 2000 yılından 2018 yılına kadar toplamda %146 oranında artış göstermiştir. Bunların haricinde elektrik talebinde diğer bölgelerde meydana gelen artış Avrupa’da %16, Avrasya’da %31, Afrika’da %82, Orta ve G. Amerika’da %73 olarak gerçekleşmiştir (Grafik 39).



Grafik 39: 2000-2018 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Talebi

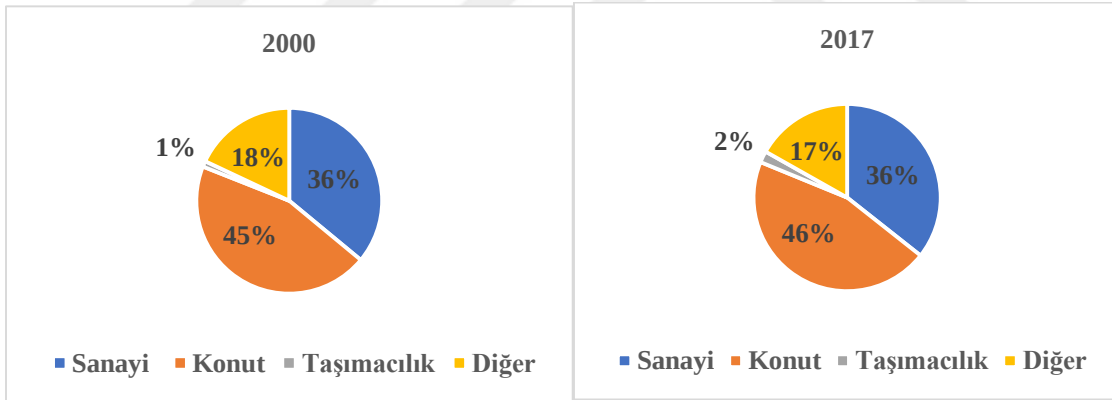
Kaynak: Enerdata, 27 Haziran 2020; IEA, 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buradan da anlaşılacağı üzere 2000-2018 arası dönemde bölgesel olarak elektrik talebinde en az artışın yaşandığı bölgelerin aynı zamanda en düşük ekonomik büyümeye ve kişi başı elektrik talep artışına, en yüksek elektrik talebinin yaşandığı bölgelerin ise yüksek ekonomik büyümeye ve kişi başı elektrik talep artışlarına sahip olduğu görülmektedir.

Küresel elektrik talebinin sektörel durumuna bakıldığında ise küresel anlamda ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi konut, sanayi, taşımacılık ve enerji dönüşüm sektörleri tarafından talep edilmektedir. Elektrik enerjisi bu sektörlerden konut sektöründe;

binaların ısıtılması, soğutulması, aydınlatılması ve hane halkının çeşitli teknoloji uygulamalarında (TV, buzdolabı, ütü, bilgisayar, klima, çamaşır makinesi vb.) kullanılırken, taşımacılık sektöründe; elektrikli araçlar, sanayide; aydınlatma, endüstriyel motor sistemlerinde ve çeşitli üretim süreçlerinde, enerji dönüşüm sektörlerinde de dönüşüme katkı sağlayıcı ilave enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Buna göre küresel elektrik ihtiyacının sektörel yapısına bakıldığında 2000 yılında küresel elektrik ihtiyacının yarısına yakını (%45'i) konut, %36'sının sanayi, %18'inin diğer (enerji dönüşüm) ve %1'inin taşımacılık sektörü tarafından talep edildiği ve bu talebin 2017 yılına kadar konut ve taşımacılık sektörünün lehine genişleyerek devam ettiği görülmektedir. 2017 yılına kadar konut sektörünün küresel elektrik talebi içindeki payı %46'ya ve taşımacılık sektörünün payı %2'ye yükselirken, enerji dönüşüm sektörünün payı %17'ye gerilemiş sanayi sektörünün payı ise sabit kalmıştır (Grafik 40). 2017 yılında dünya genelinde var olan hane halklarının yaklaşık %30'u evlerinde soğutma ve %13'ü ısıtma amaçlı elektrik enerjisini tüketmiştir (IEA, 2018).

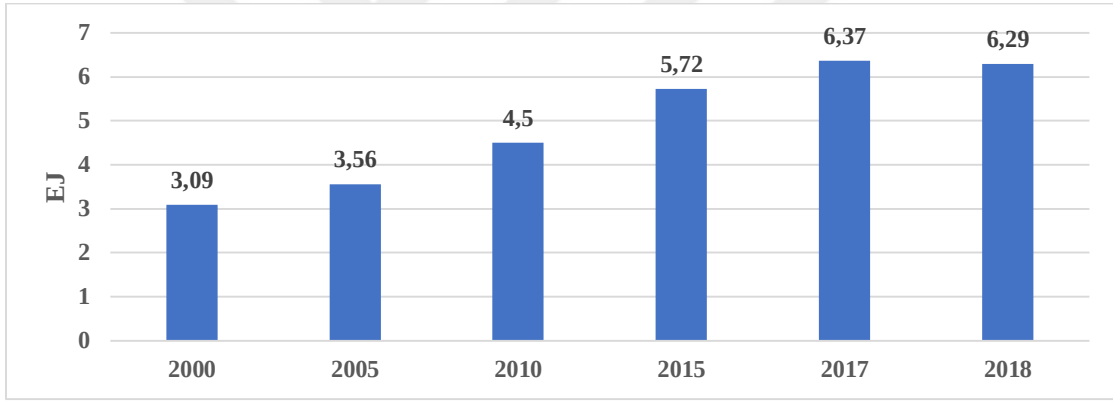


Grafik 40: 2000-2040 Arası Dünya Elektrik Talebinin Sektörel Dağılımı (%)

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

BÖLÜM 2: TÜRKİYE’DEKİ MEVCUT ENERJİ KAYNAKLARININ GÖRÜNÜMLERİ

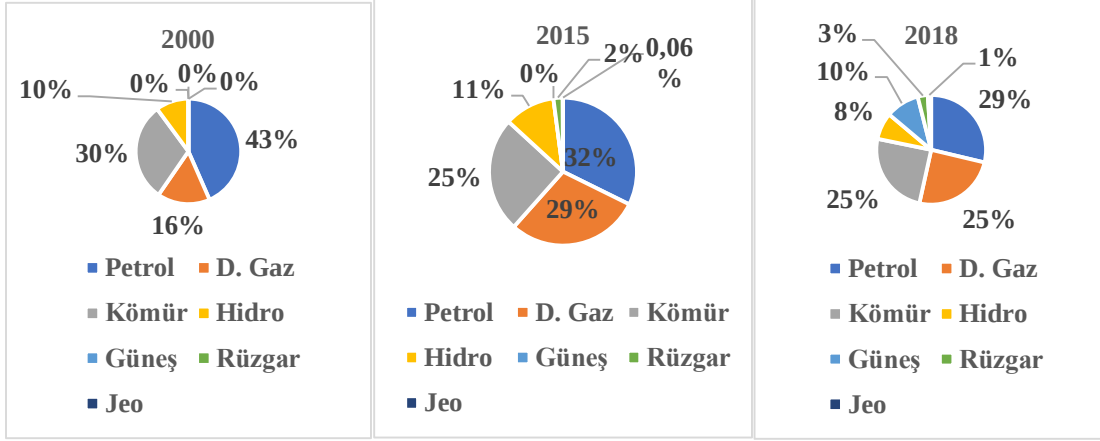
Türkiye, gelişmekte olan ülke olması sebebiyle enerjiye sürekli ihtiyaç duyan bu sebeple de enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün daha fazla artan bir ülke konumundadır. Buna göre Türkiye’deki mevcut enerji görünümü dikkate alındığında toplam birincil enerji tüketiminde 2018 yılında kısmi bir daralma yaşansa da 18 yıllık süre içerisinde sürekli olarak artış yaşanmıştır. Türkiye’nin 2000 yılında 3,09 EJ olan birincil enerji tüketimi 2005 yılına gelindiğinde toplamda %15 artarak 3,56 EJ’e yükselmiştir. Bu artış, 2005-2010 arası dönemde toplamda %26, 2010-2015 arası dönemde toplamda %27 ve 2015-2018 arası dönemde de %10 olacak şekilde devam ederek 6,29 EJ’e (149 milyon ton eşdeğeri petrol) ulaşmıştır (Grafik 41).



Grafik 41: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Toplam Birincil Enerji Tüketimleri

Kaynak: BP, 25 Eylül 2020’ Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu dönem içerisinde Türkiye’nin toplam birincil enerji tüketimi içerisinde fosil enerji tüketiminin payı yüksek olmuştur. Buna göre, 2000 yılında Türkiye’nin toplam birincil enerji tüketiminde petrol %43, doğal gaz %16 ve kömür %30 pay alarak toplam tüketimin %89’unu oluşturmuştur. 2000 yılından 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde de fosil enerji tüketiminin toplam birincil enerji tüketimi içerisindeki payları; 2015 yılında petrol %32, doğal gaz %29 ve kömür %25 olacak şekilde toplamda %86 ve 2018 yılında da petrol %29, doğal gaz %25 ve kömür %25 olacak şekilde toplamda %79 olarak gerçekleşmiştir (Grafik 42).

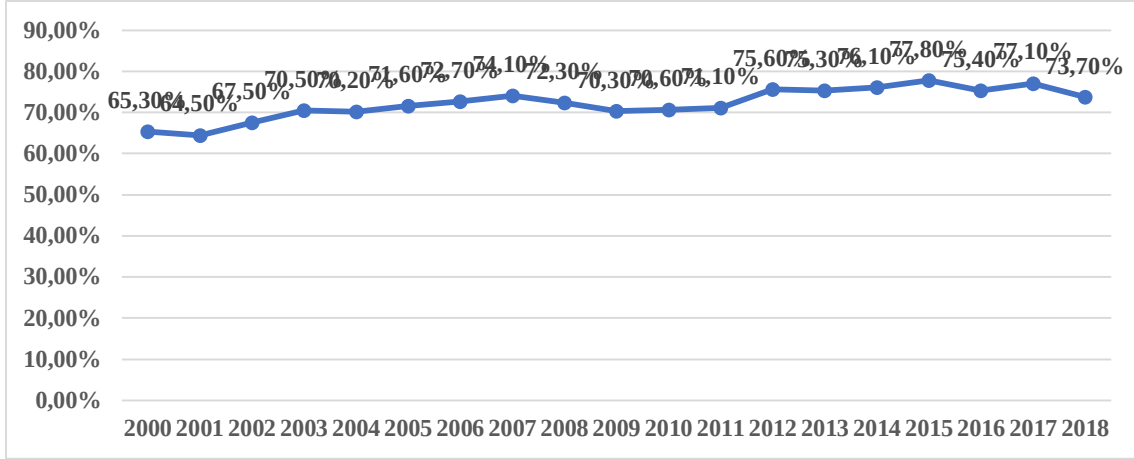


Grafik 42: Türkiye'nin Seçilmiş Yıllardaki Birincil Enerji Tüketiminin Enerji Kaynağı Bazında Dağılımları

Kaynak: BP, 25 Eylül 2020'den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'nin birincil enerji tüketiminin de fosil enerjinin payının büyük olması mevcut rezerv yapısı itibariyle bu tüketimi karşılama durumu olmayan Türkiye'yi mevcut enerji tüketimini karşılayabilmek için bu enerji kaynaklarını dışarıdan temin etme yoluna itmiştir. Bu durum, Türkiye'yi bu enerji kaynaklarına karşı bağımlılığı yüksek bir ülke haline getirmiştir. Buna göre Türkiye'nin 2000-2018 arası dönemde fosil enerji ithalatına olan bağımlılığı ortalama %70'in üzerinde seyir izlemiştir. Özellikle 2015 ve 2017 yıllarında Türkiye'nin fosil enerji ithaline olan bağımlılığı zirve yapmıştır. Türkiye'nin bu yıllar içerisinde fosil enerjiye olan bağımlılığı sırasıyla %78 ve %77 olarak gerçekleşmiştir (Grafik 43).

Bunun yanında Türkiye, 2018 yılı itibariyle Avrupa genelindeki 38 ülke içerisinde fosil enerji kaynaklarına bağımlılığı en fazla olan 8. ülke statüsünde olmuştur. Bu sıralama 2000, 2005 ve 2010 yıllarından 10.'luk olarak gerçekleşmiştir. Bu açıdan bakıldığında bile Türkiye'nin bu 18 yıllık süre içerisinde Avrupa devletleri içerisinde de fosil enerjiye olan bağımlılığı artan ülke olmuştur (EUROSTAT, 26 Haziran 2020).



Grafik 43: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Enerji İthalatına Olan Bağımlılığı

Kaynak: EUROSTAT, 26 Haziran 2020' Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'nin ağırlıklı olarak fosil enerji tüketimine yönelik olan yapısı ve bu yapının da önemli bir bölümünün ithal kaynaklı olması enerji üretiminde (elektrik) ve diğer sektörlerde bu enerjiyi yoğun olarak kullanan Türkiye'nin enerji açığı vermesinde neden olmaktadır. Özellikle Türkiye'de ulaşım ve enerji dönüşüm sektörlerinin (elektrik üretimi) yüksek oranda fosil enerjinin dayalı yapısı nedeniyle 2018 yılı baz alındığında geriye dönük 18 yıllık süre içerisinde toplam enerji ithalatına ödenen dövizin %167, toplam enerji açığının da %120 artmasına neden olmuştur. Ayrıca bu 18 yıllık tarihsel süreç içerisinde toplam enerji açığı, toplam ürün ticaretine dayalı açığın hatırı sayılır bir bölümünü oluşturmuştur (Tablo 31).

Tablo 31: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Enerji İthalatının ve İhracatının Görünümleri

Yıllar	Toplam Enerji İthalatı (Milyon \$)	Toplam Enerji İhracatı (Milyon \$)	Toplam Enerji Açığı (Milyon \$)	Toplam Enerji Açığının Toplam Ürün Ticaret Açığı İçerisindeki Payı (%)
2000	7.515	294	7.221	27
2001	6.141	445	5.696	57
2002	7.170	683	6.487	42
2003	8.586	980	7.606	34
2004	11.133	1.429	9.704	28
2005	15.764	2.641	13.123	30
2006	20.345	3.566	16.779	31
2007	23.883	5.148	18.735	30
2008	15.123	7.532	7.591	11

2009	11.607	3.921	7.686	20
2010	14.994	4.369	10.625	15
2011	19.724	6.412	13.312	13
2012	20.645	7.478	13.167	16
2013	20.237	6.476	13.761	14
2014	20.123	5.885	14.238	17
2015	14.416	4.298	10.118	16
2016	11.883	3.021	8.862	16
2017	16.507	4.058	12.449	16
2018	20.088	4.141	15.947	29

Kaynak: UNCTADSTAT, 12 Şubat Eylül 2020’Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

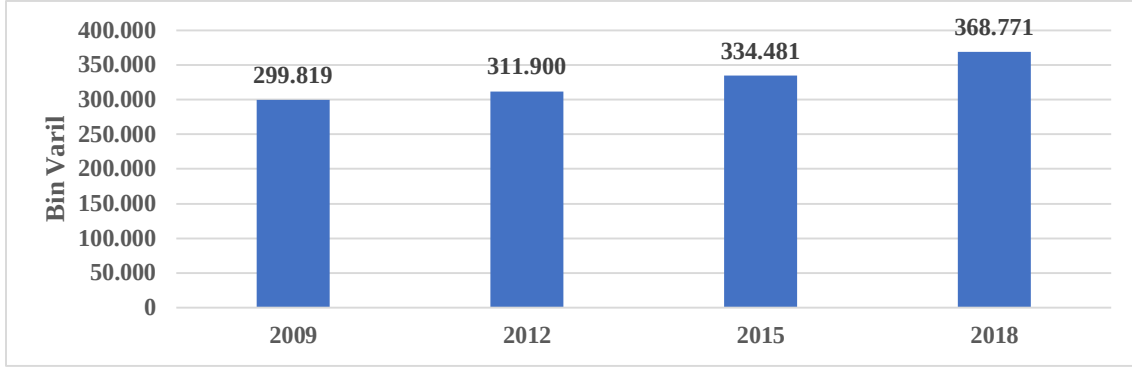
Bunların yanında Türkiye, enerji üretimini millileştirmek ve dolayısıyla da enerji ihtiyacının milli-yerli kaynaklardan elde etmeye yönelik olarak yenilenebilir enerji teknolojilerini (güneş pili ve rüzgar türbini) uygulamaya sokmuştur. Bu sayede ihtiyaç duyduğu enerjinin (elektrik üretiminin) bir kısmını bu kaynaklardan elde etmeyi başaramıştır. Ayrıca Türkiye, yine elektrik eldesine yönelik olarak önümüzdeki 3-4 yıl içerisinde iki adet nükleer enerji santralini hayata geçirmeyi planlamaktadır. Türkiye’nin mevcut enerji görünümü daha detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.

2.1. Fosil Enerji Kaynakları

2.1.1. Petrol

Petrol Rezervleri

Türkiye’de üretilebilir durumda bulunan ham petrol rezervleri 2018 yılında; %60’ı Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı’na, % 2’si Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü’ne, %5’i bunların dışındaki ulusal şirketlere, %27’si yabancı şirketlere ve %7’si ulusal ve yabancı kaynaklı şirket ortaklıklarına ait olmak üzere toplamda 4.910 adet petrol kuyusu ile toplamda 369 milyon varil olarak gerçekleşmiştir. 2009 yılından 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde yapılan keşifler ve saha çalışmaları neticesinde Türkiye genelindeki petrol kuyuları toplamda %32 oranında artmış, buna bağlı olarak da üretilebilir konumdaki ham petrol rezervleri toplamda %23 oranında artış göstermiştir (MAPEG, Ekim 2020).



Grafik 44: 2009-2018 Arası Türkiye'nin Üretilabilir Durumdaki Ham Petrol Rezervleri

Kaynak: MAPEG, Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Ancak Türkiye'nin ham petrol rezervlerinin artması petrol talebi karşılamaya yeterli olamamaktadır ve Türkiye'nin mevcut petrol rezervlerinin sadece 18 yıllık bir ömrü bulunmaktadır (TPAO, 2019). Bunun yanında Türkiye'nin mevcut ham petrol rezervleri küresel petrol rezervleri içerisindeki payı oldukça düşüktür. Buna göre 2018 yılında Türkiye'nin mevcut üretilabilir durumdaki toplam ham petrol rezervleri küresel toplam petrol rezervlerinin sadece %0,02'sini oluşturmaktadır. Bu durum, Türkiye'yi, mevcut petrol talebinin mevcut rezervleriyle karşılanması açısından sıkıntılı duruma sokmaktadır (BP, 2019). Bunların haricinde Türkiye'nin mevcut petrol rezervlerini artırmaya yönelik olarak Doğu Akdeniz'de sondaj çalışmaları devam etmektedir. Bulunacak yeni rezervler hiç kuşkusuz ki ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlayacaktır.

Petrol Üretimi ve Talebi

Türkiye'nin mevcut petrol rezerv yapısı nedeniyle petrol üretimi, petrol talebini karşılayabilecek düzeyde değildir ve ihtiyacı duyduğu petrolün büyük bir bölümünü dışarıdan temin edebilmektedir. Bu durum, Tablo 32'de Türkiye'nin ham petrol üretim ve talep verileri incelendiğinde açıkça görülmektedir.

Buna göre 2011 yılında Türkiye'nin mevcut petrol kuyularından sağlanan ham petrol üretimi 2,3 milyon ton gerçekleşirken toplam petrol talebi ise 24 milyon ton olarak gerçekleşerek ihtiyaç duyduğu toplam petrol talebinde 22 milyon tonluk açık meydana gelmiştir. Bu durum 2011 yılını takip eden süreç içerisinde de devam etmiştir. Keza 2015 yılında Türkiye'nin ham petrol üretimi, 2011 yılına kıyasla %6 oranında artmasına rağmen toplam petrol talebi de %46 artmış ve buna bağlı olarak da toplam petrol açığı da

%51 oranında büyümüştür. 2018 yılında ise, Türkiye’de ham petrol üretimi 2015 yılına kıyasla toplamda %13, 2011 yılına kıyasla toplamda %20, toplam petrol talebi de bu dönemler içerisinde sırasıyla %9 ve %59 oranında artmıştır. Toplam petrol açığı ise yine aynı dönemler içerisinde sırasıyla %63 ve %8 artış göstermiştir (Tablo 32).

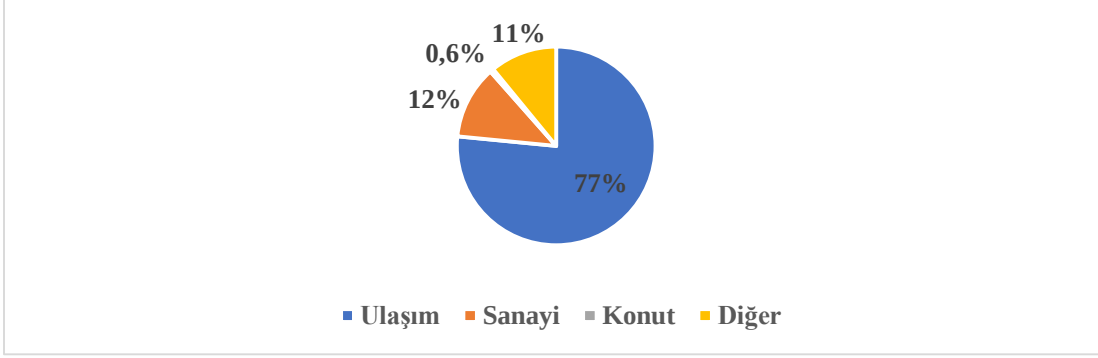
Tablo 32: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Ham Petrol Üretimi ve Toplam Petrol Talebi

Yıllar	Ham Petrol Üretimi (Bin Ton)	Toplam Petrol Talebi (Bin Ton)
2011	2.367	24.346
2012	2.337	29.230
2013	2.398	29.230
2014	2.455	31.179
2015	2.515	35.630
2016	2.571	36.406
2017	2.551	38.551
2018	2.850	38.682

Kaynak: EPDK, 2013; EPDK, 2016; EPDK, 2019b; MAPEG, Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de kullanılan yerli ve yabancı kaynaklı ham petrol, rafineriler aracılığıyla işlenip çeşitli petrol ürünlerine dönüştürülerek sektörel anlamda iç tüketimde kullanılabilir. Türkiye’de yerli ve yabancı ham petrol, TÜPRAŞ’a ait olarak Kocaeli-İzmit, İzmir-Aliağa, Kırıkkale-Bahşili, Batman-Batman’daki petrol rafinerilerinde ve yine İzmir-Aliağa’daki Star Rafinerisi tarafından işlenmektedir. Bu rafinerilerde ham petrol; benzin, motorin, fuel-oil, jet, denizcilik ve kalorifer yakıtı, gaz yağı, LPG, nafta, bitümen, rafineri gazı, ispiroto, baz yağı ve petrol koku gibi çeşitli petrol ürünlerine dönüştürülmekte ve bu sayede de sektörel anlamda iç tüketimde kullanılabilir. Buna göre Türkiye’de ham petrolden dönüştürülen petrol ürünlerinin 2015 yılında %70’i, 2016 yılında %73’ü, 2017 yılında %74’ü ve 2018 yılında da %76’sı iç tüketimde kullanılmıştır (EPDK, 2019b).

Bununla birlikte Türkiye’de iç tüketimde kullanılan petrol ürünlerinin önemli bir kısmı ise ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Bu bağlamda 2018 yılı itibariyle iç tüketimde kullanılan toplam petrol ürünlerinin %77’si akaryakıt olarak ulaşım sektöründe kullanılırken, %12’sinin sanayi ve %11’inin de diğer çeşitli sektörler tarafından kullanımı gerçekleştirilmiştir (Grafik 45).

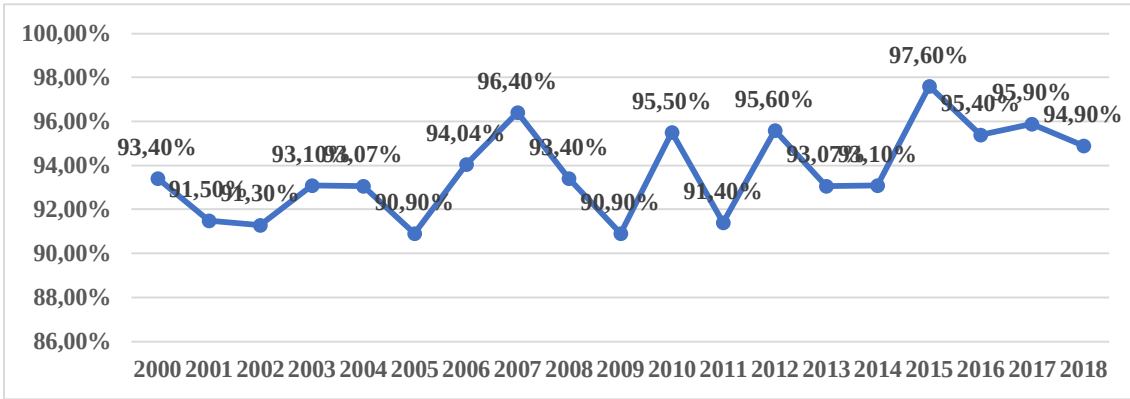


Grafik 45: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye’deki Petrol Tüketiminin Sektörel Dağılımları

Kaynak: EUROSTAT, 10 Eylül 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Petrol Ticareti

Türkiye mevcut petrol ihtiyacını yerli kaynaklardan karşılayamadığından dolayı önemli bir petrol ithalatçısı ülke konumundadır. Bu bakımdan Türkiye, petrol ithalatına ortalama olarak yaklaşık %95 oranında bağımlı bir ülkedir (Grafik 46). Türkiye’nin petrol ithalatına olan bağımlılığı Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında, Türkiye 2018 yılı itibariyle Avrupa genelinde petrol bağımlılığı en yüksek olan 38 ülke içerisinde 23. sırada yer almaktadır (EUROSTAT, 26 Haziran 2020).



Grafik 46: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Petrol İthalatına Olan Bağımlılığı

Kaynak: EUROSTAT, 26 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’nin toplam petrol ithalatının büyük bir bölümü ham petrol ithalatından oluşmaktadır. Buna göre Tablo 33’te de görüldüğü üzere Türkiye’nin ham petrol ithalatı, toplam petrol ithalatının 2011’de %65’ini, 2015 yılında %63’ünü, 2017 yılında %60’ını ve 2018 yılında da %54’ünü oluşturmuştur. Ancak Türkiye’nin ham petrol ithalatının toplam petrol ithalatı içerisinde yüksek pay almasına rağmen bu dönem içerisinde petrol

ürünleri ithalatına yönelimi söz konusu olmuştur. Buna göre 2011 yılında Türkiye'nin petrol ürünleri ithalatı, toplam petrol ithalatının %35'ini oluştururken 2015 yılında %37'sini, 2017 yılında %40'ını ve 2018 yılında ise %46'sını oluşturmuştur. Bu artışta ham petrolün 2011 yılında 111 \$ olan varil başına fiyatlarının 2018 yılında 70 \$ seviyelerine inmesi etkili olmuştur (EIA, Ekim 2020). Türkiye, elde ettiği ham petrol ve petrol ürünlerinin talep fazlasını da ihracat yoluyla satmıştır (Tablo 35).

Türkiye'nin 2018 yılı itibarıyla ham petrol ithalatının büyük bir kısmını İran ve Irak gibi ülkelerden petrol boru hatları ile karşılanmıştır. Buna göre Türkiye'nin %65 olan bu ülkelerden toplam ham petrol ithalatında İran %34 pay alırken, Irak ise %31'ini oluşturmuştur. Petrol ürünleri ithalatında ise, en fazla petrol ürünleri ithalatı Rusya ve Hindistan'dan yapılmıştır. Rusya ve Hindistan 2018 yılında Türkiye'nin toplam petrol ürünleri ithalatının %68'ini (Rusya %44 ve Hindistan %24) oluşturmuşlardır. Rusya'dan bu dönem içerisinde yapılan toplam petrol ürünleri ithalatının % 35'ini motorin ithalatı oluştururken %1'ini denizcilik yakıtı ithalatı ve % 8'ini de diğer petrol ürünleri ithalatı oluşturmuştur. Hindistan'dan ise bu %24'ün tamamı motorin yakıtı olarak ithal edilmiştir. Bunların yanında Türkiye İsveç, İspanya ve Norveç gibi ülkelerden fuel-oil yakıtı ithal ederken Yunanistan, Mısır ve G. Kore gibi ülkelerden jet yakıtı tedarikinde bulunmuştur. İsveç, İspanya ve Norveç Türkiye'nin ithal etmiş olduğu fuel-oil'in %61'ini oluştururken Yunanistan, Mısır ve G. Kore Türkiye'nin ithal etmiş olduğu jet yakıtının %70'ini oluşturmuşlardır. Petrol ihracatında ise Türkiye 2018 yılında ihraç ettiği petrolün %52'sini Mısır (%10,6), İspanya (%9,8), Malta (%5,7), ABD (%4,2), Rusya (%3,2), Cebelitarık (%2,8), KKTC (%2,7), İtalya (%2,6), Hollanda (%2,6), S. Arabistan (%2,5), Almanya (%2,5) ve BAE (%2,3) gibi ülkeler meydana getirmişlerdir. Bu ülkelere benzin, motorin, fuel-oil, jet yakıtı ve denizcilik yakıtı gibi ürünlerin ihracatında bulunulmuştur (EPDK, 2019b).

Tablo 33: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Petrol İthalatı ve İhracatı

Yıllar	Ham Petrol İthalatı (Bin Ton)	Petrol Ürünleri İthalatı (Bin Ton)	Toplam Petrol İthalatı (Bin Ton)	Toplam Petrol İhracatı (Bin Ton)
2011	18.092	9.630	27.722	7.715
2012	19.484	12.794	32.278	8.669
2013	18.554	13.480	32.034	8.644

2014	17.477	15.073	32.550	9.286
2015	25.064	14.573	39.637	10.806
2016	24.957	15.116	40.073	9.688
2017	25.766	16.886	42.652	10.081
2018	20.970	17.740	38.710	8.875

Kaynak: EPDK, 2012; EPDK, 2016; EPDK, 2017; EPDK, 2019b'Den Elde Edilen Verilerden

Oluşturulmuştur.

Buna göre Türkiye'nin 2018 yılında toplam petrol ithalatına ödediği döviz yılında 13 milyar \$, petrol ürünleri ihracatından elde ettiği döviz geliri de 4 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir. Toplam petrol ithalatında 2018 yılı baz alındığında 2011 yılına göre düşüş görülse de 2015 sonrasına göre artış görülmüştür (Tablo 34). Bunun nedeni ise, küresel ham petrol fiyatlarının 2011-2018 arası dönemde dalgalı bir seyir izlemesinden kaynaklanmıştır (EIA, Ekim 2020). Toplam petrol ürünleri ihracatında ise bu dönem içerisinde azalma meydana gelmiştir. Türkiye'nin toplam petrol ürünleri ihracatı bu dönem içerisinde 7 milyar \$'dan 4 milyar \$ seviyelerine gerilemiştir. Ayrıca Türkiye'nin petrol açığı da bu dönem içerisinde artmıştır. 2011 yılında 9,2 milyar \$ olan Türkiye'nin toplam petrol açığı 2015 yılında 5,4 milyar \$ olarak gerçekleşirken 2017 yılında 7 milyar \$ ve 2018 yılında da 2011 yılının üzerine çıkarak 9,5 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte Türkiye'nin toplam petrol ithalatının da büyük bir bölümünü oluşturmuştur. 2011 yılında %77 olan toplam petrol ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payı, 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde az da olsa azalış göstererek 2018 yılında %67 ile yine önemli bir kısmını oluşturmuştur. Ayrıca yine 2018 yılında Türkiye'nin toplam petrol ithalatı, toplam ürün ithalatının %6'sını oluşturmuştur.

Tablo 34: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Petrol İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri

Yıllar	Toplam Petrol İthalatı (Milyon \$)	Toplam Petrol İhracatı (Milyon \$)	Toplam Petrol İthalatı Giderlerinin Toplam Enerji İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)	Toplam Petrol İthalatı Giderlerinin Toplam Ürün İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)
2011	15.245	6.027	77	6,3
2012	16.179	6.964	78	6,8
2013	16.115	6.173	80	6,4

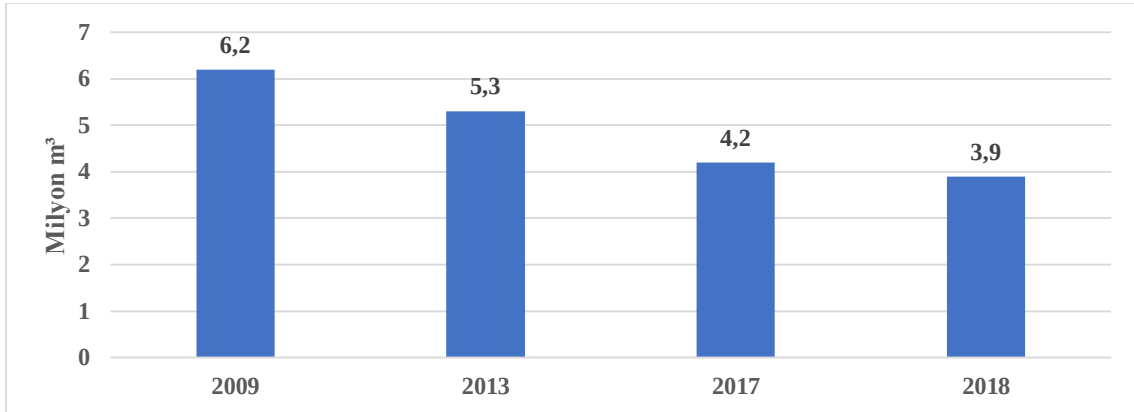
2014	16.087	5.602	80	6,6
2015	9.553	4.105	66	4,6
2016	7.707	2.919	65	3,8
2017	10.381	3.830	63	4,4
2018	13.462	3.927	67	6

Kaynak: UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.1.2. Doğal Gaz

Doğal Gaz Rezervleri

Türkiye’de az da olsa üretilebilir durumda olan doğal gaz rezervleri mevcuttur. Ancak bu rezervler Türkiye’deki mevcut talebi karşılayabilecek düzeyde değildir. Grafik 47’de Türkiye’nin 2009 ila 2018 yılları arasındaki üretilebilir durumda olan doğal gaz rezervleri verilmektedir. Buna göre Türkiye’nin 2018 yılında üretilebilir durumdaki doğal gaz rezervleri 3,9 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. Bu rezerv, 2018 yılı itibariyle Türkiye’nin mevcut doğal gaz talebinin sadece %0,007 karşılayabilir niteliktedir ve sadece 9 yıllık bir rezerv ömrü bulunmaktadır (TPAO, 2019). Bu bakımdan Türkiye, tıpkı petrolde de olduğu gibi doğal gaz ihtiyacının büyük bir bölümünü dışarıdan temin edebilmektedir. Bununla birlikte Türkiye’nin üretilebilir konumdaki toplam doğal gaz rezervleri küresel doğal gaz rezervlerinin ise sadece %0,000002’sini oluşturabilmektedir (BP, 2019).



Grafik 47: 2009-2018 Arası Türkiye’nin Üretilebilir Durumdaki Doğal Gaz Rezervleri

Kaynak: MAPEG, Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunların haricinde Türkiye’nin yeni doğal gaz rezervlerini keşfetmeye yönelik Karadeniz ve Akdeniz’de sondaj çalışmaları neticesinde Karadeniz’de Sakarya Gaz Sahası’nda yaklaşık 320 milyar m³’lük doğal gaz rezervi tespit edilmiştir. Bu tespit edilen doğal gaz

rezervinin ise 2023'te kullanıma sunulması hedeflenmektedir (ETKB, 3 Ekim 2020). Bulunan doğal gaz rezervinin Türkiye'nin yaklaşık 7 yıllık ihtiyacını karşılaması beklenmektedir (Yeni Akit, 3 Ekim 2020).

Doğal Gaz Üretimi ve Talebi

Türkiye'de doğal gaz, mevcut rezerv yapısının yetersizliğine bağlı olarak gerçekleştirilen düşük üretim nedeniyle üretim talebi karşılayabilecek düzeyde değildir. Bu durum Tablo 35'te gösterilmektedir. Türkiye'nin toplam doğal gaz üretimi 2018 yılında 428 milyon m³ olarak gerçekleşirken toplam doğal gaz talebi ise 50 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. Talep edilen doğal gazın ise, %98,6'sı iç tüketimde kullanılmak amacıyla talep edilmiştir. 2011-2018 arası dönemde ise Türkiye'deki toplam doğal gaz üretimi %43 azalırken toplam doğal gaz talebi ve buna bağlı olarak da iç tüketim için kullanılacak olan doğal gaz talebi de %13 oranında artmıştır (EPDK, 2019a). Bu durum Türkiye'deki doğal gaz açığının derinleşmesine neden olmuştur. 2011 yılında 43,6 milyar m³ olan Türkiye'nin toplam doğal gaz açığının 2018 yılında %14 artarak 49,5 milyar m³'e ulaşmıştır (Tablo 35). Bu da Türkiye'nin mevcut talebini karşılayabilmek için doğal gaz ithalatının önünü açmıştır.

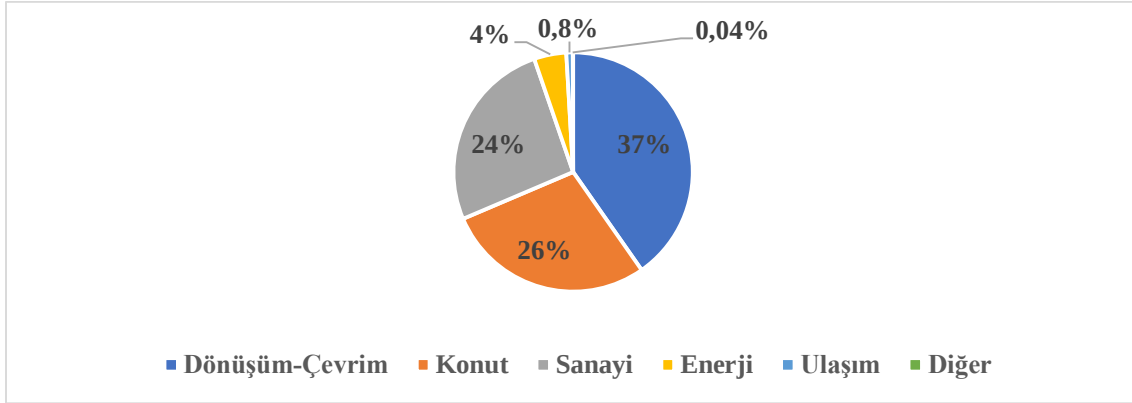
Tablo 35: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Doğal Gaz Üretimleri ve Tüketimleri

Yıllar	Toplam Doğal Gaz Üretimi (Milyon m³)	Toplam Doğal Gaz Talebi (Milyon m³)
2011	759	44.411
2012	632	45.853
2013	537	46.600
2014	479	49.349
2015	381	48.623
2016	367	47.069
2017	354	54.487
2018	428	50.003

Kaynak: EPDK, 2019a' Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'de iç tüketimde kullanılan doğal gazın sektörel dağılımında ise, 2018 yılında Türkiye'de kullanılan doğal gazın %37'si elektrik üretimi için dönüşüm ve çevirim sektöründe, %26'sı ısınma amaçlı olarak konut sektöründe, %24'ü ağaç, petro-kimya, makine, tekstil, deri ve giyim, demir-çelik, tütün- tütün ürünleri, alkol-alkol ürünleri sanayisinde, % 4'ü petrol rafinerileri ve bunların haricindeki enerji tüketicileri tarafından

enerji sektöründe, %0,08'i yakıt ve boru taşımacılığı olarak ulaşım sektöründe ve %0,04'ü de tarım-ormancılık ve balıkçılık sektörleri tarafından kullanılmıştır (EPDK, 2019a).

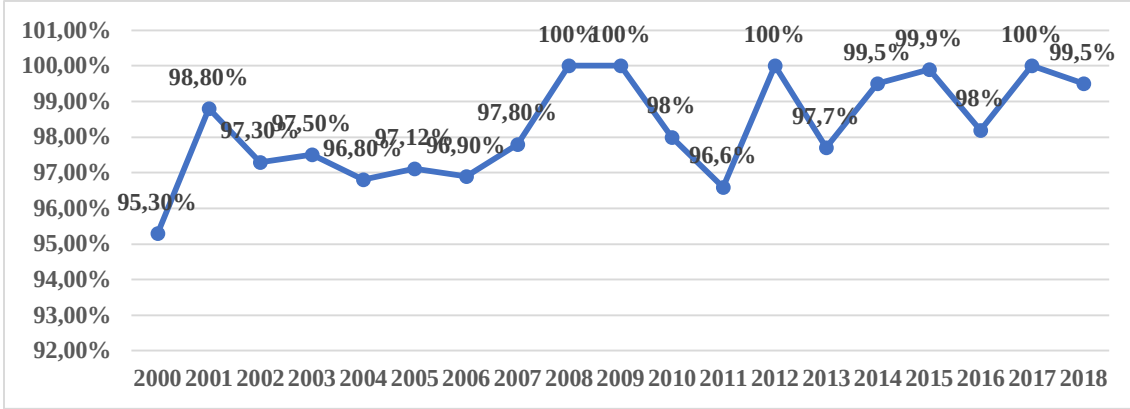


Grafik 48: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Petrolün Tüketiminin Sektörel Dağılımları

Kaynak: EPDK, 2019a' Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Doğal Gaz Ticareti

Türkiye, mevcut rezerv yapısı ve buna bağlı olarak üretim yetersizliği nedeniyle doğal gaza da yüksek derecede bağımlı bir ülkedir. Türkiye, 2018 yılı itibariyle doğal gaz ithalatına yani doğal gaz talebini karşılamak için ihtiyacı olan doğal gaz miktarına %99,5 oranında bağımlıdır. Türkiye'nin doğal gaz ithalatına olan bağımlılığı 2018 yılından geriye dönük 18 yıllık süre içerisinde de dalgalı bir seyir izlese de bu süre zarfında ortalama %98 seviyelerinde seyretmiştir (Grafik 49). Bu bağımlılık, Avrupa ülkeleri ile mukayese edildiğinde ise, Türkiye 2018 yılında Avrupa'da en fazla doğal gaz ithalatına bağımlı olan ilk 14 ülke içerisindeyken 2017 yılında Avrupa'da doğal gaz ithalatına en fazla bağımlı olan 5. ülkesi konumunda yer almıştır (EUROSTAT, 26 Haziran 2020).



Grafik 49: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Doğal Gaz İthalatına Olan Bağımlılığı

Kaynak: EUROSTAT, 26 Haziran 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye, doğal gaz ithalatını iki şekilde sağlayabilmektedir. Bunlardan ilki mevcut boru hatları yardımıyla gaz halinde ikinci ise sıvılaştırılmak suretiyle tankerler aracılığıyla. Doğal gazın sıvı haldeki (LNG) ithalatı, doğal gazın hem ekonomik hem de teknik yönden borular halinde taşınmaması durumunda yapılabilmektedir. Buna göre Türkiye boru hatları vasıtasıyla; Rusya doğal gazını Batı Hattı, Mavi Akım ve Türk Akımı Boru Hattı Projeleriyle, Azerbaycan doğal gazını Trans-Anadolu ve Bakü-Tiflis-Erzurum Boru Hattı Projeleriyle ve İran doğal gazını da Doğu Anadolu Doğal Gaz İletim Hattı Projesi ile ithalatını sağlamaktadır (BOTAŞ, 4 Ekim 2020). Sıvılaştırılmış (LNG) halinde ise Türkiye Doğal gazı Cezayir, Katar, Nijerya, ABD vb. ülkelerden temin edebilmektedir (EPDK, 2019a).

Bununla birlikte Türkiye, ithal etmiş olduğu doğal gazın büyük bir bölümünü boru hatları aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Tablo 36'da yer alan Türkiye'nin toplam doğal gaz ithalat rakamlarına bakıldığında 2011 yılında ithal edilen toplam 44 milyar m³'lük doğal gazın %85'i, 2015 yılında ithal edilen toplam 48 milyar m³'lük doğal gazın %84'ü, 2017 yılında ithal edilen toplam 55 milyar m³'lükdoğal gazın %81'i ve 2018 yılında ithal edilen toplam 50 milyar m³'lük doğal gazın ise %78'i boru hatları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak Türkiye'de Doğal gaz ithalatının büyük bir bölümü boru hatları ile gerçekleşmesinde rağmen son zamanlarda sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ithaline ağırlık vermeye başlanmıştır. Buna göre 2011-2018 arası dönemde Türkiye'de boru hatları aracılığıyla ithal edilen doğal gazın toplam ithalatı içerisindeki 2011'de %85 olan payı 2018'de %78'e düşerken, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ithalatının toplam doğal gaz ithalatı içerisindeki 2011'de %15 olan payı 2018'de %22'ye yükselmiştir (EPDK, 2019a).

Tablo 36: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Doğal Gaz İthalatı ve İhracatı

Yıllar	Toplam Doğal Gaz İthalatı (Milyon m³)	Toplam Doğal Gaz İhracatı (Milyon m³)
2011	43.874	726
2012	45.922	622
2013	45.269	694
2014	49.262	644
2015	48.427	635
2016	46.352	686
2017	55.250	642
2018	50.361	685

Kaynak: EPDK, 2019a' Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye, en fazla doğal gaz ithalatını Rusya üzerinden gerçekleştirmiştir. Türkiye, 2018 yılı itibariyle ithal etmiş olduğu toplam doğal gazın %47'sini Rusya'dan elde etmiştir. Bu yıl içerisinde İran'dan ithal edilen doğal gaz toplam ithal edilen doğal gazın %16'sını, Azerbaycan'dan ithal edilen doğal gaz toplam ithal edilen doğal gazın %15'ini oluşturmuştur. Diğer ülkelerden Cezayir toplam ithal edilen doğal gazın %9'unu, Katar %6'sını ve Nijerya ise %5'ini meydana getirmiştir (TPAO, 2019).

Türkiye, doğal gazın talep fazlası ihracatında ise, 2018 yılında 2017 yılına göre %7 artışla toplamda 685 milyon m³'lük doğal gaz ihracatı gerçekleştirmiştir. 2011 yılına göre bu ihracat %6 daha düşük seyretmiştir (Tablo 37). Türkiye, petrolde olduğu gibi doğal gaz da açık veren bir ülkedir. Tablo 37'ye bakıldığında bu durum açıkça görülmektedir. Buna göre Türkiye, 2018 yılında toplam doğal gaz ithalatına yaklaşık 2 milyar \$ öderken doğal gaz ihracatından da 92 milyon \$ gelir elde etmiş ihracat-ithalat dengesine göre 1,8 milyar \$ açık vermiştir. Bu açık, 2011 yılına göre %34 daha düşük olsa da 2015 yılı ile birlikte artış içerisine girmiştir. Bu dönem içerisinde Türkiye'nin doğal gaz ithalatına ödediği döviz, toplam enerji ithalatına ödediği dövizin %10 ila %15'ini oluşturmuştur. Aynı şekilde Türkiye'nin doğal gaz ithalatına ödediği dövizin, toplam ürün ithalatına ödediği döviz içerisindeki payı ise %1'ler seviyelerinde gerçekleşmiştir.

Tablo 37: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Doğal Gaz İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri

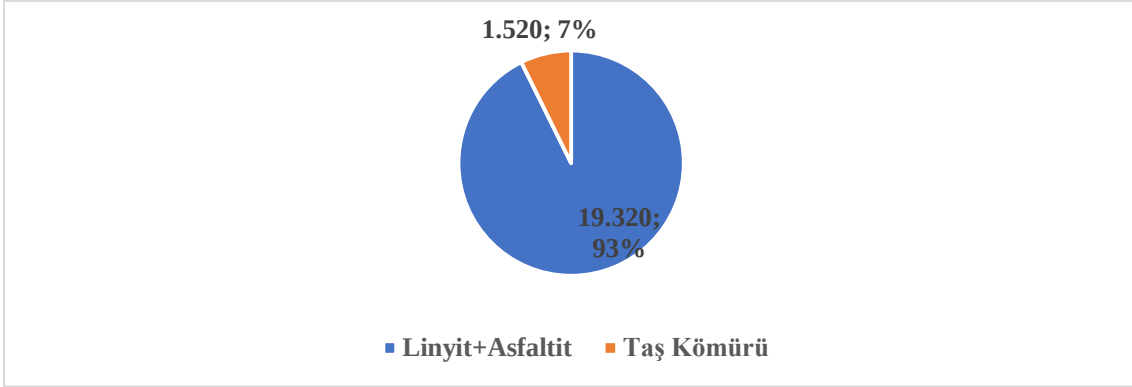
Yıllar	Toplam Doğal Gaz İthalatı (Milyon \$)	Toplam Doğal Gaz İhracatı (Bin \$)	Toplam Doğal Gaz İthalatı Giderlerinin Toplam Enerji İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)	Toplam Doğal Gaz İthalatı Giderlerinin Toplam Ürün İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)
2011	2.973	229.650	15	1,23
2012	2.945	315.917	14	1,24
2013	2.734	266.888	14	1,08
2014	2.677	183.582	13	1,1
2015	1.454	104.657	10	0,7
2016	1.217	81.479	10	0,6
2017	1.647	132.693	10	0,7
2018	1.916	92.261	10	0,8

Kaynak: UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.1.3. Kömür

Kömür Rezervleri

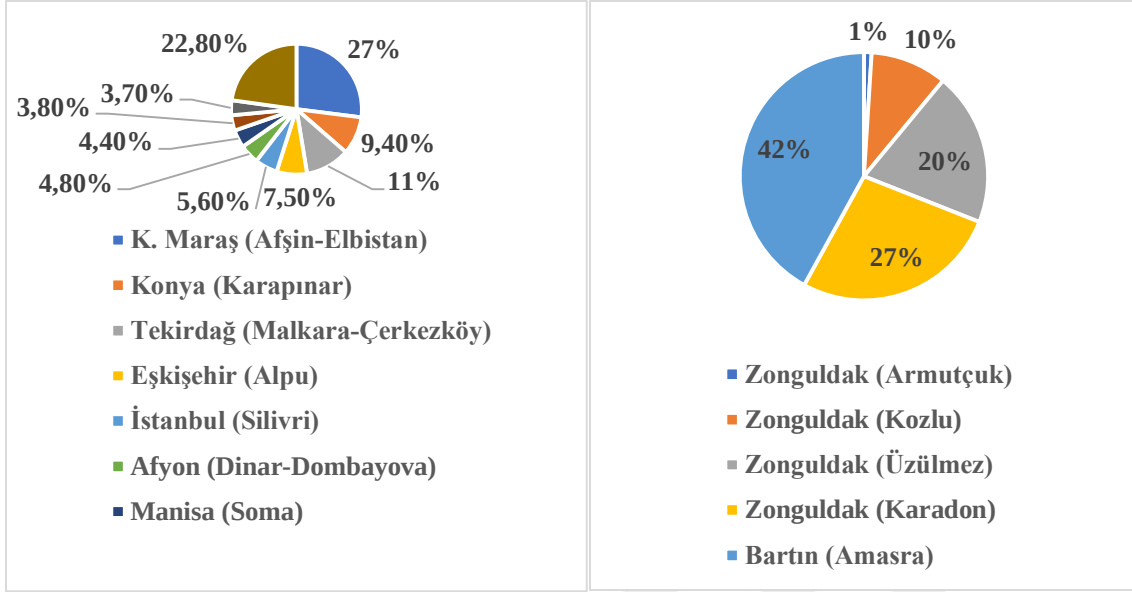
Türkiye'nin toplam kömür rezervleri antrasit yani taş kömürü ve linyitten oluşmaktadır. Türkiye, mevcut linyit rezervleri bakımından dünya genelinde orta klasmanda yer alırken, taş kömürü rezervinde ise alt klasmanda bulunmaktadır. Buna göre Türkiye'de bulunan toplam linyit rezervleri küresel toplam linyit rezervlerinin %8'ini, taşkömürü rezervleri ise %2'sini oluşturmaktadır (TKİ, 2019). Türkiye'de 2018 yılı itibariyle toplamda 2,8 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin büyük bir kısmı %93'ü linyit rezervlerinden meydana gelirken %7'si ise taş kömürü rezervlerinden meydana gelmiştir (Grafik 50). Türkiye'nin toplam kömür rezervlerini ömrü ise yaklaşık 140 yıldır (BP, 2019).



Grafik 50: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'nin Toplam Kömür Rezervi (Milyon Ton)

Kaynak: TKİ, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de bulunan mevcut kömür rezervlerinden taş kömürü rezervleri, Zonguldak ve çevresinde yer alırken linyit rezervleri 25 farklı şehirde yer almaktadır (MTA, 5 Ekim 2020). Grafik 51’de Türkiye’de bulunan taş kömürü ve linyit rezervlerinin en yoğun olduğu yerler verilmektedir. Buna göre Türkiye’nin toplam linyit rezervlerinin yaklaşık %50’si K. Maraş-Afşin-Elbistan, Tekirdağ-Makara-Çerkezköy ve Konya-Karapınar’da yer alırken geriye kalan toplam linyit rezervlerinin %7,5’i Eskişehir-Alpullu’da, %5,6’sı İstanbul-Silivri’de, %4,8’i Afyon- Dinar-Dambayova’da, %8’i Manisa-Soma ve Muğla-Milas’ta, %3,7’si Ankara-Beypazarı’nda ve 23’ü de diğer yerlerde yer almaktadır. Toplam taş kömürü rezervlerin ise %58’i Zonguldak’ta %42’si de Bartın-Amasra’da bulunmaktadır. Zonguldak’ta en fazla taş kömürü rezervleri ise Üzülmüş’de bulunmaktadır.



Grafik 51: Türkiye’de Linyit (Solda) ve Taş Kömürü Rezervlerini En Yoğun Bulunduğu Yerler
Kaynak: MTA, 5 Ekim 2020; TTK, 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömür Üretimi ve Talebi

Türkiye’de kömür üretimi iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan birinci açık ocak madenciliği diğeri ise yer altı madenciliğidir. Buna göre Türkiye’de satılabilir durumda olarak üretilmiş olan toplam kömürün 2018 yılı itibariyle %66’sı açık ocak %34’ü yer altı madenciliğinden üretilmiştir (TKİ, 2019).

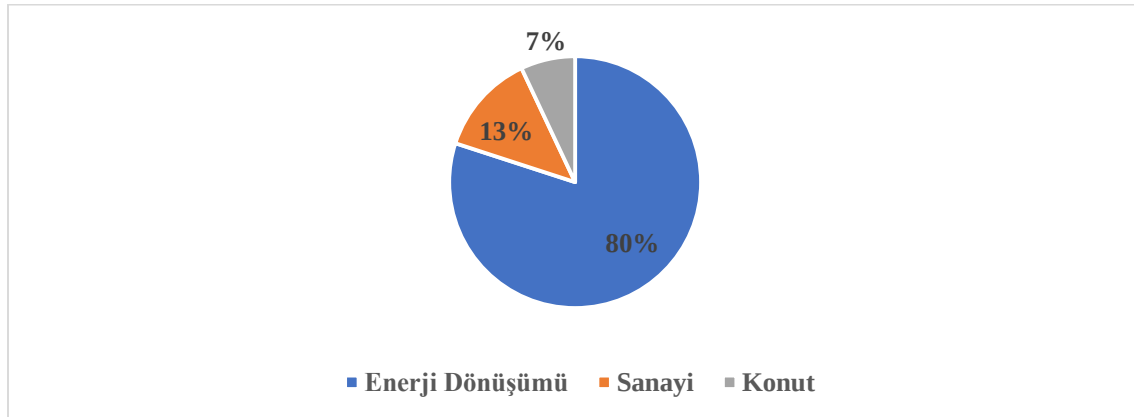
Ancak Türkiye’de mevcut koşullar itibariyle üretilen kömür, talebi karşılar nitelikte değildir. Bu durum Tablo 38’deki Türkiye’nin toplam kömür üretim ve talep verileri incelendiğinde açıkça görülmektedir. Buna göre Türkiye’nin 2011 yılında 76 milyon tonluk toplam kömür üretimine karşılık 101 milyon tonluk toplam kömür talebi, 2015 yılında 58 milyon ton toplam kömür üretimine karşılık 93 milyon ton toplam kömür talebi ve 2018 yılında da 84 milyon ton toplam kömür üretimine karşılık 123 milyon tonluk toplam kömür talebinin olduğu görülmektedir. Ayrıca üretim ve talep arasında meydana gelen fark enerji açığına da neden olmaktadır. Türkiye’de toplam kömür talebinin artışına bağlı olarak enerji açığı 2011 yılında 25 milyon tondan 2018 yılına kadar 39 milyon tona çıkarak toplamda %55 oranında artış göstermiştir.

Tablo 38: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Kömür Üretimleri ve Tüketimleri

Yıllar	Toplam Kömür Üretimi (Bin Ton)	Toplam Kömür Talebi (Bin Ton)
2011	76.000	101.166
2012	71.400	100.064
2013	60.400	83.438
2014	65.200	97.284
2015	58.400	93.161
2016	64.240	110.374
2017	74.100	113.813
2018	83.930	122.954

Kaynak: : MTA, Eylül 2020; TKİ, 2013; TKİ, 2014; TKİ, 2015; TKİ, 2016; TKİ, 2017; TKİ, 2018; TKİ, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de talep edilen kömürün büyük bir çoğunluğu iç tüketimde kullanılmaktadır. Buna göre Türkiye’de 2018 yılında talep edilen yaklaşık 123 milyon tonluk kömürün %1’i yerli (1 milyon ton), %32’si ithal (39 milyon ton) ve %67’si de linyit ve asfaltit (82 milyon ton) olmak üzere toplamda 122 milyon tonu iç tüketimde kullanılmıştır (TKİ, 2019). İç tüketimde kullanılan toplam 122 milyon ton kömürün ise büyük bir kısmı %80’ini enerji dönüşüm sektöründe elektrik üretimi amacıyla %13’ü sanayi sektöründe girdi (kok fabrikaları ve demir-çelik sanayisi) ve ısınma amaçlı olarak ve %7’si ise konut sektörleri tarafından yine ısınma amaçlı olarak tüketilmiştir (Grafik 52). Ayrıca bu yıl içerisinde taş kömürünün %59’u elektrik üretimi, %20’si kok fabrikaları ve demir-çelik sanayisinde ve %21’i de konut ve diğer sektörlerde kullanılırken (TTK, 2020), linyitin ise yine bu yıl içerisinde %74’ü elektrik üretim amaçlı olarak enerji dönüşüm sektöründe %5’ sanayi sektöründe ve %4’ü de konut sektöründe kullanılmıştır (TKİ, 2019).

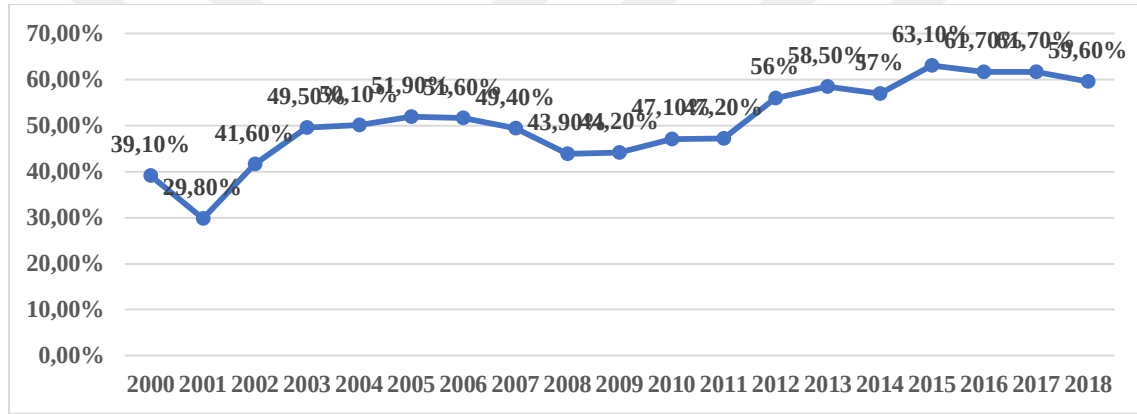


Grafik 52: 2018 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Kömür Tüketiminin Sektörel Dağılımları

Kaynak: TKİ, 2019’Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Kömür Ticareti

Türkiye, tıpkı diğer fosil enerji kaynaklarında olduğu gibi kömür de de var olan negatif yönlü üretim-talep dengesi nedeniyle kömür açığı veren bu sebepten dolayı da kömür ithalatına bağımlı bir ülkedir. Türkiye’nin kömür ithalatına olan bağımlılığı petrol ve doğal gaz kadar olmasa da yine önemli derecelerde kendisini gösterebilmektedir. Grafik 53’te Türkiye’nin kömür ithalatına olan bağımlılığına bakıldığında 2015 yılından sonra Türkiye’nin kömür ithalatına olan bağımlılığında azalma meydana gelse de 2018 yılından geriye dönük 18 yıl içerisinde toplamda arttığı görülmektedir.



Grafik 53: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Kömür İthalatına Olan Bağımlılığı

Kaynak: EUROSTAT, 26 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’nin kömür ithalatının büyük bir bölümü taş kömürü ithalatından oluşmaktadır. Türkiye’nin toplam kömür ithalatının 2011 ve 2015 yılında %98’i, 2017 yılında %95’i ve 2018 yılında %97’si taş kömürü ithalatından meydana gelmiştir. Bu bakımdan Türkiye’nin kömür ithalatına olan bağımlılığının artması özellikle de taş kömürü ithalatının toplam kömür ithalatının büyük bir bölümünü oluşturması nedeniyle toplam taş kömürünün yaklaşık %80’ini enerji üretiminde (%59’u elektrik üretimi %21’i ısınma) kullanan Türkiye açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Türkiye, taş kömürü dışında turba, bitümlü ve koklaşabilir kömür ithalatında da bulunabilmektedir. Buna göre Türkiye, 2018 yılında 68 bin ton turba, 811 bin ton koklaşabilir ve 5 bin ton bitümlü kömür ithalatında bulunmuştur (MTA, Eylül 2020).

Talep fazlası kömür ihracatında ise Türkiye, 2018 yılında toplamda 134 bin ton kömür ihracatı gerçekleştirmiştir. Bu değer, bir önceki yıla göre %19, 2016 yılına göre %82 daha fazla olarak meydana gelmiştir. 2011-2018 arası dönemde ise 2 kattan fazla artış göstermiştir (Tablo 39).

Tablo 39: 2011-2020 Arası Dönemde Türkiye'nin Kömür İthalatı ve İhracatı

Yıllar	Toplam Kömür İthalatı (Bin Ton)	Toplam Kömür İhracatı (Bin Ton)
2011	24.559	66
2012	28.855	64
2013	26.599	38
2014	30.362	84
2015	34.629	161
2016	38.897	74
2017	40.426	113
2018	39.213	134

Kaynak: MTA, Eylül 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'nin kömür ithalatını gerçekleştirdiği ülkelere bakıldığında da 2018 yılında Türkiye'nin yapmış olduğu toplam kömür ithalatının %87'sini Kolombiya (%36,4), Rusya (%36,2) ve ABD (%14) gibi ülkelere gerçekleştirmiştir. Bu yıl içerisinde Kolombiya'dan toplam 14,2 milyon ton, Rusya'dan 14,1 milyon ton ve ABD'den 5,4 milyon ton kömür ithalatında bulunulmuştur (TKİ, 2019). Bu yıl içerisinde Rusya'dan ithal edilen toplam 14,1 milyon tonluk kömür ithalatının %31'i ve yine ABD'den ithal edilen toplam 5,4 milyon tonluk kömür ithalatının %7'si taş kömürü ithalatından oluşmuştur (TTK, 2020).

Türkiye'de toplam kömür ithalatına ödenen dövize bakıldığında ise 2018 yılında 2017 yılına göre %6 artarak 4,6 milyar \$, kömür ihracatına bakıldığında da %62 artarak 21 milyon \$ olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte Türkiye'de bir enerji kaynağı olarak kömür, toplam enerji ithalatı içerisinde petrolden sonra en yüksek pay alan ikinci enerji kaynağı konumundadır. Özellikle 2018 ve geriye dönük 3 yıla bakıldığında Türkiye'de kömür ithalatına ödenen dövizin toplam enerji ithalatının %21 ila %27'sini oluşturduğu görülmektedir. Yine bu dönem içerisinde Türkiye'de yapılmış olan toplam kömür ithalatı, toplam ürün ithalatının %1,5 ila %2'sini temsil eder durumdadır (Tablo 40).

Tablo 40: 2011-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Kömür İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri

Yıllar	Toplam Kömür İthalatı (Milyon \$)	Toplam Kömür İhracatı (Milyon \$)	Toplam Kömür İthalatı Giderlerinin Toplam Enerji İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)	Toplam Kömür İthalatı Giderlerinin Toplam Ürün İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)
2011	1.418	6	7	0,58
2012	1.265	7	6	0,53
2013	1.052	6	5	0,41
2014	919	10	5	0,37
2015	3.086	15	21	1,4
2016	2.749	7	23	1,3
2017	4.389	13	27	1,8
2018	4.660	21	23	2

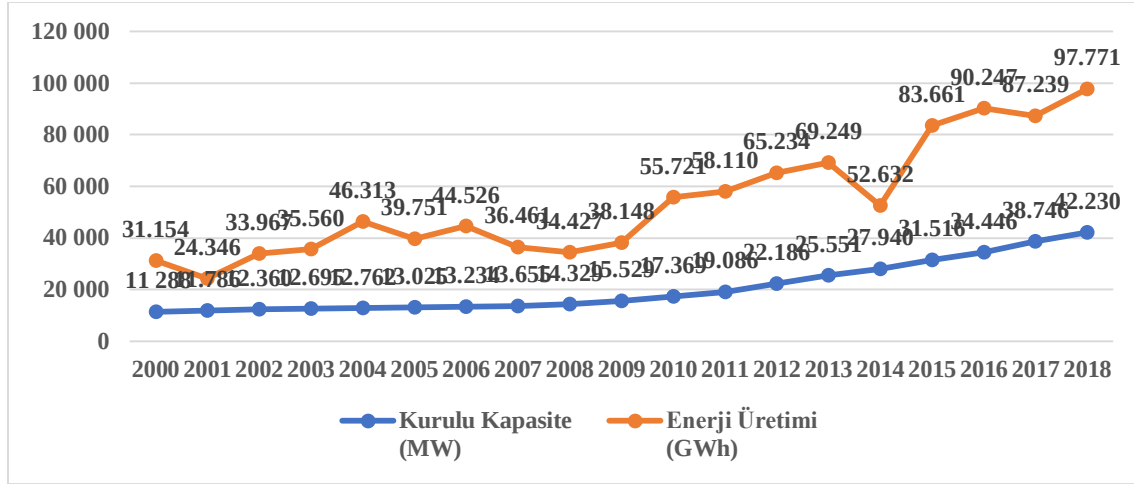
Kaynak: MTA, Eylül 2020; UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve biyoenerji) genel olarak elektrik üretimi ve ısı sağlama amaçlı olarak kullanılabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu denli kullanımları özellikle de elektrik üretiminde kullanılabiliyor olması tüm dünya’da olduğu gibi Türkiye’de de artan enerji ihtiyacı ve bu enerji ihtiyacının yerli, emisyonsuz veya düşük emisyonlu kaynaklardan karşılamaya yönelik olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha fazla artmaktadır. Bu bakımdan Türkiye, yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik olarak üretim kapasitelerini sürekli olarak geliştirmeyi bu sayede de yenilenebilir enerji üretimlerini arttırmayı hedeflemektedir.

Bu göre Türkiye, yenilenebilir enerji teknolojilerine dayalı yapmış ve halen yapmaktan olduğu çalışmalar sayesinde yenilenebilir enerjiye dayalı üretim kapasitelerini yaklaşık 4 kat buna bağlı olarak da yenilenebilir enerji üretimlerini 3 kat arttırmayı başarabilmiştir. Bu bakımdan Türkiye, 2000 yılında 11 GW olan yenilenebilir enerji teknolojilerine dayalı toplam kurulu kapasitesini 2018 yılına kadar geçen süre içerisinde 42 GW’a, yenilenebilir enerji üretimlerini de 31 TWh’den yaklaşık 98 TWh’e yükseltmiştir (Grafik 54).

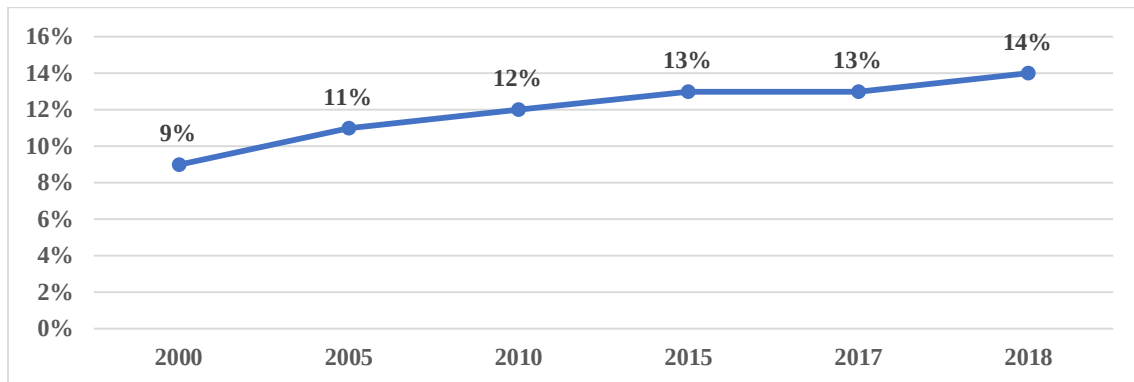
Ancak Türkiye’de yenilenebilir enerji kapasiteleri sürekli artmasına rağmen yenilenebilir enerji üretimleri dalgalı seyirler izlemiştir. Bunun nedeni ise, meteorolojik etkilere bağlı olarak gerçekleşmiştir. Bu sebepten dolayı Türkiye’de özellikle de 2014 yılındaki yenilenebilir enerji üretimi, aşırı kuraklığın etkisine bağlı olarak 2013 yılına kıyasla %24, 2015 yılına kıyasla %59 oranında azalma göstermiştir (Koç - Kaya, 2015).



Grafik 54: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Kaynak: IRENA, 2 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de yenilenebilir enerji kapasitelerinde ve dolayısıyla yenilenebilir üretimlerinde meydana gelen artışlar enerji tüketim portföyünü de değişikliğe neden olmuştur. Bu durum, Türkiye’nin 2000 yılında %9 olan yenilenebilir enerji tüketimlerinin toplam birincil enerji tüketimi içerisindeki payının 2018 yılında % 14’e kadar çıkmasına vesile olmuştur (Grafik 55).



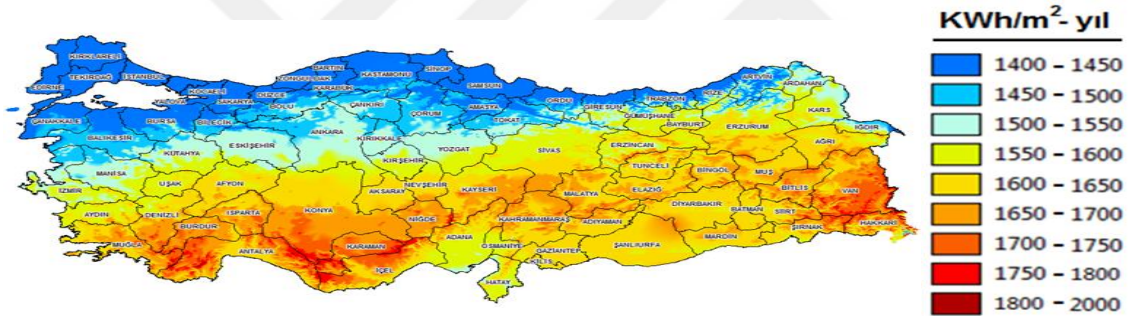
Grafik 55: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Tüketimlerinin Toplam Birincil Enerji Tüketimi İçerisindeki Payları

Kaynak: BP, 2019; BP, 25 Eylül 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi

Güneş Enerjisi

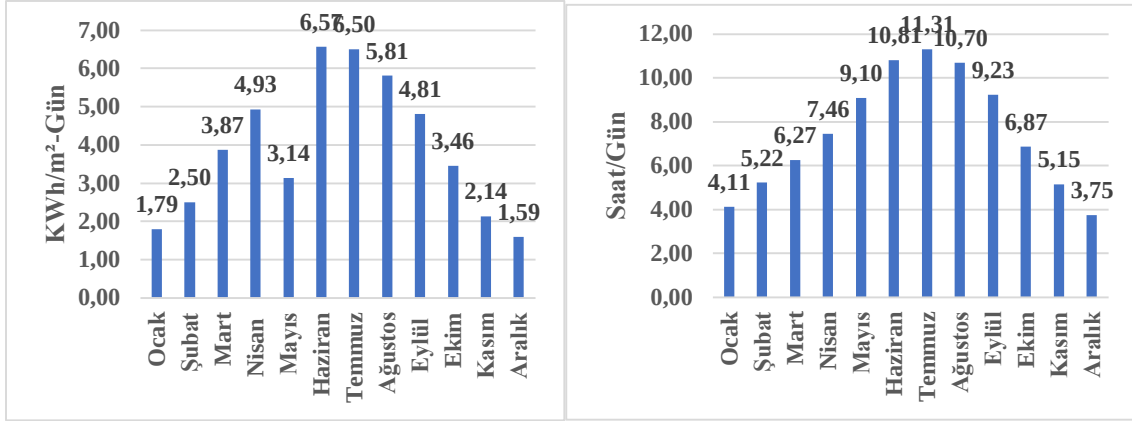
Türkiye, matematiksel konum olarak orta kuşakta yer alması nedeniyle güneş enerji potansiyeli yüksek olan bir ülkedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayımlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, Türkiye, yıllık bazda toplamda 2.741 saat güneşlenme süresine ve yine yıllık bazda toplamda 1.527 KWh/m²'lik güneş ışınlam değerlerine sahiptir (ETKB, 10 Ekim 2020). Bölgesel bazda ise, Türkiye'nin toplam güneş enerjisi radyasyonu (ışınlamı) haritasına bakıldığında kuzey bölgeleri hariç geriye kalan bölgeleri güneş ışınlam değerleri bakımından ortalamanın üzerinde seyir izlediği görülmektedir (Şekil 10).



Şekil 10: Türkiye'nin Toplam Güneş Radyasyonu (Işınım) Haritası

Kaynak: EİGM, 10 Ekim 2020.

Aylık bazda ise Türkiye güneş enerjisinin en aktif olduğu yaz aylarında (haziran, temmuz ve ağustos) toplamda 566 KWh/m²'lik güneş enerjisi ışınlam değerine ve yine toplamda 985 saatlik güneşlenme süresine sahiptir (Grafik 56).



Grafik 56: Türkiye'nin Aylar İtibariyle Güneş Enerjisi Radyasyon (Işınım) Değerleri (Solda) ve Güneşlenme Süreleri (Sağda)

Kaynak: EİGM, 10 Ekim 2020.

Türkiye’de güneş enerji sistemleri (güneş pilleri), elektrik üretimi ve ısınma amaçlı olarak kullanılabilmektedir. Bu bağlamda ilerleyen dönemde güneş pili teknolojilerinde meydana gelecek olan maliyet düşüşleri büyük bir bölümünün güneş ışıınım değerini ortalamaların üzerinde alan Türkiye’nin güneş enerji teknolojilerine bağlı enerji üretimlerinin de artmasına neden olacaktır.

Türkiye’nin 2002-2018 arası dönemde güneş enerji sistemlerinin (güneş pilleri) görünümüne bakıldığında bu 16 yıllık süre içerisinde küresel çapta güneş pili teknolojilerinde meydana gelen maliyet düşüşleri ve buna bağlı olarak da Türkiye’nin alternatif enerji kaynaklarına entegre olma çabaları ve buna bağlı çalışmalar neticesinde güneş pillerine olan yönelimi ciddi derece artmıştır. Buna göre, 2002 yılında 0,6 MW kurulu kapasiteye sahip Türkiye’nin bu kapasiteyle 0,9 GWh’lik enerji (elektrik) üretimi gerçekleştirip yenilenebilir enerjinin %0,002’sini oluştururken 2017 yılında kurulu kapasitesini 3,4 GW, enerji üretimini de yaklaşık 3 TWh’e yükseltip yenilenebilir enerji üretimi içerisindeki payını %3’e ve 2018 yılında da 2017 yılında kıyasla kurulu kapasitesini %48 ve enerji üretimini % 170 artırarak yenilenebilir enerji üretimi içerisindeki payını %8’e çıkarmayı başarabilmiştir (Tablo 41).

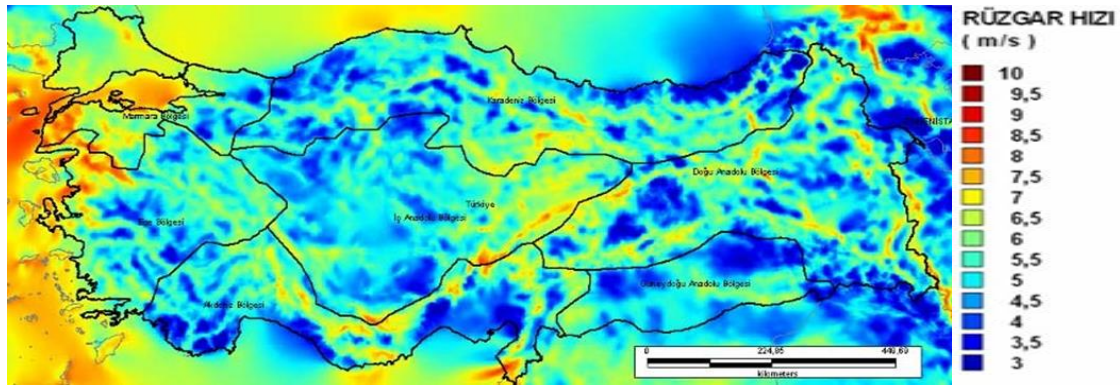
Tablo 41: 2002-2018 Arası Dönemde Türkiye’deki Güneş Enerji Sistemlerinin (Güneş Pillerinin) Görünümleri

Yıllar	Kurulu Kapasite (MW)	Enerji Üretimi (GWh)	Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji İçerisindeki Payı (%)
2002	0,6	0,9	0,002
2008	3,7	5,5	0,01
2010	5,7	8,4	0,01
2015	249	194	0,2
2017	3.420	2.899	3
2018	5.062	7.800	8

Kaynak: IRENA, 2 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Rüzgar Enerjisi

Türkiye’de rüzgar enerjisi ve buna bağlı olarak da rüzgar enerji teknolojileri (rüzgar türbinleri) elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Türkiye, güneş enerjisinde olduğu gibi rüzgar enerjisinde de potansiyeli yüksek olan bir ülkedir. Türkiye’de rüzgar türbinleri yerden 50 m yükseklikte ve 7,5 m/s’nin üzerindeki rüzgar şiddetine sahip alanlarda kurulabilmektedir (ETKB, 10 Ekim 2020). Bu bakımdan Türkiye’nin kıyı kesimleri (Marmara, Ege, Batı Karadeniz, Orta ve Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu’nun kıyısı) ve bazı iç kesimleri (İç Anadolu’nun doğusu ve Akdeniz) rüzgar esme şiddetinin yüksek olduğu dolayısıyla da rüzgar enerji potansiyelinin yüksek olduğu yerlerdir (Şekil 11).



Şekil 11: Türkiye’nin Rüzgar Gücü Haritası

Kaynak: Çalışkan, 2011.

TÜREB’in (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği) 2019 yılı raporuna göre Türkiye’de hazır halde toplamda 3.155 adet, işletme halinde 183 adet ve inşa halinde 17 adet rüzgar türbini bulunmaktadır. Bu kurulu türbinlerin % 38’i Ege’de, % 34’ ü Marmara’da, % 13’ü

Akdeniz’de, %10’u İç Anadolu’da, %4’ü Karadeniz’de, %1’i G. Doğu Anadolu’da ve %0,15 ise Doğu Anadolu’da bulunmaktadır (TÜREB, 2019). Türkiye’nin toplam rüzgar enerji potansiyelinin ise 38 GW’ı karada ve 10 GW’ı denizde olmak üzere toplamda 48 GW olduğu tahmin edilmektedir (Çalışkan, 2011). Türkiye bu potansiyelin 2018 yılına bakıldığında sadece %15’ini kullanabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında Türkiye, güneş enerjisinden sonra sahip olduğu rüzgar enerji potansiyelini de tam olarak kullanamadığı görülmektedir.

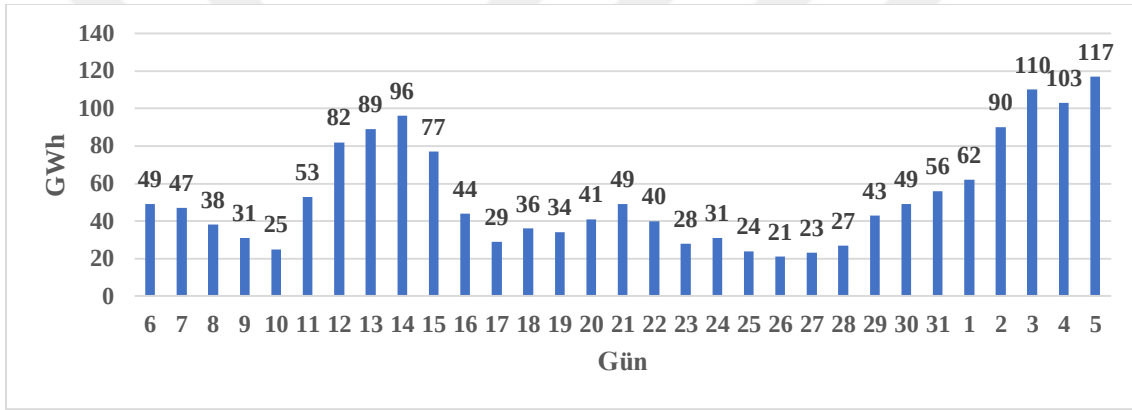
Ancak Türkiye, rüzgar enerji potansiyelini tam olarak kullanamasa da 2005 yılından sonra rüzgar enerji teknolojilerinde (rüzgar türbinleri) ciddi atılımlar gerçekleştirmiştir. Buna göre Türkiye’nin 2000-2005 arası dönemde rüzgar türbini kurulu gücü 19 MW’ dan 21 MW’a çıkarak sadece 1,1 kat artarken 2005-2010 arası süreçte yaklaşık 63 kat artarak 21 MW’dan 1.320 MW’a yükselmiştir. Bu artış neticesinde de toplam enerji (elektrik) üretimi de 59 GWh’den 3 TWh’e çıkarak 49 kat artmış yenilenebilir enerji üretimi içerisinde %8 paya sahip olmuştur. Bu artış 2010 yılını takip eden süreçte devam ederek 2018 yılında 7 GW ve 20 TWh’e ulaşmıştır. Bu artışlar neticesinde de rüzgar türbinleri aracılığıyla üretilen enerjinin toplam yenilenebilir enerji üretimleri içerisindeki payı %17’ye yükselmiştir (Tablo 42). 2019 yılında da rüzgar enerji teknolojilerine dayalı elektrik üretiminin toplam elektrik ihtiyacının %7’sini karşılayabilir duruma gelmiştir (TÜREB, 2019).

Tablo 42: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’deki Rüzgar Enerji Sistemlerinin (Rüzgar Türbinlerinin) Görünümleri

Yıllar	Kurulu Kapasite (MW)	Enerji Üretimi (GWh)	Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji İçerisindeki Payı (%)
2000	19	33	0,2
2005	21	59	0,2
2010	1.320	2.916	8
2015	4.718	11.652	14
2017	6.872	17.904	17
2018	7.369	19.949	17

Kaynak: : TÜREB, 2019; IRENA, 2 Haziran 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunların yanında rüzgar enerji teknolojileri, elektrik tüketiminin %7'sini ve yenilenebilir enerji üretimi içerisinde %17 'sini oluşturmalarına rağmen diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da olduğu bu meteorolojik kökenli olduğundan her zaman istenilen seviyede verim sağlanamamaktadır. Grafik 57'de 2018 yılının Temmuz ve Ağustos aylarını kapsayan dönem içerisinde günlük bazda elektrik üretim verilerine bakıldığında açıkça görülmektedir. Bu verilere bakıldığında bu döneme içerisinde rüzgar tribünlerinden üretilen elektriğin günlük bazda rüzgar esme şiddetine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. buna göre Türkiye'de Temmuz-Ağustos ayları içerisinde 26 Temmuz'da elektrik üretimi 21 GWh ile en düşük seviyeye inmişken 5 Ağustos tarihinde 117 GWh ile bu süreçte en yüksek seviyeye çıkmıştır.



Grafik 57: Türkiye’de 2018 Yılı’nın Temmuz ve Ağustos Ayları İçerisindeki Günlük Bazda Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilen Enerji Üretimleri

Kaynak: Enerji Atlası, 11 Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji

Biyoenerji

Biyoenerjiyi oluşturan kaynaklardan yani bitkisel, hayvansal ve evsel atıklardan, çeşitli orman ürünlerinden, otlardan ve deniz ürünlerinden (algler, yosunlar vb.) fosil enerjiye alternatif olabilecek katı biyoyakıt, biyogaz, biyodizel ve biyoetanol gibi çeşitli ürünler üretilmekte ve bu sayede enerji tedarikinin bir bölümü karşılanabilmektedir.

Türkiye ise bu bakımdan yani biyoenerji enerjiyi oluşturan kaynaklar açısından yüksek potansiyele sahiptir. Türkiye’de halihazırda 141 milyon bitki ve 423 milyon hayvan topluluğu ve 23 milyon hektarlık ormanlık alan bulunmaktadır. Bunların tümünden yılda

292 milyon ton atık ve bu atıkların karşılığında da 34 milyon ton eşdeğeri petrol dolaylarında enerji elde edilebilecek potansiyel mevcuttur. Bu potansiyelde ise, hayvan toplulukları ilk sırada yer almaktadır. Türkiye’de halihazırda bulunana hayvan topluluklarından yılda 194 milyon ton atık ve bunun karşılığında 25 milyon ton eşdeğeri petrol enerji elde edilebilme durumu mevcuttur. Bu, elde edilebilecek toplam potansiyel enerjinin %74’ünü oluşturmaktadır. Hayvan topluluklarından sonra Türkiye’de en yüksek potansiyele sahip topluluk bitki topluluklarıdır. Türkiye’de toplam bitki topluluğundan yılda 62 milyon ton atık ve 4 milyon ton eşdeğeri petrol enerji potansiyeli mevcuttur. Bu, toplam potansiyel enerjinin %12’sini temsil etmektedir. Bunların dışında çeşitli orman ürünlerinden ve evsel atıklardan elde edilebilecek toplam enerji potansiyeli ise 4 milyon ton eşdeğeri petrolü bulmaktadır (Tablo 43). Buna göre Türkiye’nin toplam biyoenerji potansiyeli, 2018 yılı itibariyle toplam birincil enerji tüketiminin %23 karşılayabilecek düzeydedir (bk. Grafik 41).

Tablo 43: Türkiye’deki Çeşitli Biyoenerji Kaynaklarından Elde Edilen Atıklar ve Bunların Potansiyel Enerji Değerleri

Tür	Varlık (Adet-Hektar)	Atık (Ton/yıl)	Potansiyel Enerji Değeri (Ton Eşdeğeri Petrol/yıl)
Bitki	141.366.175	62.206.754	4.385.371
Hayvan	422.832.374	193.878.079	25.384.268
Orman	22.621.935	3.914.904	3.373.011
Evsel Atık	-	32.170.975	859.899

Kaynak: EİGM, 11 Ekim 2020; OGM, Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Ancak Türkiye, yıllar itibariyle biyoenerjiye dayalı kapasite ve üretimlerini arttırsa da mevcut enerji potansiyelini kullanamamaktadır. Buna göre Türkiye’de 2018 yılı itibariyle 960 GW’ı katı biyoyakıt ve yenilenebilir atık ve 2.159 GW’ı da biyogaz yakıtı olmak üzere toplamda 3.119 GW’lık (268 milyon ton eşdeğeri petrol) biyoenerji kaynaklı üretim gerçekleşmiştir. Bu üretim, mevcut potansiyel üretim ile kıyaslandığında sadece %0,07’sine denk gelmektedir. Fakat Türkiye’de yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak biyoenerji gelişim içerisinde. Buna göre, Türkiye’nin 2018 yılından geriye dönük 8 yıl içerisinde biyoenerji kapasitesi toplamda 4 kat, biyoenerji üretimi de toplamda 8 kat artarak yenilenebilir enerjinin üretiminin %3’ünü oluşturmuştur (Tablo 44). Bu yıl içerisinde toplam biyoenerji üretimi ise toplam birincil enerji tüketiminin %0,17’sini oluşturmuştur (bk. Grafik 41).

Tablo 44: 2010-2018 Arası Dönemde Türkiye’deki Biyoenerji Kaynaklarının Görünümleri

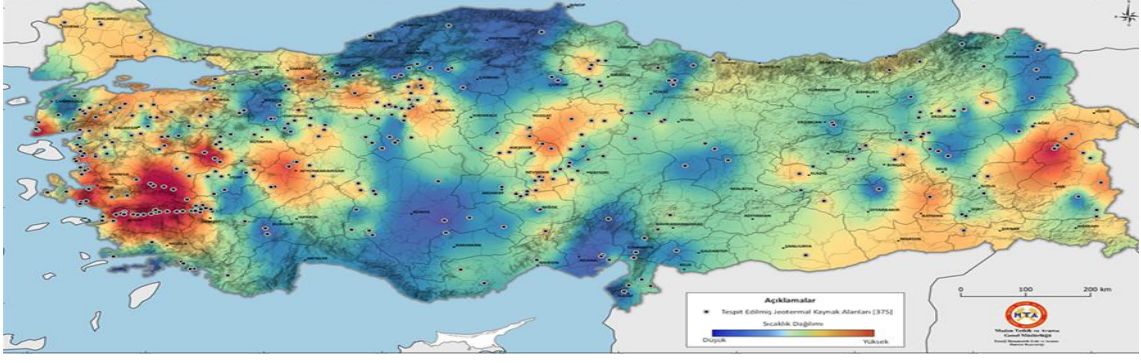
Yıllar	Kati Biyoyakıtlar ve Yen. Atıklar		Biyogaz		Toplam		Toplam Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
	Kapasite (MW)	Üretim (GWh)	Kapasite (MW)	Üretim (GWh)	Kapasite (MW)	Üretim (GWh)	
2010	94	74	71	296	165	370	0,66
2011	20	32	90	326	110	358	0,61
2012	20	66	133	559	153	625	0,95
2013	20	70	162	844	182	914	1,3
2014	20	68	204	1.046	224	1.114	2,1
2015	24	62	253	1.208	277	1.270	1,5
2016	110	148	298	1.559	408	1.707	1,8
2017	166	626	378	1.781	544	2.407	2,7
2018	259	960	440	2.159	699	3.119	3,1

Kaynak: IRENA, 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, volkanizmanın ve fay kaynaklarının aktif olduğu genç arazi yapısına sahip alanlarda yüksek derecede görülebilen bir enerji kaynağıdır. Bu bakımdan BAF (Batı Anadolu Fay Hattı), KAF (Kuzey Anadolu Fay Hattı) ve DAF (Doğu Anadolu Fay Hattı) gibi üç önemli fay hattına ve genç arazi yapısına sahip Türkiye, jeotermal enerji potansiyeli bakımından oldukça zengin bir ülkedir.

Türkiye’de jeotermal enerji sahalarına bakıldığında jeotermal enerji kaynakları bu fay hatlarının geçtiği bölgelerde yoğunluk göstermektedir. Buna göre BAF’ın bulunduğu Ege Bölgesi jeotermal enerji potansiyelinin en yoğun olduğu bölge olurken KAF üzerinde yer alan Marmara, İç Anadolu’nun Kuzey Batısı ve Doğu Anadolu ve DAF’ın üzerinde yer alan Doğu Akdeniz ve Güney Doğu Anadolu’nun batısını kapsayan bölgeler jeotermal enerji kaynakları bakımından potansiyel taşıyan diğer bölgeler olmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12: Türkiye’deki Jeotermal Enerji Sahaları

Kaynak: MTA, 12 Ekim 2020.

Buna göre Türkiye’deki jeotermal enerji potansiyeli bu bölgeler içerisinde Ege’de %78, İç Anadolu’da %9, Marmara’da %7 ve diğer bölgelerle birlikte Doğu Anadolu’da %1 yoğunluğunda yer almak almaktadır. Türkiye’deki jeotermal enerji kaynaklarının tamamına yakını düşük ve orta sıcaklık değerlerinde olup bunların %90’ı ısıtmada, termal turizmde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda %10’u da elektrik üretiminde kullanılmaktadır (MTA, 12 Ekim 2020). Türkiye’nin jeotermal enerji potansiyeli 2019 yılı itibariyle termal ısı olarak yaklaşık 32 GW, elektriksel olarak ise jeotermal ısı potansiyeli 2 GW civarındadır (ETKB, 10 Ekim 2020).

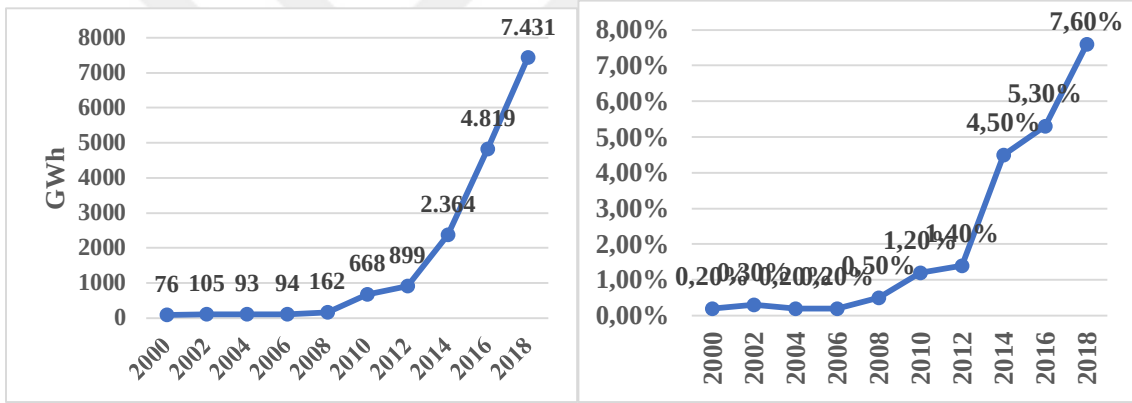
Türkiye, Jeotermal enerji potansiyeli bakımından da kapasitesinin çok altında seyir izlemektedir. Buna göre Türkiye’nin toplam jeotermal enerji gücü ise, 1.515 GW’ı kullanımda, 167 GW’ı kuruluş aşamasında, 60 GW’ı üretim lisansı, 417 GW’ı ön lisansı alınmış halde ve 38 GW’ı da proje aşamasında olmak üzere toplamda 2.197 GW’tır. Bu değer mevcut jeotermal potansiyelinden ısı olarak 14 kat daha düşüktür (Tablo 45).

Tablo 45: Türkiye’de 2019 Yılı İtibariyle Jeotermal Enerji Santrallerinin Görünümü

Santral Durumu	Güç (MW)
Kullanımda	1.515
Kuruluş Aşamasında	167
Üretim Lisansı Alınmış	60
Ön Lisansı Alınmış	417
Proje Aşamasında	38
Toplam	2.197

Kaynak: Enerji Atlası, 12 Ekim 2020.

Türkiye, jeotermal enerji kapasitesini tam olarak kullanamamasına rağmen jeotermal enerji (elektrik) üretimi konusunda önemli mesafe katetmiştir. Türkiye’de jeotermal enerji üretimi, özellikle 2008 yılından sonra ciddi oranda artış göstermiş, 2012 yılından sonra ise derinleşerek devam etmiştir. Buna göre Türkiye’de jeotermal enerjiye dayalı elektrik üretimi 2000-2008 arası dönemde toplamda %113 oranında artarken 2008-2012 arasında toplamda %455 ve 2012-2018 arası dönemde de yine toplamda %727 oranında artış göstermiştir. Tüm bunların neticesinde de Türkiye’de jeotermal enerji üretimi, yenilenebilir enerji (elektrik) üretimi içerisinde 2000 yılında %0,20 olan payını 2018 yılına gelindiğinde %7,6’ya çıkarmıştır (Grafik 58). Ayrıca 2018 yılında üretilen toplam jeotermal enerji değeri toplam birincil enerji tüketiminin %0,42’sini (bk. Grafik 41), toplam elektrik üretiminin de %2’sini karşılayabilmıştır (TEİAŞ, 12 Ekim 2020).



Grafik 58: Türkiye’de 2000-2018 Arası Dönemde Jeotermal Enerjiden Üretilen Toplam Enerji (Elektrik) Üretimleri (Solda) ve Üretilen Enerjilerin Toplam Yenilenebilir Enerji (Elektrik) Üretimi İçerisindeki Payları

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.2.3. Hidro Enerji

Türkiye’de hidro enerji’den (hidrolik), hidroelektrik santralleri vasıtasıyla elektrik üretimi amacıyla yararlanılmaktadır. Bu bakımdan Türkiye’de hidroelektrik santraller, termik santrallerden sonra elektrik üretiminin en fazla gerçekleştirildiği santrallerdir. 2018 yılı itibariyle Türkiye’de birincil kaynaklardan üretilen toplam elektrik üretiminin yaklaşık %20’si bu santraller aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (TEİAŞ, 12 Ekim 2020). Buna ek olarak bu santraller yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin ise en fazla gerçekleştirildiği santraller olmuşlardır. Yine Türkiye’de 2018 yılında yenilenebilir

kaynaklardan üretilmiş olan toplam elektriğin %61'i hidroelektrik santralleri aracılığıyla gerçekleşmiştir (IRENA, 2 Haziran 2020).

Türkiye'nin hidro enerji'ye bağlı hidroelektrik potansiyeli toplamda 433 TWh'dir. Bu potansiyel teknik açıdan 216 TWh ve ekonomik açıdan da 160 TWh'dir (ETKB, 10 Ekim, 2020). Bu toplam hidroelektrik potansiyel Türkiye'nin 2018 yılı itibariyle toplam elektrik ihtiyacından 1,4 kat daha fazladır. Teknik ve ekonomik hidroelektrik potansiyel ise yine 2018 yılı itibariyle Türkiye'nin toplam elektrik ihtiyacının sırasıyla %71'ini ve %53'ünü karşılayabilecek durumdadır. Ancak Türkiye, bu toplam hidroelektrik potansiyelinin 2018 yılında sadece %14'ünü oluşturabilmiştir. Teknik ve ekonomik potansiyelde ise bu oranlar sırasıyla %28 ve %38 olarak gerçekleşmiştir. Bu açıdan bakıldığında Türkiye sahip olduğu hidroelektrik potansiyelini tam olarak kullanamadığı görülmektedir.

Türkiye'de elektrik üretimi amacıyla 2019 yılı itibariyle toplamda 656 adet hidroelektrik santrali bulunmaktadır (Enerji Atlası, 13 Ekim 2020). Bu santrallerin yaklaşık 30 GW değerinde kurulu gücü kullanımda olup 4 GW'ı kuruluş aşamasında, 3 GW'ı üretim ve 4 GW'ı ön lisansı alınmış halde ve 3 GW'ı da proje aşamasındadır (Tablo 46).

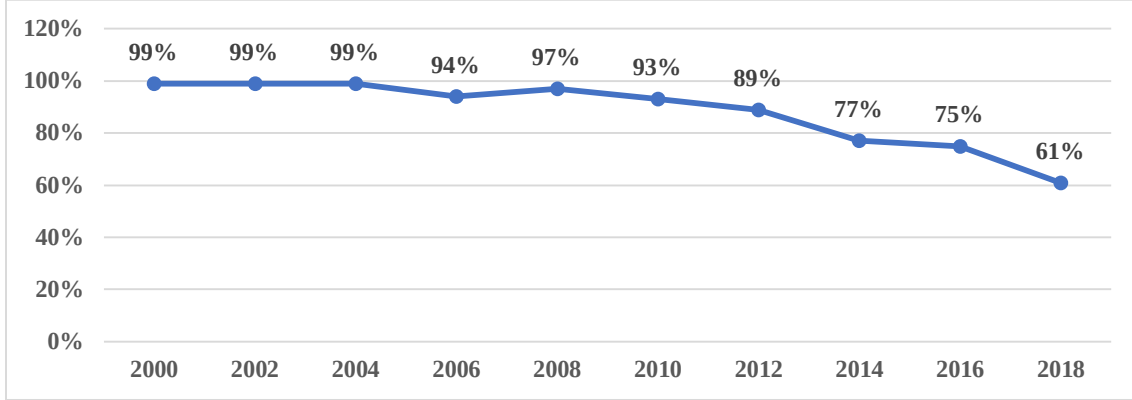
Tablo 46: Türkiye'de 2019 Yılı İtibariyle Hidroelektrik Enerji Santrallerinin Görünümü

Santral Durumu	Kapasite (MW)
Kullanımda	29.765
Kuruluş Aşamasında	4.206
Üretim Lisansı Alınmış	2.831
Ön Lisansı Alınmış	3.890
Proje Aşamasında	2.969
Toplam	43.576

Kaynak: Enerji Atlası, 13 Ekim 2020.

Hidroelektrik üretimlerine bakıldığında ise 2019 yılındaki 30 GW'lık toplam kurulu kapasiteye karşılık yaklaşık 78 TWh'lik elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Üretilen elektrik toplam elektrik tüketiminin %26'sını karşılamıştır (Enerji Atlası, 13 Ekim 2020). Ancak hidroelektrik santrallerinin güneş pili ve rüzgar türbini teknolojilerinde meydana gelen gelişmelere bağlı olarak yenilenebilir elektrik üretimi içerisindeki payları da azalmıştır.

Buna göre, 2000 yılında yenilenebilir elektrik üretiminin %99'u hidroelektrik santrallerinden elde edilirken 2018'de bu oran %61'lere kadar gerilemiştir (Grafik 59).

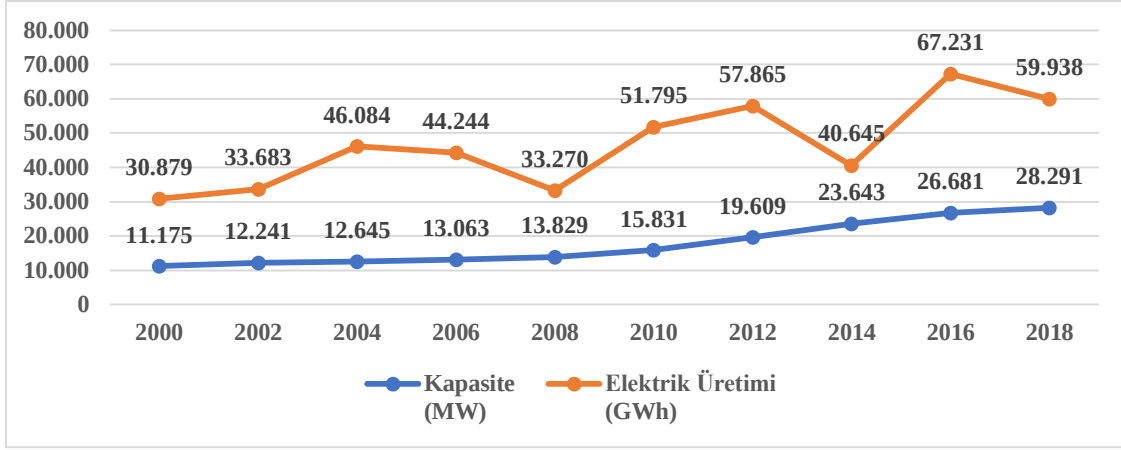


Grafik 59: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Hidroelektrik Üretimlerinin Yenilenebilir Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları

Kaynak: IRENA, 2 Haziran 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidroelektrik santrallerle ilgili bir diğer konu da elektrik üretimlerinin (verimliliklerinin) diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da olduğu gibi meteorolojik olaylara (yağışlara) bağlı oluşudur. Çünkü bu santraller rezervuarında topladığı su ile elektrik üretimini gerçekleştirebilmektedir. Rezervuara gelen su ise akarsular ve çeşitli göl sularından sağlanabilmektedir. Bu bakımdan meteorolojik olaylarda meydana gelen dengesizlikler (yağışın az-çok yağması, kuraklık vb.) akarsular ve çeşitli göl sularındaki su miktarlarını etkileyeceğinden rezervuara gelen su miktarını ve dolayısıyla da hidroelektrik üretimin de etkileyecektir.

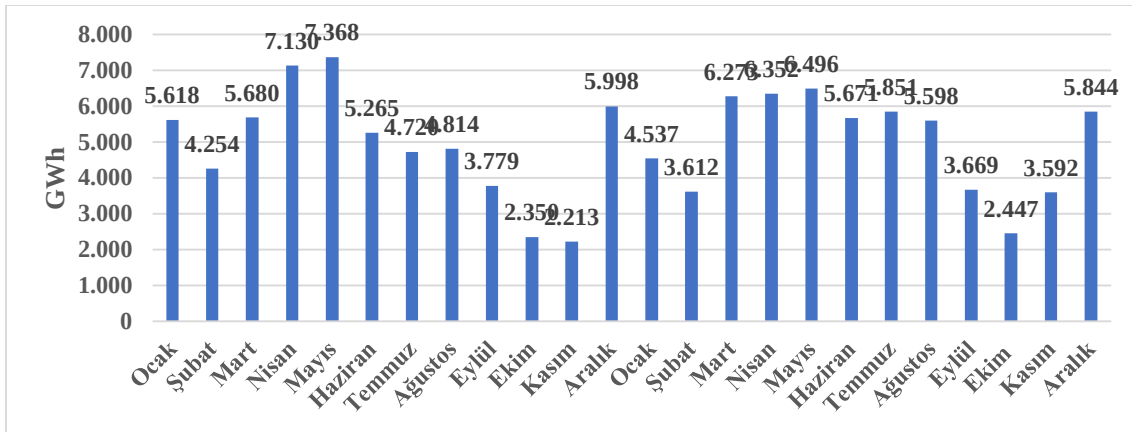
Grafik 60'daki Türkiye'nin yıllar itibariyle hidroelektrik kurulu kapasiteleri ve hidroelektrik üretim verilerine bakıldığında Türkiye'nin yıllar itibariyle hidroelektrik kurulu kapasitelerinin artmasına rağmen hidroelektrik üretimlerinin yağış rejimlerine bağlı olarak yıldan yıla dalgalı seyirler izlediği görülmektedir.



Grafik 60: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Hidroelektrik Kurulu Kapasiteleri ve Hidroelektrik Üretimleri

Kaynak: IRENA, 2 Haziran 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidroelektrik üretim değerlerine aylık bazda bakıldığında bu durum daha iyi anlaşılabilir. Grafik 61'de Türkiye'nin 2017 ve 2018 yıllarına ait aylık bazdaki hidroelektrik üretimlerine bakıldığında hidroelektrik üretimlerin bu yıllar içerisinde ilkbahar aylarında (Mart-Nisan-Mayıs) ve Aralık-Ocak aylarında yağışlara bağlı olarak arttığı son bahar aylarında (Eylül-Ekim-Kasım) ise kuraklığa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Yaz aylarında hidroelektrik elektrik üretimlerinin nispeten yüksek olmasının nedeni özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki kar erimelerine bağlı olarak akarsuların ve göl sularındaki artıştan kaynaklıdır. Bu durum, hidroelektrik santrallerinden verimlilikte sürekliliğin sağlanmasını engellemektedir.



Grafik 61: Türkiye'nin 2017 ve 2018 Yıllarında Aylık Bazdaki Hidroelektrik Üretimleri

Kaynak: Enerji Atlası, 13 Ekim 2020; IRENA, 2 Haziran 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2.3. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, yakın gelecekte fosil enerji kaynaklarının tükenecek olması ve fosil enerjiyi ikame edebilecek yapısı nedeniyle geleceğin enerji kaynaklarından biridir. Bu bakımdan Türkiye, hidrojen enerjisi ve enerji teknolojilerine yönelik yapılan çalışmalarda dünya genelinde arka planda yer alsa da önemli fırsatları elinde bulunduran bir ülkedir. Türkiye, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaptığı atılımlar sayesinde hidrojeni bu kaynaklardan üretebilme potansiyeline sahiptir. Ayrıca dünyanın en büyük bor madeni yataklarına sahip Türkiye'nin bor kaynaklı ürünlerden (sodyum borhidrit) hidrojen üretebilme imkanı da bulunmaktadır.

Bunların yanında Birleşmiş Milletler Endüstriyel Gelişim Organizasyonu (UNIDO) çatısı altında kurulan Uluslararası Hidrojen Enerji Teknoloji Merkezi'nin (ICHET) Türkiye' de (İstanbul'da) kurulmuş olması Türkiye'ye hidrojen enerjisi alanında küresel çapta meydana gelen gelişmeleri yakından takip edebilme imkanı sunmaktadır (Polat - Kılınç, 2007).

Türkiye'de hidrojen enerjisi ve enerji teknolojilerine yönelik çalışmalar prototip olarak Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu–Marmara Araştırma Merkezi Enstitüsü (TÜBİTAK–MAM) ve UNIDO–ICHET desteklemeleriyle kamu-özel kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmektedir.

Hidrojen Enerji Teknolojilerine Yönelik Çalışmalar

Hidrojen Adası Projesi

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), UNIDO ve ICHET tarafından 2011 yılında pilot olarak geliştirilen projede çeşitli yenilenebilir enerji teknolojilerinden (güneş panelleri ve rüzgar türbinleri) üretilen hidrojenin ilk etapta Bozcaada'daki kaymakamlık binasının veya adada bulunan 20 hanenin elektrik ihtiyacının karşılanabilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda proje, 20 KW ve 30 KW enerji kapasitesine sahip güneş paneli ve rüzgar türbini sistemlerinden meydana gelmiştir. Bu proje ile 2011 yılı itibarıyla Bozcaada'daki 20 hanenin elektrik ihtiyacı karşılanabilir duruma gelmiştir (Yeşilbina, 2011).

Yakıt Pili Mikro Kojenerasyon Sistemi Projesi

TÜBİTAK-MAM, İTÜ (İstanbul Teknik Üniversitesi), KOÜ (Kocaeli Üniversitesi) ve Türk Demir Döküm A.Ş. tarafından 2006 yılında prototip geliştirilen projede evsel uygulamalarda ısınma ve elektrik üretimi amaçlı olarak kullanılmak üzere doğalgazdan hidrojen üretimi gerçekleştirilerek 5 KW enerji kapasitesine sahip Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt pili teknolojisiyle elektrik üretimi elde edilmiştir. Proje, 2010 yılında sonlandırılmıştır (Akar vd., 2009).

Hidroenerji (Hidrolik) – Hidrojen Projesi

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) ve İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş. (İGDAŞ) tarafından 2009 gerçekleştirilen bu projede uygun durumda bulunan bir hidroelektrik santralinden üretilecek olan hidrojenin doğalgaz boru hattı sistemine entegrasi amaçlanmıştır (Tutar - Eren, 2011).

Ambarlı Termik Santrali Hidrojen Projesi

EÜAŞ ve İGDAŞ tarafından oluşturulan projede yakıt olarak doğalgaz ile çalışan Ambarlı Termik Santralinden üretilecek olan hidrojenin doğalgaz boru hatlarına nakli hedeflenmiştir. Bu projede üretilen hidrojen gece kullanılmayan elektrikten elde edilmiştir (Polat - Kılınç, 2007).

Biyokütle-Hidrojen Projesi

2008 yılında oluşturulmuş olan bu projede, tatlı sorgun bitkisi kullanılarak hidrojen elde edilmiştir (Polat - Kılınç, 2007).

Seyyar Hidrojen Evi Projesi

Türkiye’de farklı uzmanlık alanlarına sahip yüksek lisans öğrencileri tarafından geliştirilen bu proje, taşınabilir durumda bulunan 15 m²’lik alana sahip konteynırın içerisinde bulunduran ocak, buzdolabı, televizyon ve klima gibi ev aletlerine enerji sağlamaya yönelik olmuştur. Projede, 800 W kapasiteli güneş paneli, 1 KW kapasiteli rüzgar türbini ve 2 KW kapasiteli yakıt pili sistemleri kullanılmıştır (Yenienerji, 15 Ekim 2020).

Hidrojen Yakıt Pili Forklift Projesi

ICHET ve Çumitaş tarafından 2007 yılında başlatılan bu projede, 7 KW enerji kapasitesine sahip bir yakıt pili ve hidrojen tanklarından oluşturulmuş sistem Çumitaş tarafından tedariki sağlanan bir forklifte monte edilerek forkliftin enerji ihtiyacı giderilmiştir. Bu proje, 2009 yılında sonlandırılmıştır (Yenienerji, 15 Ekim 2020).

Hidrojen Yakıt Dolum İstasyonu Projesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) ve ICHET tarafında 2012 yılında hidrojenle çalışan arabaların, teknelerin ve otobüslere yönelik olarak İstanbul'da hidrojen yakıt dolum istasyonu kurulmuştur. Tesis, günde 65 kg hidrojen üretimi ve 100 kg hidrojen depolayabilme kapasitesine sahiptir. Tesisin günlük hidrojenli araç dolum kapasitesi 25 olup 350 bar basınç değerlerine kadar hidrojen dolumu gerçekleştirebilmektedir (Kartal24, 15 Ekim 2020).

Atatürk Havaalanı Hidrojenli Otobüs Projesi

Termomekanik sanayi ve Ticaret A.Ş. (TEMSA) ve TPAO tarafından birlikte geliştirilen bu projede hidrojenle çalışan otobüslerin Atatürk Havaalanı içerisinde kullanılmasına dayanmaktadır (Tutar - Eren, 2011).

Güneş-Hidrojen Projesi

2006 yılında başlatılmış olan bu projede, güneş pili sistemlerinden hidrojen eldesi amaçlanmıştır. Bu proje ile motosiklet gibi küçük yapıları araçlara monte edilecek olan güneş pili ve yakıt pili sistemleriyle sayesinde güneş enerjisinin hidrojene dönüşümü ve aracın hareket ettirilmesi amaçlanmıştır (Tutar - Eren, 2011).

2.4. Nükleer (Fisyon) Enerji

Türkiye, fosil enerji kaynaklarına alternatif oluşturabilecek ve mevcut enerji ihtiyacını gidermeye yönelik projeler kapsamında biri Mersin diğeri de Sinop'a olmak üzere fisyon olayına dayalı nükleer enerji santrallerini hayata geçirmeyi planlamaktadır.

Buna yönelik olarak 2015 yılında Mersin ilçesinde yapımına başlanan Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin VVER tipinde ve her birinin 1200 MW olmak üzere toplamda 4.800

MW elektrik üretim kapasitesine sahip 4 adet reaktörden oluşması beklenmektedir. Santral, Rusya'daki Novovoronezh Nükleer Güç Santrali-2 projesi esas alınarak inşa edilecektir. Santral, yakıt olarak hafif düzeyde zenginleştirilmiş uranyum dioksiti (UO₂) kullanacaktır. Akkuyu Nükleer Güç Santrali, prensip olarak Yap-İşlet-Sahip Ol modeli ile Rusya tarafından yapılacak ve işletme hakkı 15 yıl süreyle Rusya'ya ait olacaktır. Santralin hizmet ömrü 60 yıl olacaktır. Projenin toplam maliyetinin 20 milyar \$'ı bulması beklenmektedir (Akkuyu NGS, 15 Ekim 2020).

Santralin hizmete girmesinin ise 2023 yılını bulacağı tahmin edilmektedir. Toplamda 4 üniteden oluşan Akkuyu Nükleer Enerji Santralinin işleme girmesiyle birlikte yıllık bazda 36 TWh'lik elektrik üretimi hedeflenmektedir. Santralde sağlanacak olan elektrik de Türkiye'nin yıllık elektrik üretiminin %6'sını karşılaması beklenmektedir (Wikipedia, 8 Ağustos 2020).

Sinop'ta kurulması planlanan nükleer güç santralinde ise 2019 yılında inşaat çalışmalarının başlanacağı 2025 yılında da ilk reaktörünün devreye sokulacağı belirtilmektedir. Proje, 2013 yılında Türkiye ile Japonya arasında yapılan anlaşma uyarınca Japonya tarafından Sinop'un Abalı Köyü'nde 10.104.000 m²'lik bir alana inşa edilecektir. Buna göre bu santral, her biri elektriksel güç olarak 1.140 MW kapasiteye sahip toplam 4 adet ATMEA1 Reaktör tipinde basınçlı su reaktöründen oluşacaktır. Santral yakıt olarak, tıpkı Akkuyu Nükleer Santralinde de olduğu gibi hafif düzeyde zenginleştirilmiş uranyum dioksiti kullanacaktır (EUAŞ International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi, 2020).

Yapılacak bu iki nükleer tesiste de yakıt olarak uranyumu kullanılacak olması sebebiyle Türkiye'deki mevcut uranyum rezervleri Tablo 47'de verilmektedir.

Tablo 47: 2017 yılı itibarıyla Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanlarının Uranyum Rezervlerinin Görünümleri

Ülkeler	Rezervler (Ton Uranyum)	Küresel Rezerv İçerisindeki Payları (%)	Rezerv Ömürleri (Yıl)
Avusturalya	1.818.300	29,60	314
Kazakistan	842.200	13,71	36

Kanada	514.400	8,37	39
Rusya	485.600	7,91	167
Namibiya	442.100	7,20	111
G. Afrika	322.400	5,25	1.040
Çin	290.400	4,73	171
Nijer	280.000	4,56	80
Brezilya	276.800	4,51	4.613
Özbekistan	139.200	2,27	58
Ukrayna	114.100	1,86	186
Moğolistan	113.500	1,85	-
Bostwana	73.500	1,20	-
Tanzanya	58.200	0,95	-
ABD	47.200	0,77	49
Ürdün	43.500	0,71	-
İspanya	34.300	0,56	-
Orta Afrika Cum.	30.000	0,49	-
Türkiye	7.000	0,11	-
Diğer	209.500	3,41	360
Toplam	6.142.200	100,00	104

Kaynak: NEA vd., 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre Türkiye'nin halihazırda herhangi bir uranyum üretimi olmamakla birlikte mevcut uranyum rezervi 7 bin ton ile küresel rezervin sadece %0,11'ini oluşturmaktadır. 2017 yılında yayımlanan Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) raporuna göre Sinop'ta kuracak olan nükleer güç santrali için yakıt teminin Avustralya, K. Amerika, Kazakistan, Rusya, G. Afrika, Nijerya ve Namibiya gibi ülkelerden tedarik edilmesi planlanmaktadır. Santralinin reaktör ömrünün 60 sene toplam maliyetinin de 20 milyar \$ olması beklenmektedir (EUAŞ International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi, 2020).

2.5. Elektrik Enerjisi

Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü, Üretimi ve Talebi

Türkiye'de elektrik enerjisine olan talep, nüfus artışına ve dolayısıyla da kişi başına düşen elektrik talep artışına bağlı olarak artmaktadır. Buna göre Türkiye'nin elektrik enerjisine olan talebi 2018 yılı ve geriye dönük 18 yıl içerisinde toplamda 2 kattan fazla ve %138 yıllık bazda da ortalama %7 oranında artarak 128 TWh'den 304 TWh'e yükselmiştir (Tablo 48). Aynı dönem içerisinde Türkiye'nin nüfusu toplam %30 artarak 63 milyondan

82 milyona, kişi başına düşen elektrik talebi de toplamda %82 oranında artarak 2.024 KWh'den 3.692 KWh'e yükselmiştir (UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020).

Bununla birlikte Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinde meydana gelen artış hızı ise 2000-2009 dönemine kıyasla 2009-2018 arası dönemde daha da artmıştır. 2000-2009 arası dönemde Türkiye'nin elektrik enerjisine olan talebi toplamda %52 artarken 2009-2018 arası dönemde toplamda %57 oranında artmıştır (Tablo 48). Aynı dönemler içerisinde Türkiye'nin nüfusu 2000-2009 arası dönemde toplamda %11 ve buna bağlı olarak da kişi başına düşen elektrik talebi %34 oranında artarken 2009-2018 arası dönemde ise nüfus toplamda %15 kişi başına elektrik talebi de toplamda %36 oranında artış göstermiştir (UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020).

Türkiye, bu talep artışı karşısında da elektrik talebini karşılayabilmek adına kurulu kapasitelerini önemli ölçüde arttırmıştır. Buna göre Türkiye, 2018 yılına kadar geçen 18 yıllık süre içerisinde elektrik enerjisine dayalı kurulu kapasitelerini toplamda %230 oranında arttırmıştır. Bu artış, 2000-2009 arası dönemde toplamda %66 ve 2009-2018 arası dönemde de yine toplamda %98 olacak şekilde seyretmiştir. Bu artışlar neticesinde toplam elektrik üretimi, toplam elektrik talebi karşılayabilir seviyeye gelmiştir (Tablo 48).

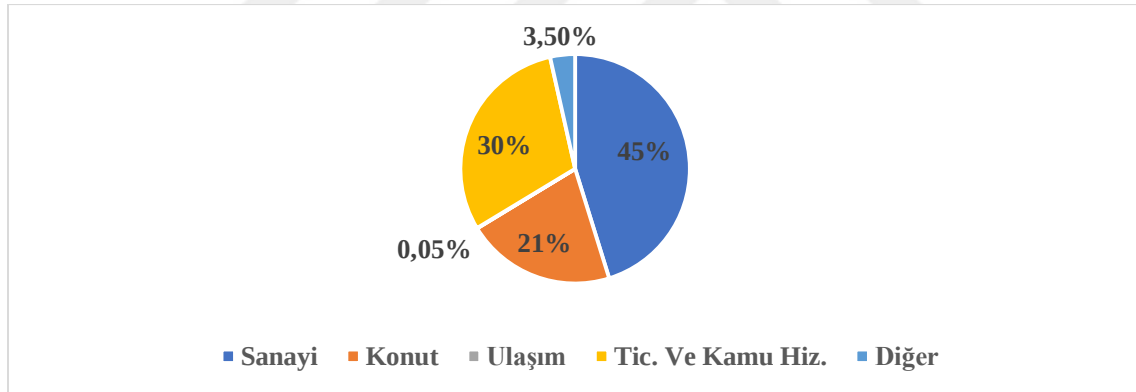
Tablo 48: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Elektrik Gücü Kurulu Kapasiteleri, Üretimleri ve Talepleri

Yıllar	Toplam Kurulu Kapasite (GW)	Toplam Elektrik Üretimi (TWh)	Toplam Elektrik Talebi (TWh)
2000	27	125	128
2001	28	123	127
2002	32	129	133
2003	36	141	141
2004	37	151	150
2005	39	162	161
2006	41	176	175
2007	41	192	190
2008	42	198	198
2009	45	195	194
2010	50	211	210
2011	53	229	230
2012	57	239	242

2013	64	240	246
2014	70	252	257
2015	73	262	266
2016	78	274	279
2017	85	297	297
2018	89	305	304

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'deki elektrik ihtiyacının sektörel dağılımlarına bakıldığında ise elektriğin en çok ihtiyaç duyulduğu sektör sanayi sektörü olmuştur. Sanayi sektörü, 2018 yılı itibariyle Türkiye'de tüketilmiş olan toplam elektriği %45'ini oluşturmuştur. Sanayi sektöründen sonra en fazla elektrik ihtiyacı ticari ve kamusal hizmet alanlarında kendisini göstermiştir. Ticari ve kamu hizmetler, bu yıl itibariyle tüketilen elektriğin %30'unu kapsamıştır. Diğer sektörlerden konut ve ulaşım sektörleri yine bu yıl içerisindeki toplam elektriğin sırasıyla %21'ini ve %0,05'ini tüketmiştir. Bunların dışında kalan diğer sektörlerin elektrik tüketimleri ise toplam elektrik tüketiminin %3,5'ini oluşturmuştur (Grafik 62).



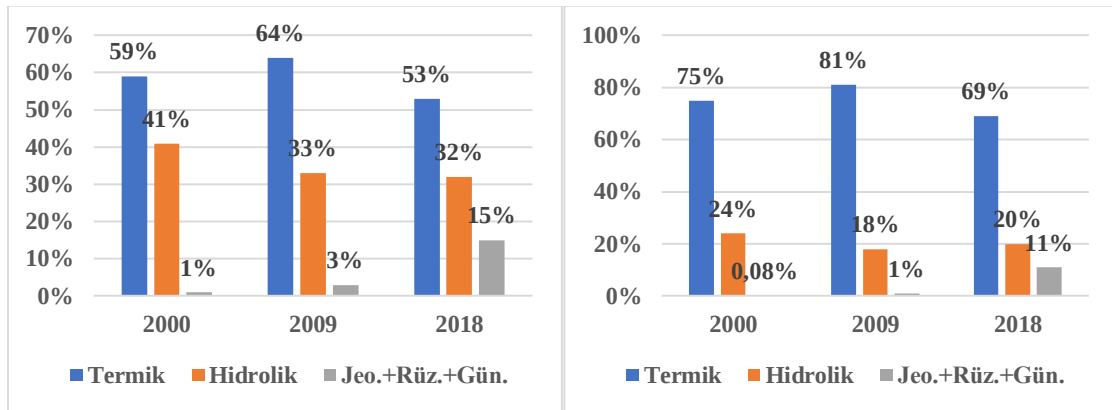
Grafik 62: 2018 Yılı İtibariyle Elektrik Tüketiminin Sektörel Dağılımları

Kaynak: IEA, 17 Haziran 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bununla birlikte Türkiye'de üretilen elektriğin yapısı incelendiğinde Türkiye'de elektrik enerjisi, yakıt olarak fosil enerjiyi (petrol-doğalgaz-kömür) kullanan termik santraller, baraj ve akarsu kaynaklarından beslenerek elektrik üretimi sağlayan hidroelektrik santraller ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santraller (jeotermal-rüzgar-güneş enerji santralleri) vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bu santrallerden termik santrallerin elektrik üretimindeki payı oldukça yüksektir. Türkiye'de 2000-2018 arası dönemde santral bazında elektrik enerjisi kurulu kapasitelerine ve buna bağlı elektrik üretimlerine

bakıldığında termik santrallerinin kurulu kapasitelerinin toplam kurulu kapasite içerisindeki paylarında 2009 yılından sonra bir azalma görülse de en fazla kurulu kapasiteye sahip santral türüdür. Buna göre termik santraller, toplam elektriksel kurulu gücün 2000 yılında %59'unu, 2009 yılında %64'ünü ve 2018 yılında da %53'ünü oluşturmuş buna bağlı olarak da elektrik üretiminden de sırasıyla %75, %81 ve %69 oranında pay almışlardır (Grafik 63).

Termik santrallerden sonra Türkiye’de en fazla kurulu kapasiteye ve elektrik üretimine sahip santral türü hidroelektrik santralleri olmuştur. Hidroelektrik santralleri, Türkiye’deki toplam elektriksel kurulu gücün 2000 yılında %41’ini, 2009 yılında %33’ünü ve 2018 yılında da %32’sini buna bağlı olarak da elektrik üretimlerinin 2000 yılında %24’ünü, 2009 yılında %18’ini ve 2018 yılında da %20’sini oluşturmuşlardır. Bu dönem içerisinde en büyük aşama yenilenebilir enerji santrallerinde meydana gelmiştir. Türkiye’de özellikle rüzgar türbini ve güneş pili teknolojilerinde meydana gelişmeler neticesinde yenilenebilir enerji santrallerinin toplam elektrik santralleri içerisinde de payları artmıştır. Bu santrallerin, 2000 yılında %1 olan toplam kurulu güce oranı 2009’da %3’e ve 2018’de %15’e buna bağlı olarak da elektrik üretimleri de %0,08’den %11’e kadar çıkmıştır (Grafik 63).

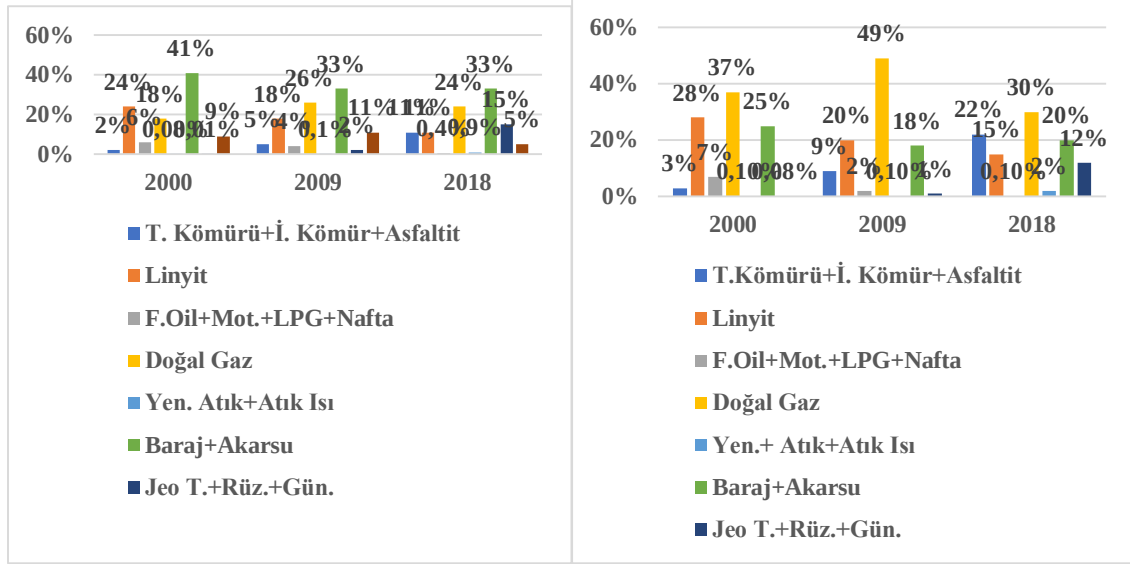


Grafik 63: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’nin Santral Bazında Elektrik Enerjisi Kurulu Güçlerinin (Solda) ve Elektrik Üretimlerinin (Sağda) Dağılımları.

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de üretilen elektriğin kaynak bazındaki dağılımında ise, son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının payları önemli ölçüde artsa da elektrik üretiminde fosil

enerji kaynakları egemen halindedir. Buna göre fosil enerji kaynakları 2000 yılında toplam kurulu kapasitenin %50'sini, 2009 yılında %53'ünü ve 2018 yılında %46'sını ve buna bağlı olarak da elektrik üretiminin sırasıyla %75'ini, %80'ini ve %69'unu oluşturmuştur (Grafik 64).



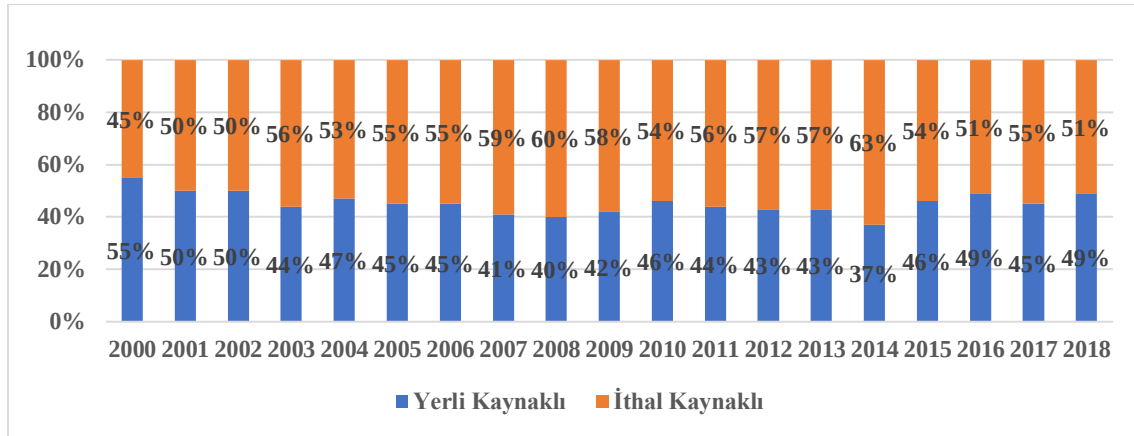
Grafik 64: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Enerji Kaynağı Bazında Elektrik Enerjisi Kurulu Güçlerinin (Solda) ve Elektrik Üretimlerinin (Sağda) Dağılımları.

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Özellikle doğalgaz ve taş kömürü-ithal kömür-asfaltit'ten oluşan kaynaklar 2018 yılı itibariyle toplam elektrik üretiminin %52'sini oluşturmuştur. 2000-2018 arası dönemde doğalgaz özellikle 2009'dan sonra ivme kaybı yaşasa da elektriğin en fazla üretildiği kaynak görünümündedir. 2018 yılında Türkiye'de üretilmiş olan toplam elektriğin %30'u doğalgazdan sağlanmıştır. Doğalgazdan sonra linyit hariç diğer kömür türleri (taş kömürü ve ithal kömür), elektriğin en çok üretildiği diğer kaynaklar olmuşlardır. 2018 yılında toplam üretilen elektriğin %22'si bu kaynaklar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu dönem içerisinde taş kömürü, ithal kömür ve asfaltit'ten üretilen elektriğin 2000 yılı içerisinde toplam kaynaklardan üretilen elektrik içerisindeki %3 olan payı 2018 yılında %22'ye kadar yükselmiştir (Grafik 64).

Grafik 64'te de görüldüğü üzere Türkiye'nin elektrik üretiminin yarısından fazlasının doğalgaz ve kömürden oluşması doğalgazın tamamına yakını ve kömürün de %60'ını ithal eden Türkiye'nin bu şekilde dolaylı olarak elektriği de ithal edilmesine neden

olmaktadır. Grafik 65'te Türkiye'nin yıllar itibariyle üretmiş olduğu elektriğin yerli ve yabancı kaynak bazındaki dağılımlarına bakıldığında 2018 yılında üretilmiş olan toplam elektriğin %51'i yabancı kaynaklardan elde edilirken %49'u da yerli kaynaklardan elde edilmiştir. Ayrıca elektrik üretimindeki yabancı kaynak oranı, son yıllarda düşüş gösterse de 2000 yılının gerisinde kalmıştır. Bu durum Türkiye'de dolaylı olarak 2000 yılında elektriğin %45'ini ve 2018 yılında da %51'inin ithal edilmesine neden olmuştur (Grafik 65).



Grafik 65: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'de Üretilen Elektriğin Yerli ve Yabancı Kaynak Bazındaki Dağılımları

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye elektrik üretimine, ithal kaynaklarının payının yüksek olacak şekilde devam etmesi hiç kuşkusuz ki Türkiye'nin elektrik üretiminde de dışa bağımlılığının devam etmesine neden olacaktır. Özellikle ETKB'nin (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı) 2016 yılı raporu doğrultusunda Türkiye'nin toplam elektrik talebinin 2035 yılına kadar 623 TWh ile 802 TWh arasında olması beklenmektedir. Dolayısıyla ithal kaynaklı elektrik üretiminin devam etmesi artan elektrik üretimiyle beraber elektrik üretiminde dışa bağımlılığın da artmasına zemin hazırlayacaktır.

Elektrik Enerjisi İletim ve Dağıtım Kayıpları

Elektrik enerji santrallerinden üretilen elektrik enerjilerinde, bu santrallerin yerleşim yerlerinden uzak inşa edilmeleri ve dolayısıyla da üretilen elektriğin enerji nakil hatları (trafolar, elektrik kabloları vb.) aracılığıyla nihai kullanım alanlarına doğru taşınması esnasında birtakım enerji kayıpları yaşanabilmektedir.

Türkiye’de bu anlamda enerji kaybı yaşayan ülkelerden biridir. Türkiye’de 2000-2018 arası 18 yıllık dönem içerisinde elektrik enerjisinin aktarımına dayalı iletim ve dağıtım kayıplarına bakıldığında 2015 yılından sonra bir azalma görülse de genel anlamda arttığı görülmektedir. Buna göre, Türkiye’de 2000-2018 arası dönemde ortalama 30 TWh’e yakın elektrik enerjisi nihai kullanım alanlarına doğru taşınması esnasında yok olmuştur. Bu kayıp, bu dönem içerisinde toplamda üretilen elektriğin ortalama %15’ini oluşturmuştur. Ayrıca Türkiye’nin 2010-2018 arası dönemdeki toplam enerji kaybı, 2018 yılı itibarıyla Türkiye’de üretilmiş olan elektrik enerjisinin tamamından fazladır (Tablo 49).

Bu durum, gerek enerji verimliliği açısından gerekse de üretilen elektriğin önemli bir bölümünü yabancı kaynaklardan elde eden Türkiye açısından oldukça önemli bir sorundur. Türkiye’de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından elektrik enerjisinde iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması ve bu sayede de enerji verimliliğini artırmasına yönelik yapılan neticesinde elektrik iletim ve dağıtım kayıplarında %3’e varan tasarruf sağlanmıştır (ETKB, 17 Ekim 2020). Bu durum, 2000-2018 arası dönemde enerji kayıplarının toplam elektrik üretimi içerisindeki paylarında bir azalma şeklinde görülse de 2018 yılında %12 gibi hala önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu sebeple, bu kayıpların ortadan kaldırılması veya minimuma indirilmesi konusunda enerji verimliliğini artırıcı yönde çalışmaların daha da ağırlık kazanması gerekmektedir.

Tablo 49: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye’deki Elektrik Enerjisinin İletim ve Dağıtım Kayıpları ve Bunların Toplam Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları

Yıllar	Elektrik İletim ve Dağıtım Kayıpları (TWh)	Toplam Elektrik Üretiminin Yüzdesi (%)
2000	24	19
2001	23	19
2002	24	19
2003	24	18
2004	23	16
2005	24	15
2006	24	14
2007	27	15
2008	27	14
2009	29	16
2010	30	15
2011	32	15

2012	36	15
2013	37	16
2014	37	15
2015	37	14
2016	36	13
2017	35	12
2018	35	12

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Elektrik Ticareti

Türkiye, yalnızca dolaylı olarak değil üretim-talep dengesizliği nedeniyle (bk. Tablo 48) az da olsa doğrudan elektrik ithalatı ve son zamanlarda yenilenebilir enerjiye yönelimiyle meydana gelen arz fazlası nedeniyle de elektrik ihracatı gerçekleştiren bir ülkedir. Türkiye'nin elektrik enerjisinde yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelimi sebebiyle son yıllarda toplam elektrik ithalatında azalma ihracatında da artışların meydana gelmesine neden olmuştur. Buna göre, Türkiye'nin 2014 yılına kadar toplamda artan elektrik ithalatında 2014 yılından toplamda %70 oranında azalma meydana gelirken 2018 yılında geriye dönük 7 yılın en düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Toplam elektrik ihracatı ise, 2000-2018 arası dönemde 2007 yılından sonra dalgalı seyir izlerken 2018 yılında 2011 ve 2017 yılından sonra en yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir (Tablo 50).

Türkiye, elektrik ithalatını ve ihracatını Bulgaristan, Gürcistan, Türkmenistan ve Yunanistan gibi ülkelere gerçekleştirmektedir. Buna göre Türkiye toplam elektrik ithalatının 2017 yılı itibarıyla %76'sını Bulgaristan, %18'ini Gürcistan ve %6'sını Türkmenistan'dan 2018 yılında ise %83'ünü Bulgaristan, %16'sını Gürcistan ve %4'ünü de Yunanistan'dan gerçekleştirirken, toplam elektrik ihracatının 2017 yılı itibarıyla %97'si Yunanistan, %3'ü Bulgaristan ve Gürcistan 2018 yılında ise %94'ü Yunanistan, %3'ü Gürcistan ve diğer %3'ü de Bulgaristan gibi ülkelere gerçekleştirilmiştir (TEİAŞ, 12 Ekim 2020).

Tablo 50: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Elektrik İthalatı ve İhracatı

Yıllar	Toplam Elektrik İthalatı (TWh)	Toplam Elektrik İhracatı (TWh)
2000	3,7	0,4
2001	4,2	0,4
2002	3,5	0,4

2003	1,1	0,5
2004	0,4	1,1
2005	0,6	1,7
2006	0,5	2,2
2007	0,8	2,4
2008	0,7	1,1
2009	0,8	1,5
2010	1,1	1,9
2011	4,5	3,6
2012	5,8	2,9
2013	7,4	1,2
2014	7,9	2,6
2015	7,1	3,1
2016	6,3	1,4
2017	2,7	3,3
2018	2,4	3,1

Kaynak: TEİAŞ, 12 Ekim 2020'den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye’de ithal ve ihraç edilen elektrik enerjisinin gelir-gider görünümüne bakıldığında ise dönemselsel olarak dış açıklar ve dış fazlalar meydana gelmiştir. Buna göre Türkiye’nin 2000-2018 arası dönemde elektrik enerjisindeki genel dış ticaret dengesine bakıldığında genel dış ticaret dengesinin 2000-2004 ve 2012-2017 arası dönemde dış açık, 2005-2011 ve 2018 yıllarında da dış fazla verdiği görülmektedir. Türkiye’nin son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi ve bu kaynaklara yönelik elektrik üretimlerinin artması elektrik dış ticareti dengesinde de önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle 2013 yılından sonra Türkiye’nin elektrik enerjisine yönelik dış ticaret açığı kademeli olarak düşerek 2005-2011 arası dönem hariç ilk defa 2018 yılında fazla vermiştir. Buna göre Türkiye, 2018 yılında elektrik ithalatına toplamda 57 milyon \$ ödeme yaparken elektrik ihracatından ise toplamda 100 milyon \$ gelir etmiş bu sayede de Türkiye’nin elektrik enerjisine dayalı toplam dış ticareti 43 milyon \$’lık fazla vermiştir. Bunun yanında toplam elektrik ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payları %2 seviyelerinden %0,2 seviyelerine, toplam elektrik ithalatının toplam ürün ithalatı içerisindeki payları da %0,3 seviyelerinden %0,02 seviyelerine kadar gerilemiştir (Tablo 51).

Tablo 51: 2000-2018 Arası Dönemde Türkiye'nin Toplam Elektrik Enerjisi İthalatı ve İhracatındaki Gelir-Gider Görünümleri

Yıllar	Toplam Elektrik İthalatı (Milyon \$)	Toplam Elektrik İhracatı (Milyon \$)	Toplam Elektrik İthalatı Giderlerinin Toplam Enerji İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)	Toplam Elektrik İthalatı Giderlerinin Toplam Ürün İthalatı Giderleri İçerisindeki Payları (%)
2000	132	20	2	0,2
2001	162	20	3	0,3
2002	128	16	2	0,2
2003	43	20	0,5	0,06
2004	16	60	0,1	0,01
2005	18	103	0,1	0,01
2006	18	124	0,08	0,01
2007	22	169	0,09	0,01
2008	15	73	0,09	0,007
2009	17	140	0,1	0,01
2010	20	181	0,1	0,01
2011	87	149	0,4	0,03
2012	255	190	1	0,1
2013	334	29	2	0,1
2014	439	89	2	0,2
2015	325	74	2	0,2
2016	214	14	2	0,1
2017	86	82	0,5	0,03
2018	57	100	0,2	0,02

Kaynak: UNCTADSTAT, 12 Şubat 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'deki mevcut enerji kaynaklarının buraya kadar ki olan bölümü analiz edildiğinde Türkiye'nin, mevcut enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü fosil enerji kaynaklarının oluşturduğu görülmektedir. Türkiye'de fosil enerji kaynaklarının gerek elektrik üretiminde gerekse de sektörel bazda aşırı kullanımı mevcuttur. Bu aşırı kullanım, fosil enerji rezervi sınırlı olan Türkiye'nin bu enerji kaynaklarını dışarıdan temin etmesine neden olmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin her yıl bu enerji kaynaklarına milyarlarca \$ ödemesine ve bundan dolayı da enerji açığı vermesine neden olmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte küresel ölçekte ömrünü tamamlayacak olması nedeniyle Türkiye'nin hem mevcut hem de gelecek dönemlerdeki enerji ihtiyacını özellikle de yerli

kaynaklardan karşılamaya yönelik olarak alternatif enerji kaynaklarına ve teknolojilerine yönelimi şarttır.

Bu bakımdan Türkiye, yenilenebilir enerji teknolojilerinde son dönemlerde önemli mesafeler kat etmiştir. 2018 yılında elektrik üretimlerinin %12'si bu enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları ve buna bağlı yenilenebilir enerji teknolojileri her ne kadar fosil enerji kaynaklarına iyi bir alternatif olarak düşünülse de meteorolojik kökenli olduklarından enerji üretimlerinde dalgalanmalar meydana gelebilmektedir. Bu dalgalanmalar enerji üretimde istenilen verimin elde edilememesine neden olmaktadır. Özellikle gelecek dönemlerde küresel ısınmanın da önemli boyutlara ulaşacağı hesaba katıldığında bu enerji kaynaklarından elde edilecek olan enerji üretimlerinin ve buna bağlı olarak da enerji verimliliklerinin ciddi derecede düşme potansiyeli mevcuttur.

Bunların yanında Türkiye, enerji (elektrik) ihtiyacının karşılamaya yönelik olarak 2023 yılına kadar iki adet nükleer enerji santralini hayata geçirmeyi planlamaktadır. Bu santraller faaliyete geçtiğinde Türkiye'nin elektrik üretimine önemli katkılar sağlayacak olsa da bu santrallerin yakıt olarak uranyumu kullanması hem en küçük bir kaza durumunda radyoaktif madde sızıntısına sebep olacak olması hem de uranyum rezervleri sınırlı olan Türkiye'nin bu enerji kaynağını dışarıdan temin edecek olması (Sinop Nükleer Enerji Santrali için) nedeniyle bu enerji kaynağında da bağımlı hale gelecek olması açısından olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

Bunlara ek olarak küresel çapta geleceğin enerji kaynaklarından biri olacağı düşünülen hidrojen enerjisi için Türkiye'de bir takım çalışmalar yapılsa da bu çalışmalar ya yeterince geliştirilip yaygınlaştırılamamış ya da prototip olmaktan öteye gidememiştir. Bu durumda Türkiye, hem gelişmekte olan ülke statüsünde olması nedeniyle gelecek yıllarda daha da artacak olan enerji ihtiyacını karşılayabilmesi hem de bu ihtiyacın yerli kaynaklardan elde edilmesine yönelik dışa bağımlılığının azaltılması adına katma değer yaratabilecek alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Bu bakımdan hem rezerv miktarı hem de enerji alanındaki ciddi potansiyeli nedeniyle geleceğin enerji kaynaklarından biri olarak gösterilen bor madeni Türkiye'nin gerek enerji bağımlılığının

azaltılmasında gerekse de enerji ihtiyacının yerli kaynaklardan karşılanması açısından iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu bakımdan ikinci bölümde bu konu üzerinde durulacaktır.



BÖLÜM 3: DÜNYA ENERJİ KAYNAKLARI PROJEKSİYONLARI VE ENERJİ UYGULAMALARI

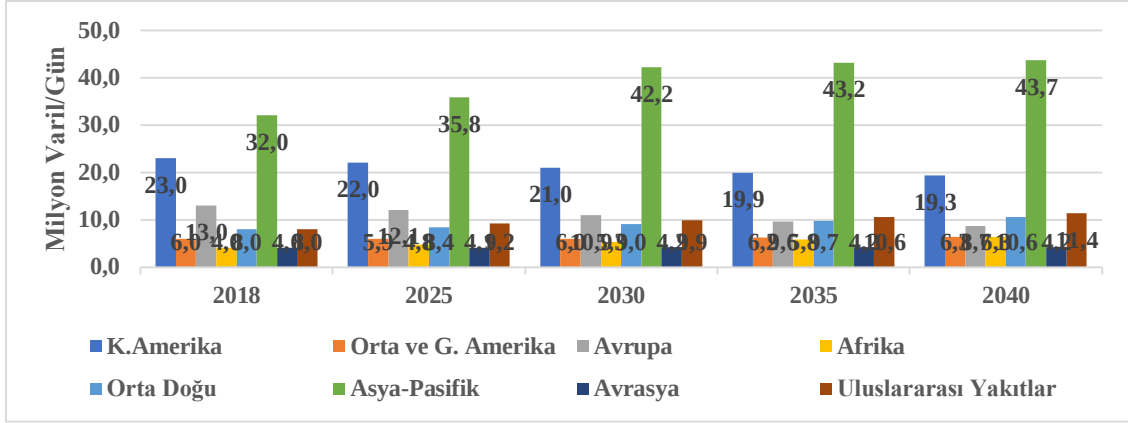
Bu bölümde küresel enerji kaynaklarıyla ilgili kapasite, üretim, talep, yatırım ve maliyet projeksiyonlarının görünümüleri ele alınıp bor enerji teknolojileriyle bağlantılı olabilecek hidrojen ve nükleer füzyon enerjisi ile ilgili dünya genelinde yapılan ve yapılmakta olan uygulamalardan bahsedilecektir.

3.1. Fosil Enerji Kaynakları

3.1.1. Petrol

Küresel petrol talebinin 2018-2040 arası dönemde bölgesel bazdaki dağılımları incelendiğinde tıpkı bir önceki dönemde de olduğu gibi (2000-2018) K. Amerika’da ve Avrupa’da azalırken diğer bölgelerde de artışların yaşanacağı görülmektedir. Ancak 2000-2018 dönemine kıyasla 2018-2040 arası dönemde K. Amerika’da ve Avrupa’da görülen talep azalışlarının derinleşeceği, bunların haricindeki diğer bölgelerde ise talep artış hızlarının yavaşlayacağı beklenmektedir. Buna göre K. Amerika’da 2000-2018 arası dönemde toplamda %2 oranında azalan petrol talebinin (bk. Grafik 5) 2018-2040 arası dönemde toplamda %16 azalması beklenmektedir. Aynı şekilde Avrupa’nın da 2000-2018 arası dönemde toplamda %13 azalan petrol talebinin 2018-2040 arası dönemde toplamda %25 oranında azalması beklenmektedir (Grafik 66).

Artış beklentisinin olduğu bölgelerden Orta ve G. Amerika, Afrika, Orta Doğu, Asya-Pasifik ve Avrasya’nın 2000-2018 döneminde sırasıyla %33, %82, %86, %64 ve %29 (bk. Grafik 5) oranlarında artan petrol talepleri 2018-2040 arası dönemde yerlerini sırasıyla %5, %58, %33, %37 ve %5’lik oranlarda artışlara bırakacağı bu veriler ışığında söylenebilmektedir (Grafik 66).

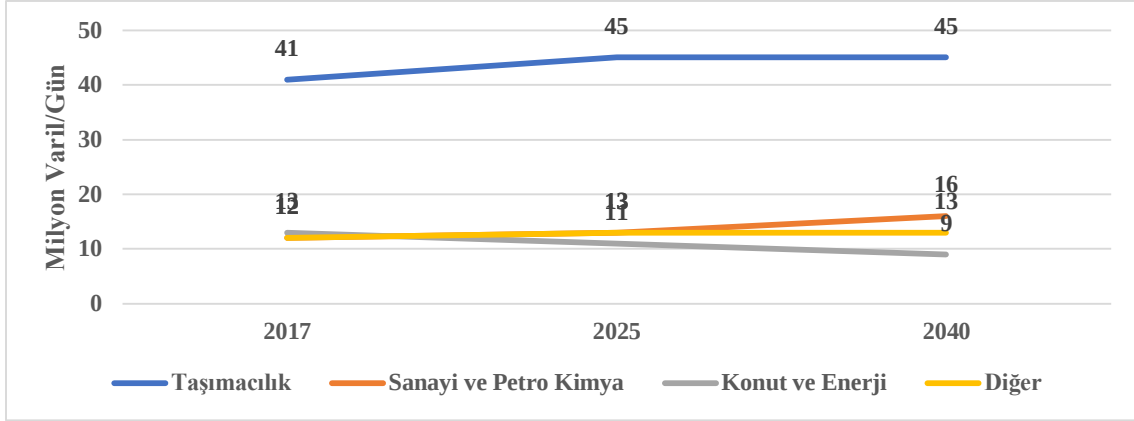


Grafik 66: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri

Kaynak: IEA, 20 Şubat 2020: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Sektörel bazda küresel enerji talebine bakıldığında 2040 yılına geçen süre içerisinde konut ve enerji sektörleri haricinde diğer sektörlerin petrole olan taleplerinde artışların yaşanması beklenmektedir. Buna göre 2040 yılına kadar taşımacılık sektörünün toplam petrol talebinin 45 milyon varil/gün'e, sanayi ve petro kimya sektörlerinin toplam petrol taleplerinin 16 milyon varil/gün'e ve bunların haricindeki diğer sektörlerin de toplam petrol taleplerinin 13 milyon varil/gün'e çıkması beklenirken konut ve enerji sektörlerinin toplam petrol taleplerinin 9 milyon varil/gün'e gerilemesi beklenmektedir (Grafik 67).

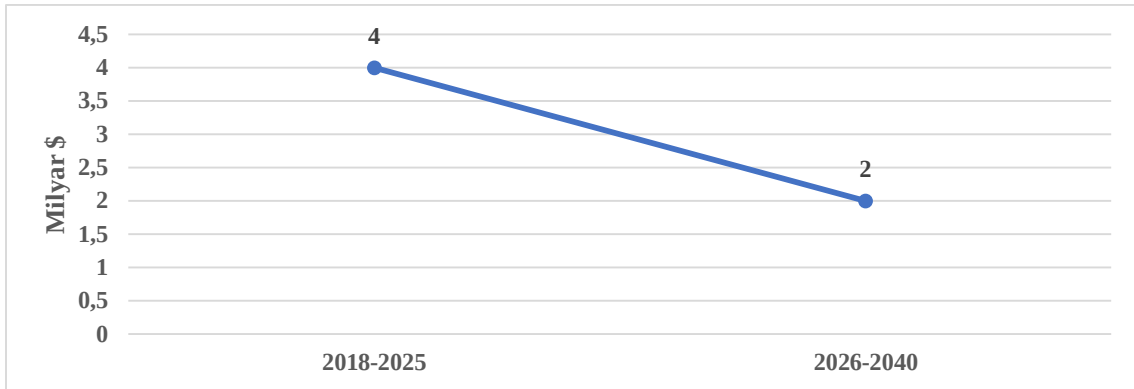
Ancak burada da tıpkı bölgesel talep yapılarında olduğu gibi petrol talebine yönelik talep azalışlarının derinleceği talep artış hızlarının da yavaşlayacağı görülmektedir. Buna göre taşımacılık, sanayi-petro kimya ve bunun haricindeki sektörlerin 2000-2017 arası dönemde petrole olan talepleri sırasıyla %37, %50 ve %20 oranlarında artmışken (bk. Grafik 6) 2017-2040 arası dönemde ise bu sektörlerin toplam petrol taleplerinde sırasıyla %10, %33 ve %8 oranlarında büyüme beklentisi mevcut olmuştur. Konut-enerji sektörlerinin 2000-2017 arası dönemde toplamda %7 oranında azalan petrol talebi 2017-2040 arası dönemde de toplamda %31 oranında azalacağı düşünülmektedir (Grafik 67).



Grafik 67: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Petrol Talebinin Sektörel Görünümü

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel çapta petrol enerjisine yıllık bazda yapılan yatırımlara bakıldığında ise 2017 yılından sonra dünya petrol yatırımlarında ciddi azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Özellikle 2017 yılından 2025 yılına kadar küresel çapta yıllık petrol yatırımlarının toplamda %82 azalacağı beklenmektedir (bk. Grafik 7). Bu azalışın 2025 yılından sonra da devam ederek 2040 yılına kadar yıllık toplamda %50 azalarak 2 milyar \$ seviyelerine kadar düşeceği Grafik 68'deki veriler doğrultusunda söylenebilmektedir.



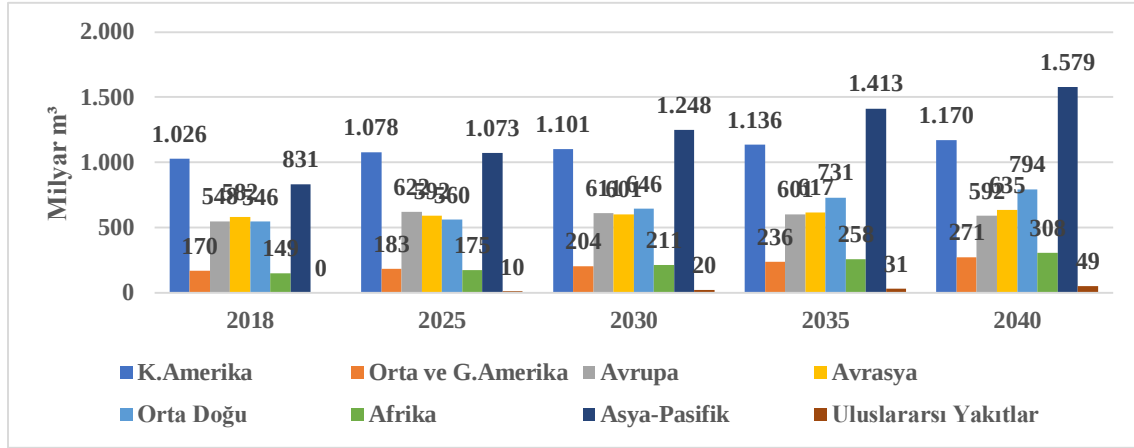
Grafik 68: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Petrol Yatırımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur

3.1.2. Doğal Gaz

Dünya doğal gaz talebinin bölgesel bazdaki dağılımları incelendiğinde 2018 yılından 2040 yılına kadar tüm bölgelerde artması beklenmektedir. Ancak petrolde de olduğu gibi doğal gaza dayalı bölgesel talep artış hızlarının 2000-2018 dönemine kıyasla yavaşlayacağı öngörülmektedir. Buna göre 2018-2040 arası dönemde bölgesel bazda

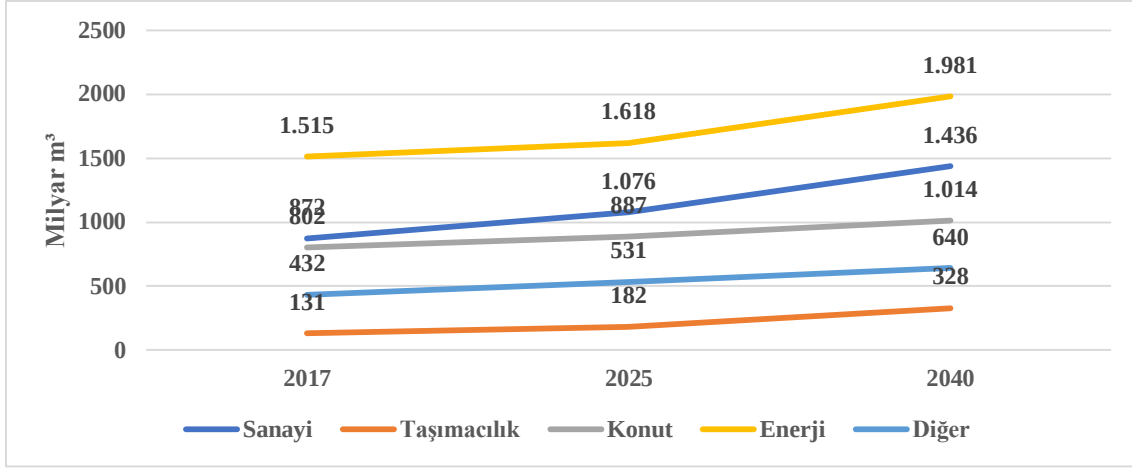
doğal gaz taleplerinin K. Amerika’da %14, Avrasya’da %9, Orta ve G. Amerika’da %59, Orta Doğu’da %45, Afrika’da %107, Asya-Pasifik’te %90 ve Avrupa’da %8 oranında büyüyeceği tahmin edilmektedir (Grafik 69). Bu oranlar 2000-2018 arası dönem itibariyle kıyaslandığında Avrupa haricinde düşük kalmaktadır (bk. Grafik 12).



Grafik 69: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri

Kaynak: IEA, 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

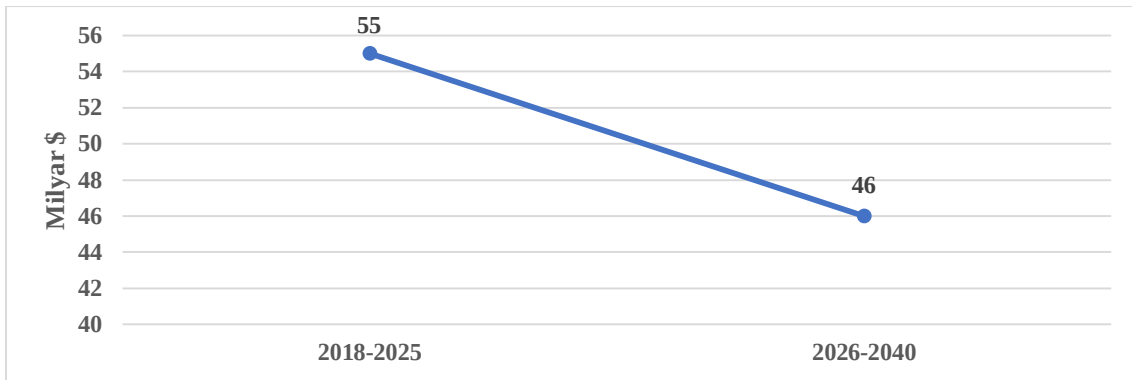
Küresel ölçekli doğal gaz talebinin sektörel dağılımlarına bakıldığında bölgesel talep yapılarında olduğu gibi 2017-2040 arası dönemde tüm sektörlerde artması beklenmektedir. Bu sektörlerden taşımacılık sektöründe toplamda %150’lik bir artışla bu dönem içerisinde en yüksek artışın olacağı tahmin edilmektedir. Bunun haricinde sanayi sektöründe toplamda %65, enerji dönüşüm sektöründe toplamda %31 ve konut sektöründe de yine bu dönem içerisinde toplamda %26’lık artış beklentisi mevcuttur. Bunların dışında kalan sektörlerin doğal gaz taleplerinde de yine toplamda %21’lik bir büyüme beklentisi bulunmaktadır (Grafik 70). Bu sektörlerin doğal gaz talep artış hızlarına bakıldığında ise 2000-2017 arası döneme kıyasla arttığı görülmektedir (bk. Grafik 13).



Grafik 70: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Doğal Gaz Talebinin Sektörel Görünümü

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya genelinde doğal gaz enerjisi yatırımlar incelendiğinde dünya genelinde doğal enerjisine yapılan yıllık bazdaki yatırımların 2025 yılından sonra düşeceği beklenmektedir. Bunun nedeni tıpkı petrol de olduğu doğal gazın da küresel ölçekte uzun soluklu bir gelecek vadetmemesi kaynaklanmaktadır. Bu durum, küresel doğal gaz rezervlerinin ömürlerinden ve bölgesel talep artış hızlarının azalmasından açıkça anlaşılmaktadır (bk. Grafik 2; Grafik 9; Grafik 12). Buna göre küresel bazda doğal gaz enerjisine yapılması planlanan yatırımların 2018-2040 arası dönemde toplamda %18 oranında azalması beklenmektedir (Grafik 71).



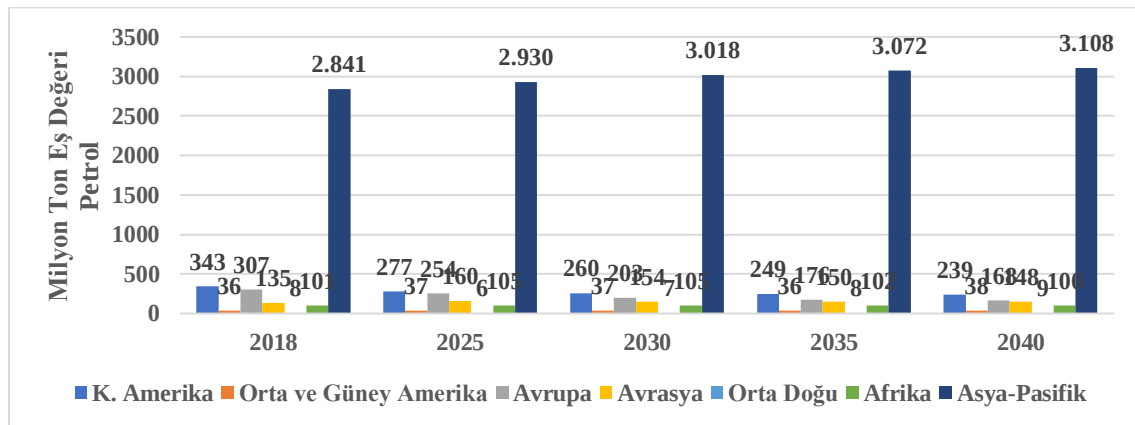
Grafik 71: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Doğal Gaz Yatırımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

3.1.3. Kömür

Küresel ölçekli kömür talebinin dünya genelinde 2018-2040 arası dönemde toplamda %0,9 oranında artarak 3,7 milyar ton eş değeri petrolden 3,8 milyar ton eş değeri petrole ulaşması beklenmektedir (BP, 2019; IEA, 2018). Bölgesel bazda ise yine bu dönem içerisinde toplamda Asya-Pasifik'in %9, Avrasya'nın %10, Orta ve G. Amerika'nın %6 ve Orta Doğu'nun %13 oranında kömüre olan taleplerinin artacağı ve yine toplamda K.Amerika'nın %30, Avrupa'nın %45 ve Afrika'nın %1 oranında kömüre olan taleplerinin azalacağı düşünülmektedir (Grafik 72). Talep artış ve azalış hızlarında bakıldığında ise 2000-2017 dönemine kıyasla (bk. Grafik 19) 2018-2040 arası dönemde talep artış hızları yavaşlayacak (ABD hariç) talep azalışları da daha da derinleşecektir (Avrasya hariç).

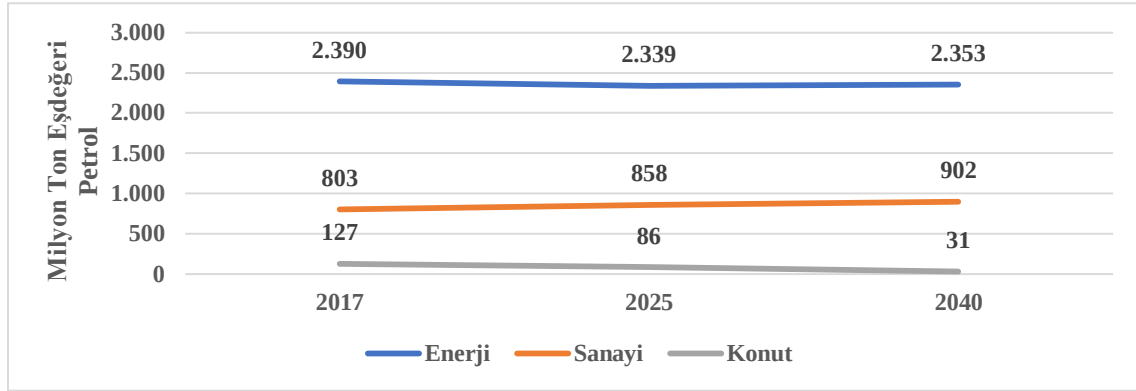
Buna göre talep artış hızlarında bir önceki dönemde (2000-2018) G. Amerika'nın %45, Orta Doğu'nun %300, Afrika'nın %23 ve Asya-Pasifik'in %75 oranında artan toplam kömür talebi, 2018-2040 dönemde bu ülkelerde sırasıyla %6, %13, %1 ve %9 oranlarında gerçekleşeceği bu veriler ışığında söylenebilmektedir. Talep azalışlarında ise, bir önceki dönemde Avrupa'da toplamda %24 oranında azalan kömür talebinin 2018-2040 arası dönemde toplamda %45 oranında düşeceği tahmin edilmektedir. Bunların dışında ABD'nin 2000-2018 arası dönemde toplamda %40 azalmış olan kömür talebinin 2018-2040 arası dönemde toplamda %30 oranında azalarak devam edeceği, Avrasya'nın ise yine 2000-2018 arası dönemde toplamda %4 azalmış olan kömür talebinin 2018-2040 arası dönemde toplamda %10 artması beklenmektedir (Grafik 72).



Grafik 72: 2018-2040 Arası Dönemde Bölgesel Bazda Dünya Petrol Talepleri

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

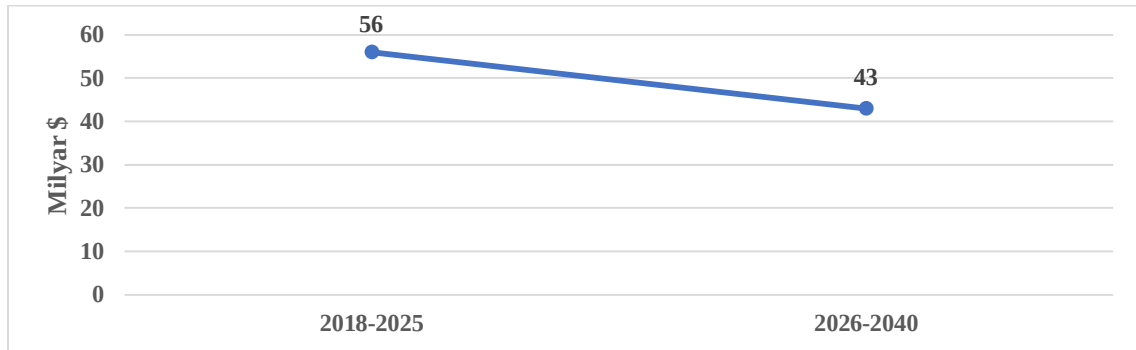
Küresel kömür talebinin sektörel bazdaki görünümünde ise 2017 yılından 2040 yılına kadar enerji ve konut sektörlerinin kömür taleplerinin sırasıyla %2 ve %76 oranında azalması, sanayi sektörünün % 12 oranında artması beklenmektedir. Bir önceki döneme (2000-2017) kıyasla enerji ve konut sektörlerinin kömür taleplerinde meydana gelen düşüşler sürerken sanayi sektörünün bir önceki dönemde %101 oranında (bk. Grafik 20) azalan kömür talebi bu dönemde yerini artışa bırakmıştır (Grafik 73).



Grafik 73: 2000-2040 Arası Dönemde Dünya Kömür Talebinin Sektörel Dağılımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

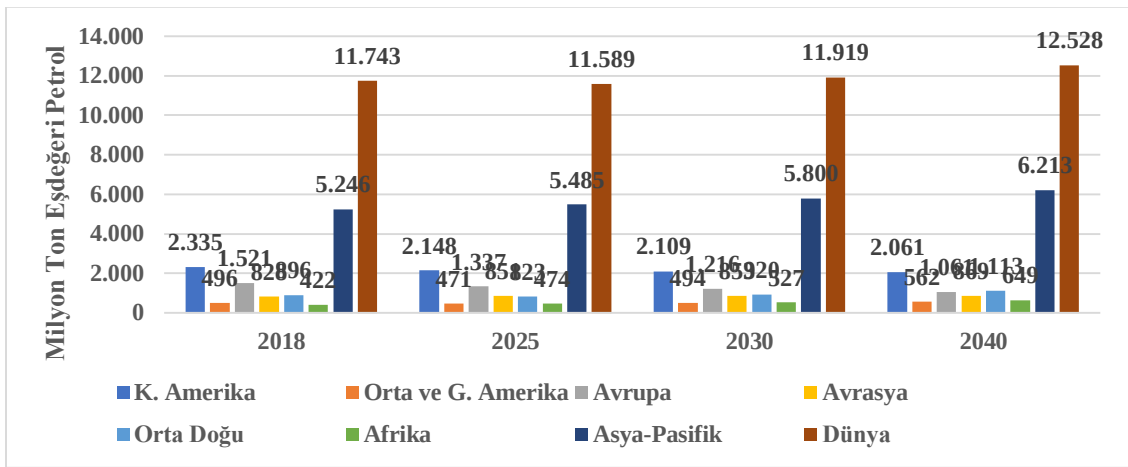
Diğer fosil enerji kaynaklarında olduğu gibi kömürde 2017 yılına kadar yıllık bazda artan (bk. Grafik 21) yatırımlar, 2017 yılından sonra azalmaya başlamıştır. Buna göre 2018 yılında 2040 yılına kadar küresel ölçekte kömür enerjisine yapılacak olan yatırımların toplamda %23 oranında azalması beklenmektedir (Grafik 74).



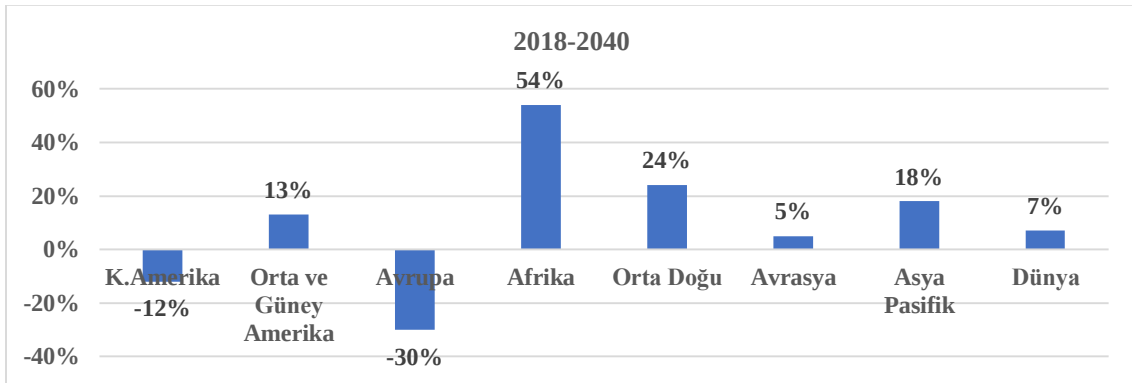
Grafik 74: 2000-2040 Arası Küresel Bazda Yıllık Kömür Yatırımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buraya kadar olan bölümde dünya fosil enerji kaynaklarının enerji kaynağı bazındaki projeksiyonel görünümü alındığında enerji kaynaklarına yıllık bazda yapılan yatırımların azaldığı, bölgesel talep yapılarında ise genel itibariyle talep artış hızlarının azaldığı, talep azalışlarının ise derinleştiği tespit edilmiştir. Bu durum Grafik 75'teki fosil enerji kaynaklarının toplu olarak bölgesel bazdaki talep görünümü içerisinde de değişmemiştir. 2000-2018 dönemine kıyasla (bk. Grafik 23) 2018-2040 arası dönemde de bölgesel bazda fosil enerji kaynaklarında meydana gelen talep artış hızları yavaşlarken talep azalışları da gittikçe derinleşmekte olduğu görülmektedir (Grafik 76).



Grafik 75: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Geneline ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebi
Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

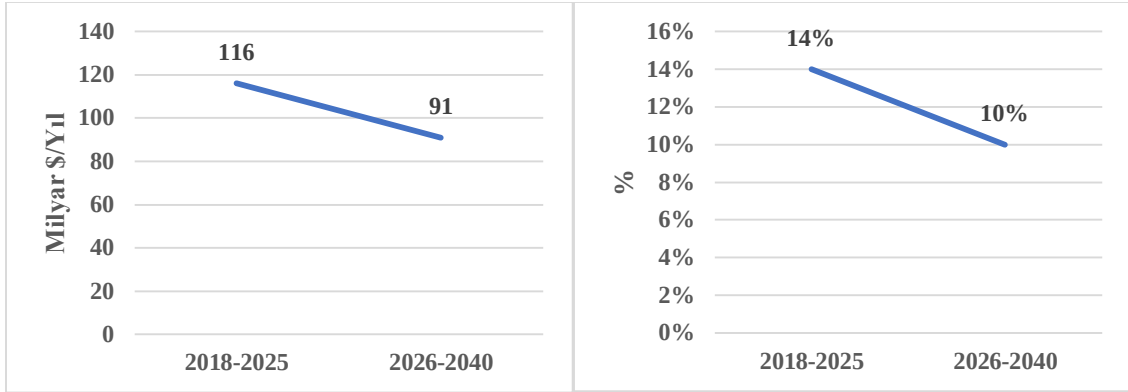


Grafik 76: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Geneline ve Bölgesel Bazda Fosil Enerji Talebinde Meydana Gelmesi Beklenen Değişimler

Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Fosil enerji kaynaklarında yine bu dönem içerisindeki muhtemel yatırım görünümüne bakıldığında ise, bir önceki dönemin akasına bu dönem içerisinde yıllık bazda azalması

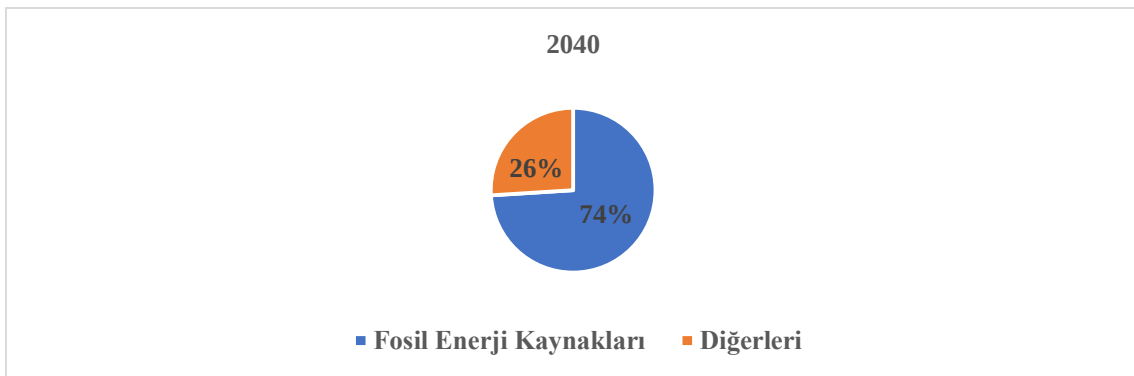
beklenmektedir. Bu dönem içerisinde dünya genelinde fosil enerji kaynaklarına yapılması planlanan enerji yatırımlarının toplamda %22 oranında azalarak 91 milyar \$ seviyelerine kadar düşmesi beklenmektedir. Bu düşüş neticesinde fosil enerji kaynaklarının toplam enerji yatırımları içerisindeki paylarının da %10'a kadar gerileyeceği muhtemel görülmektedir (Grafik 77).



Grafik 77: 2018-2040 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Genelinde Fosil Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri

Kaynak: IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Tüm bunların sonucunda ise, fosil enerji kaynakları talebinin dünya birincil enerji talebi içerisinde 2018 yılında da %85 olan payının (bk. Grafik 24) 2040 yılına kadar %74'ler seviyesine kadar düşeceği yapılan hesaplamalar neticesinde tespit edilmiştir (Grafik 78).



Grafik 78: 2040 Yılında Fosil Enerji Kaynaklarının Dünya Toplam Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Muhtemel Görünümü

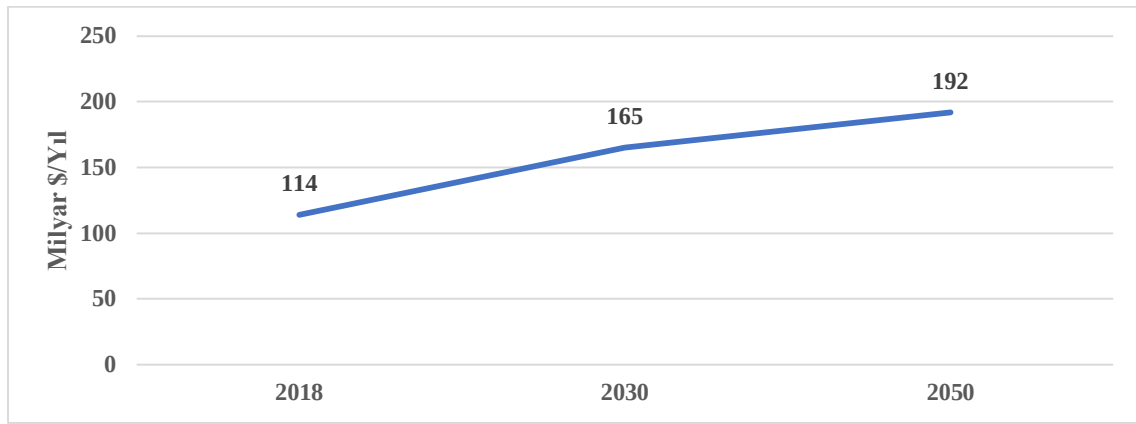
Kaynak: BP, 2019; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur

3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

3.2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi

Güneş Enerjisi

Güneş pili teknolojilerine küresel olarak 2018 yılında 114 milyar \$ olan toplam yıllık yatırımların sırasıyla 2030'a kadar toplamda %45 oranında artışla 165 milyar \$'a ve 2050 yılına kadar 2018 yılına kıyasla yine toplamda %68 oranında artışla 192 milyar \$'a kadar ulaşması beklenmektedir (Grafik 79).



Grafik 79: 2018-2050 Arası Dönemde Güneş Pili Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılması Planlanan Yatırımlar

Kaynak: IRENA 2019a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Güneş enerji sistemlerine küresel ölçekte yapılması planlanan yatırımların beraberinde getireceği maliyet düşüşlerinin 2018-2050 arası dönemde de devam edeceği ve buna bağlı olarak elektrik üretim maliyetlerinde de yine bu süreçte düşüşlerin süreceği beklenmektedir. Buna göre küresel ölçekte güneş pili tesis kurulum maliyetlerinin 2018 yılında 2050 yılına kadar olan süreç içerisinde 2030 yılına kadar toplamda %31 ila %72, 2050 yılına kadar da toplamda %60 ila %87 oranında düşerek KW başına 156 \$ düzeylerine kadar düşeceği buna bağlı olarak da elektrik üretim maliyetlerinde de toplamda %88 oranında düşeceği tahmin edilmektedir (Tablo 52).

Tablo 52: Yıllar İtibariyle Güneş Pili Kurulum ve Elektrik Üretim Maliyetleri

Yıllar	Güneş Pili Tesis Maliyetleri (\$/KW)	Elektrik Üretim Maliyetleri (\$/KWh)
2018	1.210	0,085
2030	834-340	0,080-0,020
2050	481-156	0,050-0,010

Kaynak: IRENA, 2020; IRENA 2019a’Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Güneş pili teknolojilerinde yıllar itibariyle meydana geleceği düşünülen bu denli maliyet düşüşlerinin ve yapılması planlanan yatırımların neticesinde küresel çapta güneş pili sistemlerinin kurulu kapasitelerinin ve buna bağlı olarak enerji üretimlerinin de artması beklenmektedir. Buna göre 2018 yılında küresel ölçekte toplamda 487 GW olan güneş pili kurulu kapasitelerinin 2040 yılına kadar toplamda %422 oranında artarak 2,5 TW değerine ve buna bağlı olarak enerji üretimlerinin de toplamda %583 oranında artarak 3,8 PWh değerine ulaşacağı düşünülmektedir. Bunların neticesinde de küresel bazdaki toplam güneş pili kurulu kapasitelerinin 2040 yılına kadar yenilenebilir enerji kurulu kapasiteleri içerisindeki paylarını %39’a, enerji üretimleri içerisindeki paylarını da %23’e yükseltmesi beklenmektedir (Tablo 53). Ayrıca IEA’nın (2018) uzun vadeli dünya elektrik üretim projeksiyonları incelendiğinde küresel bazda üretilecek olan elektrik enerjisinin sırasıyla 2025 yılında %5’inin, 2030 yılında %7’sinin ve 2040 yılında ise %9’unun güneş pilleri aracılığıyla üretileceği görülmektedir.

Tablo 53: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Çapta Güneş Pillerinin Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

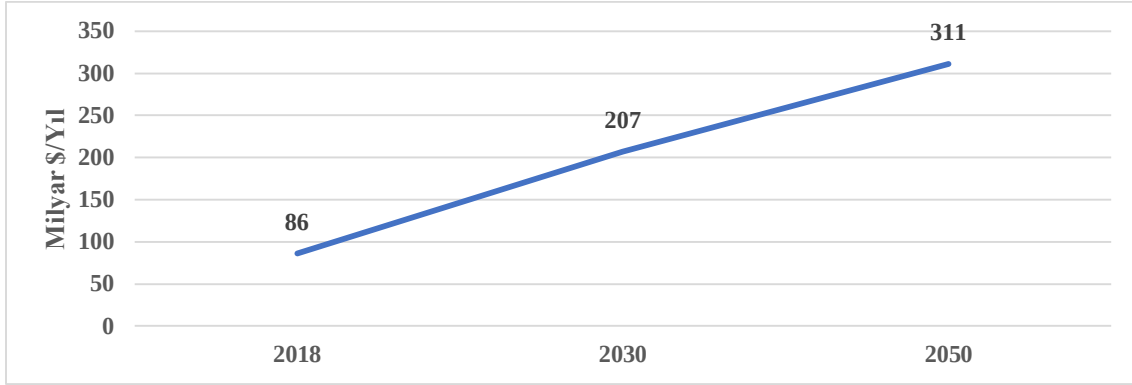
Yıllar	Güneş Pili Kurulu Kapasite (MW)	Güneş Pili Enerji Üretimi (GWh)	Güneş Pili Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Güneş Pili Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2018	486.721	562.033	20,67	8,53
2030	1.589.000	2.197.000	33,68	18,00
2040	2.540.000	3.839.000	39,05	23,00

Kaynak: IRENA, 2020; IEA, 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi teknolojilerinde uzun dönemli yatırım görünümüne bakıldığında yatırımların 2050 yılına dek artarak süreceği tahmin edilmektedir. Buna göre küresel

çapta 2018 yılında rüzgar enerji teknolojilerine 86 milyar \$ olan yıllık yatırımların 2050 yılına kadar olan süreçte toplamda %262 oranında artarak yıllık bazda 311 milyar \$'a ulaşması beklenmektedir (Grafik 80).



Grafik 80: 2018-2050 Arası Dönemde Rüzgar Enerji Teknolojilerine Yıllık Bazda Yapılması Planlanan Yatırımlar

Kaynak: IRENA 2019b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bu planlanan yatırım artışları neticesinde de tıpkı güneş enerji teknolojilerinde olduğu gibi rüzgar türbini tesis kurulum ve elektrik üretim maliyetlerinin çok daha aşağılara düşeceği beklenmektedir. Buna göre 2018-2050 arası süreçte karada kurulacak rüzgar türbini tesisleri için KW başına kurulum maliyetlerinin toplamda %33 ila %57 arasında düşerek 650 \$ ila 1.000 \$ seviyelerinde, KWh başına elektrik üretim maliyetlerinin de yine toplamda %17 ila %67 arasında gerileyerek 0.02 \$ ila 0.05 \$ civarlarında oluşacağı beklenmektedir. Deniz merkezli kurulacak rüzgar türbinleri için ise, KW başına kurulum maliyetlerini %36 ila %68, KWh başına elektrik üretim maliyetlerinin de %46 ila %77 arasında düşeceği öngörülmektedir (Tablo 54).

Tablo 54: Yıllar İtibariyle Rüzgar Enerjisi Kurulum ve Elektrik Üretim Maliyetleri

Yıllar	Karada (Onshore)		Denizde (Offshore)	
	Toplam Tesis Maliyeti (\$/KW)	Elektrik Üretim Maliyeti (\$/KWh)	Toplam Tesis Maliyeti (\$/KW)	Elektrik Üretim Maliyeti (\$/KWh)
2018	1.497	0.06	4.353	0.13
2030	800-1.000	0.03-0.05	1.700-3.200	0.05-0.09
2050	650-1.000	0.02-0.05	1.400-2.800	0.03-0.07

Kaynak: IRENA, 2019b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna bağılı olarak küresel ölçekteki rüzgar türbini kurulu kapasitelerinin ve enerji üretimlerinin de artması beklenmektedir. 2018 yılından 2040 yılına kadar olan süre içerisinde dünya genelindeki rüzgar türbini kapasitelerinin toplamda %203 artarak 1,7 GW değerine, enerji üretimlerinin de yine toplamda %271 oranında artarak 4,6 GWh değerine ulaşacağı, bunların neticesinde de toplam küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin %26'sını ve yine küresel bazda yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen toplam enerji üretimlerinin de %28'ini temsil edeceği düşünülmektedir (Tablo 55).

Tablo 55: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Çapta Rüzgar Türbini Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Rüzgar Türbini Kurulu Kapasite (MW)	Rüzgar Türbini Enerji Üretimi (GWh)	Rüzgar Türbini Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Rüzgar Türbini Enerji Üretiminin Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2018	563.186	1.262.914	23,90	19,18
2030	1.250.000	3.157.000	26,49	26,27
2040	1.707.000	4.690.000	26,25	27,99

Kaynak: IEA, 2018; IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

3.2.2. Biyo ve Jeotermal Enerji

Biyoenerji

Dünya genelinde biyoenerjiye dayalı kapasite ve üretim yapılarının uzun dönemli görünümüne bakıldığında diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş pili ve rüzgar türbini teknolojilerine kıyasla daha düşük gelişim içerisinde olsa da küresel ölçekte gelişim içerisinde olan yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Özellikle dünya genelinde fosil enerji kaynaklarının önemini gittikçe kaybetmeye başlayacak olması ve bu sebeple de endüstriyel sektörlerinin enerji tüketim yapısının değişecek olması yakıt ve ısınma amaçlı olarak da kullanılabilen biyoenerjinin küresel ölçekteki gelişiminin ilerleyen yıllarda da devam etmesine neden olacaktır.

Tablo 56'da yer alan veriler doğrultusunda biyoenerjinin küresel çapta uzun dönemli kapasite ve enerji üretim yapılarına bakıldığında bir önceki dönemde (2010-2018) devam eden kapasite ve üretim artışlarının 2018-2040 arası dönemde de toplamda %83 oranında

kapasite ve yine toplamda %173 enerji üretimi ile devam edeceği görülmektedir. Bu artışlar 2018-2030 arası dönemde kapasite olarak %83, enerji üretimi olarak da %102 şeklindedir. Küresel yenilenebilir enerji kapasiteleri ve enerji üretimleri içerisindeki paylarında da %4 ila %5 arası kapasite, %8 ila %9 arası enerji üretimi olarak gerçekleşmesi bu veriler ışığında söylenebilmektedir.

Tablo 56: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Bazda Biyoenerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Biyoenerji Kurulu Kapasite (MW)	Biyoenerji Üretimi (GWh)	Biyoenerji Kurulu Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Biyoenerji Üretiminin Toplam Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2018	117.738	522.552	5,00	7,93
2030	216.000	1.057.000	4,58	8,80
2040	278.000	1.427.000	4,27	8,52

Kaynak: IEA, 2018; IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Jeotermal Enerji

Jeotermal enerjinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre tıpkı bir önceki dönemde de olduğu gibi 2018-2040 arası projeksiyon döneminde de dünya genelinde gelişmekte olan fakat en az öneme sahip enerji kaynağı olma durumunu sürdürmesi beklenmektedir. Jeotermal enerjinin 2018 yılından 2040 yılına kadar olan süre içerisinde toplam kurulu kapasitelerinde toplamda %292 ve enerji üretimlerinin de toplamda %290 oranında artış beklentisi olması rağmen yenilenebilir enerji kapasitelerinin sadece %0,78'ini yenilenebilir enerji üretimlerinin de sadece %2'sini oluşturacağı tahmin edilmektedir (Tablo 57).

Tablo 57: 2018-2040 Arası Dönemde Küresel Bazda Jeotermal Enerji Kurulu Kapasiteleri ve Enerji Üretimleri

Yıllar	Jeotermal Enerji Kurulu Kapasite (MW)	Jeotermal Enerji Üretimi (GWh)	Jeotermal Enerji Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Jeotermal Enerji Üretiminin Toplam Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2018	13.227	88.408	0,56	1,34

2030	29.000	190.000	0,61	1,58
2040	51.000	343.000	0,78	2,05

Kaynak: IEA, 2018; IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

3.2.3. Hidro Enerji

Hidroenerji, 2018-2040 arası projeksiyon döneminde de dünyanın birincil derecede önemde olan yenilenebilir enerji kaynağı olma durumunu sürdürmesi beklenmektedir. Bu dönemde küresel çaptaki hidronerji kapasitelerinin toplamda %42, hidroenerji üretimlerinin de toplamda %45 oranında büyüyeceği tahmin edilmektedir. Ancak bu büyümeye karşılık yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki konumu gittikçe azalmaktadır. Buna göre 2018 yılında dünya yenilenebilir elektrik üretiminin %65'i hidroelektrik santrallerden karşılanırken 2040'a kadar olan süreçte bu oranın %37'lere kadar gerileyeceği öngörülmektedir (Tablo 58). Bunun altında yatan temel neden; dünya yenilenebilir elektrik üretim portföyünün güneş pilleri ve rüzgar türbinleri lehine genişleyecek olmasından kaynaklanmaktadır (bk. Tablo 53; Tablo 55).

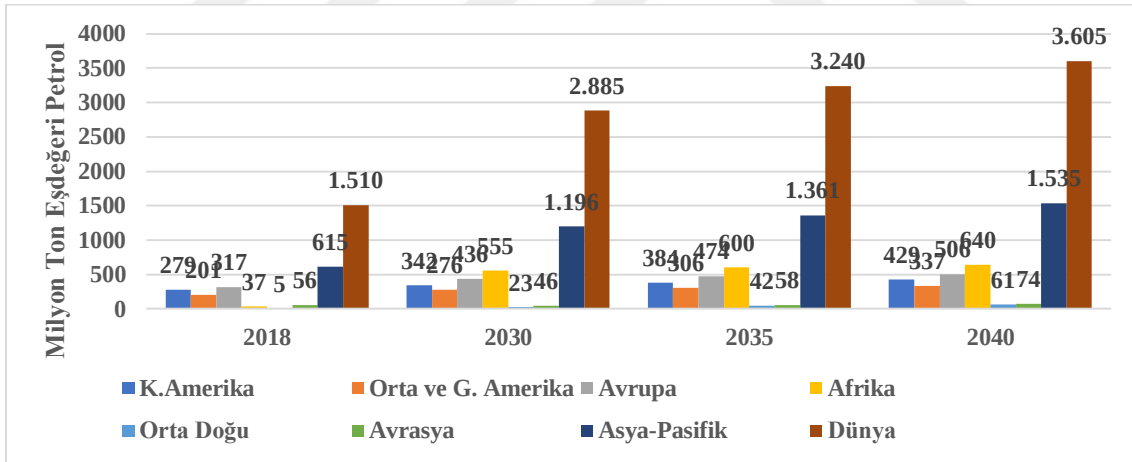
Tablo 58: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Hidroelektrik Enerji Görünümü

Yıllar	Hidroenerji Kurulu Kapasite (MW)	Hidroenerji Üretimi (GWh)	Hidroenerji Kapasitesinin Toplam Yenilenebilir Kapasite İçerisindeki Payı (%)	Hidroenerji Üretiminin Toplam Yenilenebilir Enerji Üretimi İçerisindeki Payı (%)
2018	1.295.000	4.267.000	54,97	64,79
2030	1.604.000	4.821.000	34,00	40,12
2040	1.839.000	6.179.000	28,27	36,88

Kaynak: IEA, 2018; IRENA, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

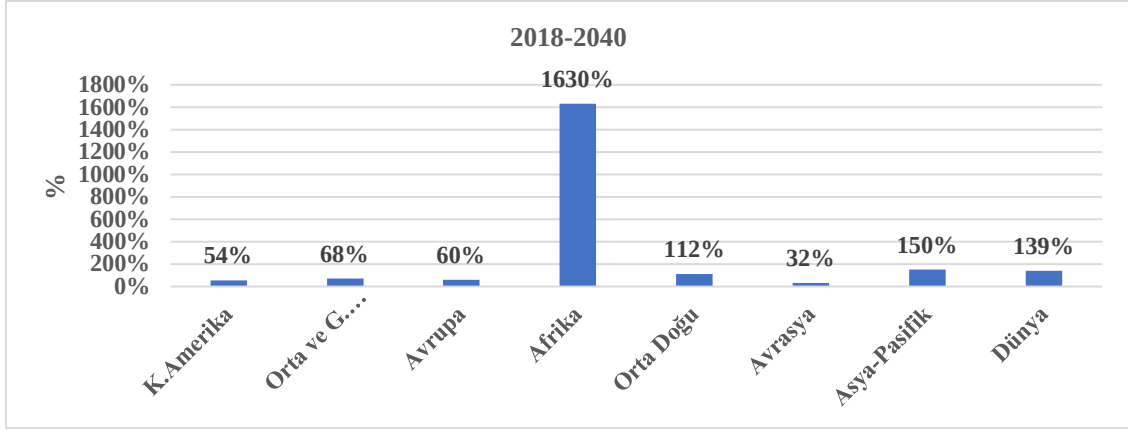
Yenilenebilir enerji teknolojilerinin buraya kadar olan projeksiyonel görünümüleri ayrı ayrı incelendiğinde bu enerji teknolojilerinde 2018-2040 arası projeksiyon dönemi içerisinde kapasite, üretim ve yatırımların artacağı ve maliyet yapılarının da düşeceği görülmektedir. Özellikle yatırım artışı ve maliyet düşümleri nedeniyle bu projeksiyon dönemi içerisinde güneş pili ve rüzgar türbini teknolojilerinin dünya genelinde önemini gittikçe arttırması beklenmektedir.

Küresel çapta yenilenebilir enerji talebinde ise, bu projeksiyon döneminde 2018 yılında 1,5 milyar ton eşdeğeri petrol olan toplam talebinin 2040 yılına kadar toplamda %139 oranında artarak 3,6 milyar ton eşdeğeri petrole ulaşacağı düşünülmektedir (Grafik 81). Talep artış hızında bir önceki dönemde daha yüksek olacağı söylenebilmektedir. Küresel ölçekteki yenilenebilir enerji talebinin bölgesel bazdaki dağılımlarına bakıldığında yine bu projeksiyon dönemi içerisinde talep yapılarında herhangi bir azalış olmamakla birlikte artan hızda (Asya-Pasifik hariç) devam etmekte olduğu görülmektedir. Buna göre bir önceki dönemde (2000-2018) toplamda bölgesel bazda yenilenebilir enerji taleplerinde K. Amerika’da %46, Orta ve G. Amerika’da %41, Avrupa’da %90, Afrika’da %54, Orta Doğu’da %67 ve Avrasya’da %19 oranında talep artışı meydana gelirken (bk. Grafik 29) 2018-2040 arası dönemde toplamda bu talep artışlarının sırasıyla %54, %68, %60, %1.630, %112 ve %32 olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Asya-Pasifik’in ise bir önceki dönemde toplamda %330 oranında aratan yenilenebilir enerji talebinin (bk. Grafik 29) 2018-2040 arası dönemde toplamda %150 oranında artacağı düşünülmektedir (Grafik 82).



Grafik 81: 2018-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Yenilenebilir Enerji Talep Projeksiyonu

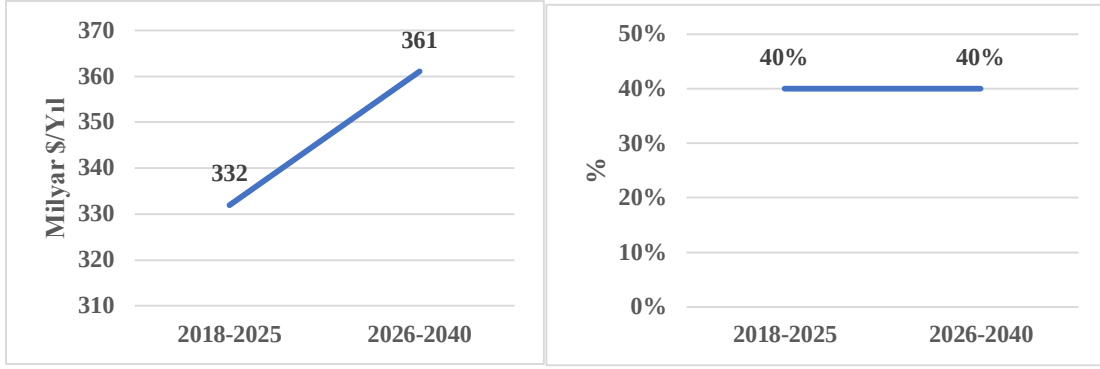
Kaynak: BP, 2019; IEA 2018’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.



Grafik 82: 2018-2040 Arası Dönemde Dünya Genelinde ve Bölgesel Bazda Dünya Yenilenebilir Enerji Talebinde Meydana Gelmesi Beklenen Değişimler

Kaynak: BP, 2019; IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

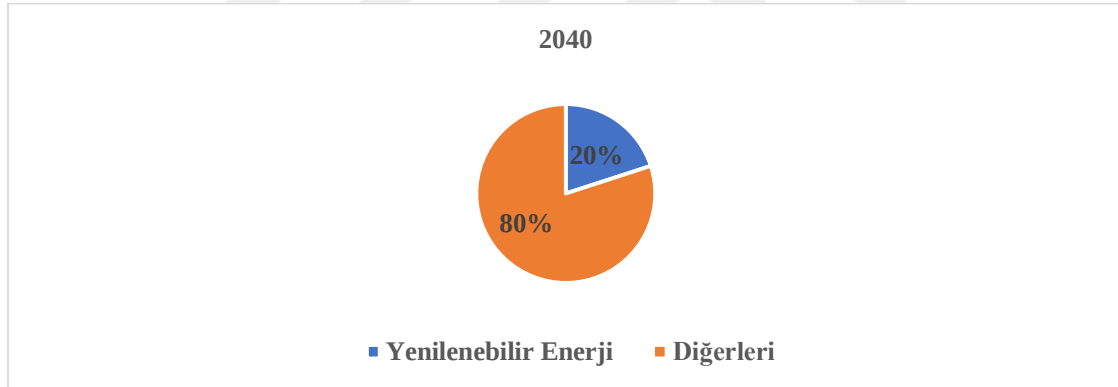
Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik projeksiyon dönemi boyunca yapılması planlanan yatırım görünümüleri incelendiğinde küresel ölçekte yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırım harcamalarının bir önceki dönemde (2000-2017) de olduğu gibi bu dönem içerisinde de artarak devam etmesi beklenmektedir. Buna göre bu dönem içerisinde küresel ölçekte yenilenebilir enerji yatırımlarının yıllık bazda toplamda %9 oranında artarak 361 milyon \$ seviyelerine kadar yükseleceği tahmin edilmektedir (Grafik 83). Bu yatırımların ise, %74'ünün elektrik üretimi için devreye sokulması planlanmaktadır. Bu doğrultuda 2040 yılına kadar olan süreçte yaklaşık 8 trilyon \$'lık yatırımın yaklaşık %75'inin güneş pillerine ve rüzgar türbinlerine, %20'sinin hidroelektrik ve %5'inin de biyoenerji üretimlerine yapılacağı öngörülmektedir. Bu süreç içerisinde yenilenebilir enerji üretimlerine yapılan yatırımların %60'ından fazlasını ABD, Hindistan, Çin ve AB ülkeleri tarafından gerçekleştirileceği tahmin edilmektedir (IEA, 2018). Tüm bunların neticesinde de küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının küresel toplam enerji yatırımları içerisinde 2000-2010 arası dönemde %26 olan payının (bk. Grafik 30) 2018-2040 arası dönemde %40'a yükseleceği öngörülmektedir (Grafik 83).



Grafik 83: 2018-2040 Arası Dönemde Yıllık Bazda Dünya Geneline Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yatırım Görünümleri

Kaynak: IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel ölçekte meydana gelmesi beklenen yatırım ve talep artışlarının neticesinde de dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam birincil telebi içerisinde 2018 yılında %11 olan payının (bk. Grafik 31) 2040 yılına kadar süre içerisinde %20 seviyelerine kadar yükselmesi muhtemel olarak gözükmektedir (Grafik 84).



Grafik 84: 2040 Yılında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Dünya Birincil Enerji Talebi İçerisindeki Muhtemel Görünümü

Kaynak: BP, 2019; IEA 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

3.3. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen Enerji Teknolojilerinin Maliyet Görünümleri

Dünya genelinde hidrojenin uzun ve kısa mesafelere olan sevkiyatının hidrojen ekonomisinin genişlemesine de bağlı olarak özellikle 2030 ve sonrası için hız kazanması beklenmektedir. Hidrojenin, üretiminden nihai kullanım alanlarına doğru kısa mesafeli (yerel) ve uzun mesafeli (deniz aşırı) olmak üzere iki şekilde ulaşımı sağlanabilmektedir.

Hidrojen kısa mesafelere (500 km'nin altında); sıvı ve gaz fazlarında tırların ve boru hatlarının içerisinde, uzun mesafelerde (500 km'nin üzerinde); keza yine boru hatların ve tankerlerin içerisinde depo edilmek suretiyle taşınabilmektedir. Tablo 59'da hidrojenin kısa mesafeli taşıma yöntemleri ve maliyetleri verilmektedir.

Tablo 59: Hidrojenin Kısa Mesafeli Taşıma Maliyetleri (\$/kgH₂)

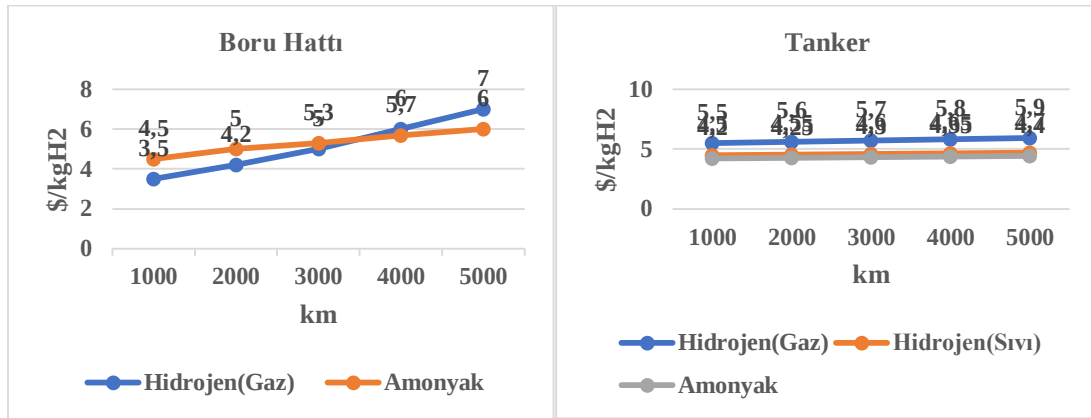
Taşıma yöntemleri	2020	2030	Değişim (%)
Gaz	1,8	1,1	-39%
Sıvı	2	1,3	-35%
Boru Hatları	1,9	0,6	-68%

Not: Taşıma maliyetleri; sıkılaştırma, sıvılaştırma ve depolama maliyetlerini de içermektedir.

Kaynak: Hydrogen Council, 2020.

Buna göre hidrojenin kısa mesafede tüm taşıma yöntemlerinde 2030 yılına kadar ciddi maliyet düşüşlerinin yaşanacağı gözlemlenmektedir. Bu bakımdan hidrojen şayet nihai olarak gaz halinde kullanılacaksa boru hatlarıyla taşımak oldukça cazip bir yöntem olarak görülmektedir.

Hidrojen uzun mesafeli olarak ise boru hatlarında gaz ve amonyak, tankerlerde de gaz, sıvı ve amonyak olarak taşınabilmektedir. Grafik 85'te bu yöntemler ve taşıma maliyetleri gösterilmektedir.



Grafik 85: 2030 Yılı İtibariyle Uzun Mesafeli Hidrojen Taşıma Maliyetleri

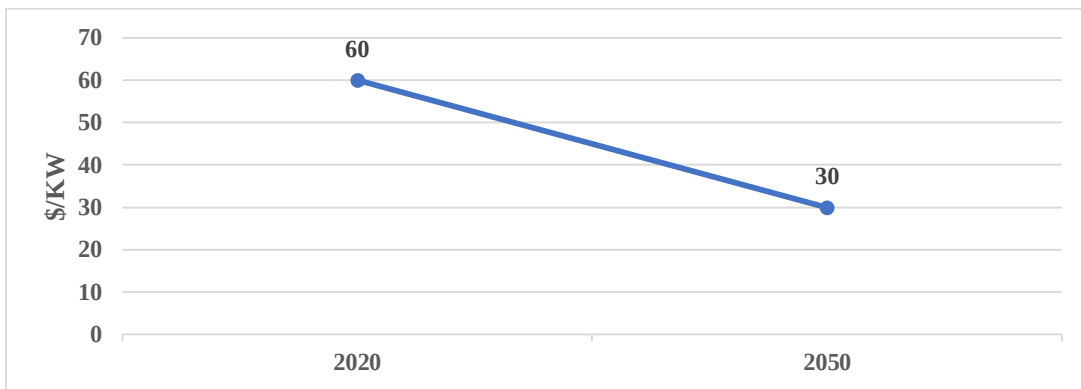
Not: Taşıma maliyetleri; dönüşüm, iletim, dağıtım, depolama ve geri dönüşüm maliyetlerini içermektedir.

Kaynak: IEA, 2019.

Burada dikkat edilmesi gereken husus, hidrojen nihai olarak eğer amonyak olarak kullanılmayacaksa amonyağın taşıma işlemi bittikten sonra tekrar hidrojene dönüştürülmesi gerektiğidir. Hidrojenin uzun mesafeli taşımacılıkta amonyağa, amonyağında hidrojene dönüşüm maliyetleri kg başına 1'er \$ olmak üzere toplamda 2\$'dir (IEA, 2019).

Buna göre Grafik 85'e bakıldığında hidrojenin uzun mesafeli olarak boru hatları aracılığıyla taşınması durumunda yaklaşık 3.500 km kadar olan mesafelerde maliyetler artmakla birlikte gaz olarak taşınması daha avantajlı olabilmektedir. Ancak 3.500 km ve sonrası için bu durum tersine dönmektedir. Bunun nedeni ise, boru hatları içerisinde gaz halinde taşınan hidrojenin taşıma mesafesi arttıkça daha fazla sıkıştırılmaya ihtiyaç duymasıdır (IEA, 2019). Tankerler aracılığıyla yapılan taşımacılıkta da tıpkı boru hattı taşımacılığında olduğu gibi mesafe arttıkça taşıma maliyetleri de artmakta fakat maliyet artışları boru hattı taşımacılığında olduğu gibi keskin olmamaktadır. Bu bakımdan hidrojenin özellikle 1.000 km'nin üzerindeki mesafedeki deniz aşırı ülkelere tankerler aracılığıyla taşınması maliyet açısından daha makul seçim olarak görülmektedir.

Grafik 86'da yakıt pili teknolojilerinin 2020-2050 arası maliyet projeksiyonu verilmektedir. Bu projeksiyona göre yakıt pili teknolojilerinin bu 30 yıllık süre boyunca maliyetlerinde %50'ye varan düşüler meydana gelerek KW başına 60 \$ olan maliyetlerinin KW başına 30 \$'a kadar gerilemesi beklenmektedir.



Grafik 86: Yıllar İtibariyle Yakıt Pillerinin Maliyet Görünümü

Kaynak: Hydrogen Council, 2017a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Yakıt pili teknolojilerinde meydana gelen-gelmesi beklenen bu denli maliyet düşüşlerinin önümüzdeki 20 yıl içerisinde dünya genelinde hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pili teknolojilerinin ve buna bağlı olarak da hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının sayılarında da önemli artışların yaşanması beklenmektedir. European Commission (Avrupa Komisyonu) (2003) tarafından belirtilen raporda 2020 yılında dünya genelinde üretilen her yeni aracın %5'i hidrojeni yakıt olarak kullanırken 2040 yılına kadar bu oranın %35'e kadar çıkacağı ve sayede de dünya genelinde karbon emisyonlarının %1500 (15 MtCO₂'den 240 MtCO₂'ye)'e kadar önlenebileceği belirtilmiştir.

Tablo 60'ta sayısal olarak dünya genelinde mevcut olan ve beklenen hidrojen yakıt pilli araçlar ve hidrojen yakıt ikmal istasyonları verilmiştir. Buna göre 2018 ile 2019 arasında dünya genelinde yakıt pilli araçlarda %95, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarında %25'lik bir artış meydana gelmiştir.

2019 yılı itibariyle dünya genelinde en önemli yakıt pilli araç üreticilerinden olan ABD tüm yakıt pilli araçların; %32'sini üretirken, Çin %25'ini, Kore %20'sini, Japonya %14'ünü, Almanya %3'ünü ve Fransa %1,5'ini üretmiş, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarında ise bu durum; %24'ü Japonya, %17'si Almanya, %13'ü Çin, %7'si ABD, %5'i Fransa ve Birleşik Krallık, %2'si Norveç ve %1'i Avusturya'nın üretimi şeklinde olmuştur (Samsun vd., 2020).

Tablo 60: Yıllar İtibariyle Dünya Genelinde Yakıt Pili Araç ve Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu Sayıları

Yıllar	Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonu (Adet)	Yakıt Pili Teknolojili Araçlar (Adet)
2018	376	12.952
2019	470	25.212
2025	3.276	447.978
2030	7.276	16.282.000
2040	8.476	22.482.000

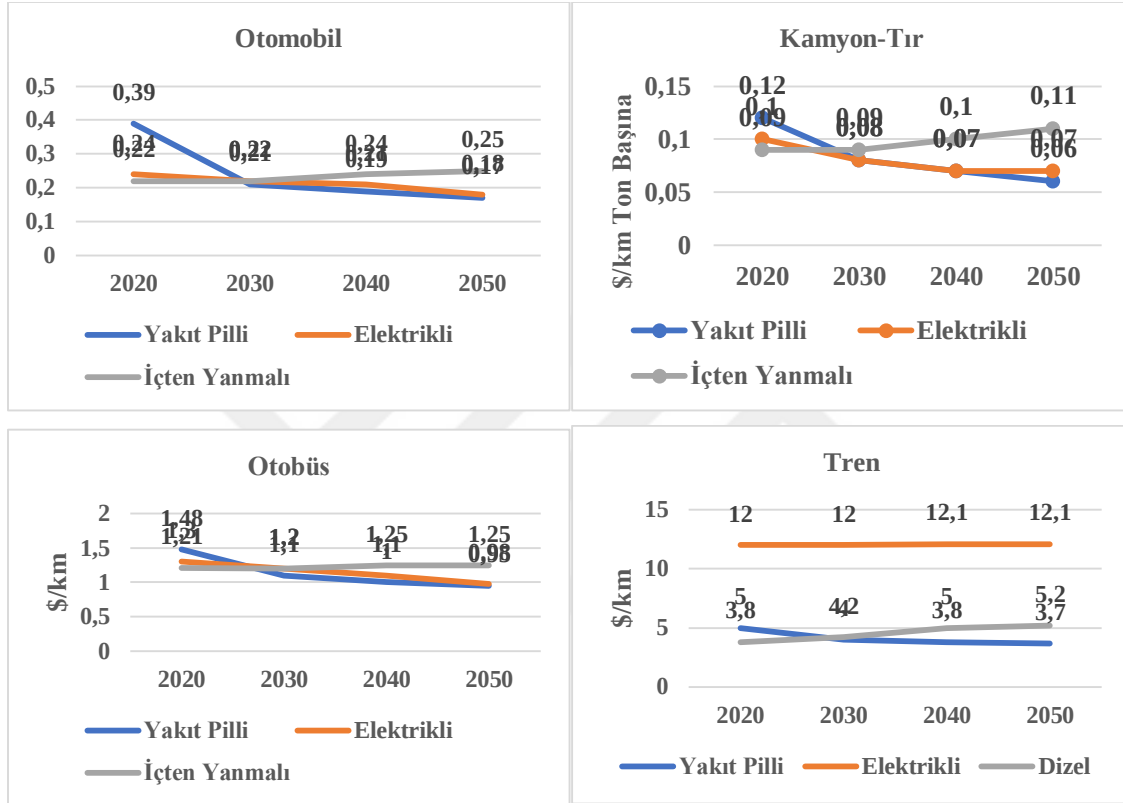
Kaynak: Samsun, vd., 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2019 sonrasında ise dünyanın önde gelen yakıt pilli araç ve hidrojen yakıt ikmal istasyonu üreticilerinden olan Kore 2022 yılına kadar; 79.000'ü binek otomobil ve 2.000'i otobüs

olmak üzere toplamda 81.000 yakıt pilli araç ve 310 yakıt ikmal istasyonu, 2040 yılına kadar da; 5.900.000'ü binek otomobil ve 120.000'i taksi ve 60.000'ü otobüs ve 120.000'i kamyon-tır olmak üzere toplamda 6.2 milyon yakıt pilli araç ve 1.200 hidrojen yakıt ikmal istasyonu üretmeyi ve inşa etmeyi taahhüt etmiştir. Japonya 2025 yılına kadar; 200.000 binek otomobili ve 320 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu, 2030 yılına kadar da; 800.000 binek otomobili ve 1.200 otobüs olmak üzere toplamda 801.200 yakıt pilli aracı ve 900 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu hayata geçirme planı bulunmaktadır. ABD ise, 2030 yılına kadar toplamda 1 milyon yakıt pilli aracı ve 1.000 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu kullanıma sunmayı amaçlamaktadır. Çin 2025 ve 2030 yılları için sırasıyla 50.000 yakıt pilli araç, 300 hidrojen yakıt ikmal istasyonu ve 1 milyon yakıt pilli araç, 1.000 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu devreye sokmayı planlamaktadır. Almanya, 2021 yılına kadar 14 ve 2023 yılına kadar toplamda 41 adet yakıt pilli yolcu trenini ve 2025 yılına kadar 400 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu Fransa ise 2023 yılına kadar 5.000 yakıt pilli aracı, 100 hidrojen yakıt ikmal istasyonunu ve 2028 yılına kadar da 50.000'e kadar yakıt pilli aracı ve 1000'e yakıt hidrojen yakıt ikmal istasyonunu tedavüle sokmayı amaçlamaktadır (Samsun vd., 2020).

Ayrıca hidrojen yakıt pilleri diğer çalışma prensibine sahip araç teknolojileri ile kıyaslandığında da önümüzdeki 30 yıl içerisinde maliyet açısından önemli derecede avantajlı bir konuma geçeceği beklenmektedir. Grafik 87'de Hydrogen Council (Hidrojen Konseyi) (2020) hidrojen maliyet raporundan elde edilen veriler neticesinde farklı çalışma prensibine ve segmentine sahip araç teknolojilerinin aldıkları km cinsinden maliyet projeksiyonları incelendiğinde bu durum açıkça görülmektedir. Buna göre projeksiyon dönemleri içerisinde özellikle içten yanmalı motorlara sahip tüm segmentteki araçların km başına maliyetlerinin 2030 yılından sonra sürekli arttığı görülmektedir. Buna karşılık yakıt pilli araçların tümünde ise 2050 yılına kadar önemli maliyet düşüşlerinin yaşanacağı özellikle kamyon-tır ve tren gibi büyük segmentteki araçlarda yakıt pilli teknolojilerinin rakipsiz olacağı görülmektedir. Yakıt pilli otomobillerin ve otobüslerin ise maliyet açısından elektrikli otomobil ve otobüsleri 2050 yılına kadar yakalayarak küçük de olsa bir maliyet avantajının oluşacağı bu veriler çerçevesinde söylenebilmektedir. Elektrikli araçlar ise trenler hariç 2030'dan sonra yakıt pilli teknolojilerine yakın seyirler izleyecektir.

Buradan da anlaşılacağı üzere ülkelerin maliyet düşüşlerinin de beraberinde getirdiği yakıt pilli araç teknolojileri konusundaki ileriye dönük projeleri sayesinde hidrojen-yakıt pilli araçların dünya genelinde önümüzdeki 20-30 yıl içerisinde hiç kuşkusuz ki daha aktif bir şekilde kullanılmasına neden olacaktır.



Grafik 87: Yıllar İtibariyle Farklı Yakıt Türlerine ve Teknolojilerine Sahip Araç Sistemlerinin Aldıkları Mesafe Cinsinden Maliyetleri

Kaynak: Hydrogen Council, 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Hidrojenin Günümüzde Yakıt Pili Araç Teknolojilerindeki Kullanımları

Toyota Mirai

Toyota Mirai, Toyota'nın ilk defa 2015 yılında satışa sunduğu ilk hidrojen yakıt pil teknolojisine sahip aracı olma özelliğine sahiptir. Araçta, biri arkada biri de onun hemen önünde olmak üzere iki adet sarı renkli hidrojen tankı, hidrojen tanklarının hemen önünde hidrojenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine çeviren yakıt pili, yakıt pilinin hemen önünde ve yakıt piline bitişik halde bulunan yakıt pilinden gelen elektriksel gücü daha

yüksek bir voltajla motora aktaran voltaj yükseltici ve ön tarafta da motor yer almaktadır (Şekil 13).



Şekil 13: Toyota Mirai ve Ekipman Düzenneği

Kaynak: Toyota, 21 Temmuz 2020.

Aracın çalışma prensibinde öncelikle, dışarıdan yakıt piline gelen hava (oksijen) yakıt pilinin önünde bulunan ızgaralar tarafından yakıt pili sisteminin içerisine alınmakta buna eş zamanlı olarak da hidrojen, hidrojen tankının içerisinden yakıt piline doğru geçmektedir. Daha sonrasında yakıt pilinde yer alan hidrojen dışarıdan sisteme giriş yapan hava ile kimyasal reaksiyona girerek elektriksel güç meydana getirmektedir. Oluşan elektriksel güç ise, voltajı yükseltilmiş bir şekilde araç çalıştırıldığında motora iletilmekte ve gaz pedalına basıldığında motordan tekerleklere iletilen güç sayesinde aracın hareket etmesi sağlanmaktadır. Son olarak da kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan su egzoz yardımıyla dışarıya atılmaktadır (Toyota, 21 Temmuz 2020).

Toyota Mirai, çalışma prensibinden de anlaşılacağı üzere kesinlikle karbon emisyonu üretmemekte, sistemden dışarıya sadece su çıkışı gerçekleşmektedir. Toyota Mirai'nin Bazı mekaniksel ve performansa dayalı özellikleri Tablo 61'de verilmektedir.

Tablo 61: Toyota Mirai'nin Mekanik ve Performans Özellikleri

Yakıt Tankı	Değerler	Yakıt Pili	Değerler
Türü	Yüksek Basınçlı Tip-4	Türü	Katı Polimer Elektrolit
Max. Dolum-Çalışma Basıncı (MPa)	87,5-70	Max. Güç Çıktısı (hp)	153

Ağırlıkça Hidrojen Depolama Kapasitesi (%)	5,7	Hacimce-Ağırlıkça Güç Yoğunluğu (KW/l-KW/lg)	3,1-2
Hacim (Ön Tank-Arka Tank) (litre)	60-62,4	Hacim (litre)	37
Kullanılan Malzeme Yapısı (İç-Orta-Yüzey Bölüm)	Plastik Astar-Karbon Fiber Eklentili Plastik-Cam Elyaf Eklentili Plastik	Ağırlığı(kg)	56
Yakıt İkmal Süresi (dk)	5	Emisyon Değeri (CAB)	Sıfır
Diğer			
Menzili (km)	483		
0-60 Km (saniye)	9		
Max. Elektriksel Çıktı (KW)	9		

Kaynak: Toyota, 22 Temmuz 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Mercedes-Benz GLC F-CELL

Mercedes Benz GLC F-Cell, Alman Daimler firması tarafından 2019 baharında küçük ölçekli olarak satışa sunulmaya başlanan araçtır. Araç, hem hidrojen destekli yakıt pilli hem de hibrit olarak çalışma özelliğine sahiptir. Araç, yakıt pili modunda gaz halinde saf hidrojen kullanırken hibrit modda elektrik enerjisini kullanmaktadır. Aracın ekipman düzeneği Şekil 14'te verilmektedir.



Şekil 14: Mercedes-Benz GLC Fuel Cell ve Ekipman Düzeneği

Kaynak: Daimler, 23 Temmuz 2020.

Bu düzeneğe göre, araçta biri yatay diğeri dikey şeklinde yerleştirilmiş iki adet hidrojen tankı (1), hidrojen giriş yeri (2), elektrik turbo şarj ünitesi (3), açık hava giriş tertibatı ve hava filtresi (4), hava soğutucusu (5), hava nemlendiricisi (6), yakıt pili haznesi (7), güç dağıtım ünitesi (8), voltaj dönüştürücüsü (9) ve hava tahliye sistemi (10) bulunmaktadır (Daimler, 23 Temmuz 2020). Çalışma prensibi ise, Toyota Mirai’de olduğu gibidir.

Aracın yakıt pili modundaki yakıt ikmal süresi 3 dk’dır. Bu değer, içten yanmalı motorlarla aynı seviyededir. Araç hibrit modda ise 7,4 KW kapasitede dahili şarj ekipman yapısına sahiptir. Bu da aracın kolayca (ev prizlerinden, kamu şarj istasyonlarından vb.) şarj edilmelerine olanak sağlamaktadır. Aracın yakıt ikmal-şarj süresi (%10’dan %100’e) yaklaşık 1,5 saati bulmaktadır. Bunlara ek olarak araç hem yakıt pilli hem de hibrit olmak üzere her iki modda da karbon emisyonu üretmemekte ve yüksek güvenlik standartlarına sahip olmaktadır (Mercedes-Benz, 23 Temmuz 2020).

Araç içerisindeki yakıt pili sistemi ve hibrit sistem mukayese edildiğinde yakıt pil sistemi, hibrit sisteme göre oldukça avantajlı olabilmektedir. Bu avantajlı durumların başında da yakıt bitişinden sonraki menzili (mesafesi) gelmektedir.

Araç yakıt pili modda iken yakıt bitse bile hibrit moda göre 50 km daha fazla mesafe katedebilmektedir. Bunun dışında araç yakıt pili modunda, tek seferde 400 km yol alabilmektedir. İkinci avantaj teşkil eden durum, yakıt ikmal süreleri olmaktadır. Hibrit moddaki aracın, yakıt pili moduna kıyasla 1,5 saat gibi uzun ikmal-şarj süresi mevcuttur. Diğer avantajlı durum ise, yakıt pili uzun mesafeli yolculuklar için ideal kullanım sunarken hibrit sistem kısa mesafeli yolculuklar için ön plana çıkmaktadır (Daimler, 23 Temmuz 2020; Mercedes-Benz, 23 Temmuz 2020).

Tablo 62: Mercedes Benz GLC’nin Yakıt Pili ve Hibrit Moddaki Mekanik ve Performans Özellikleri

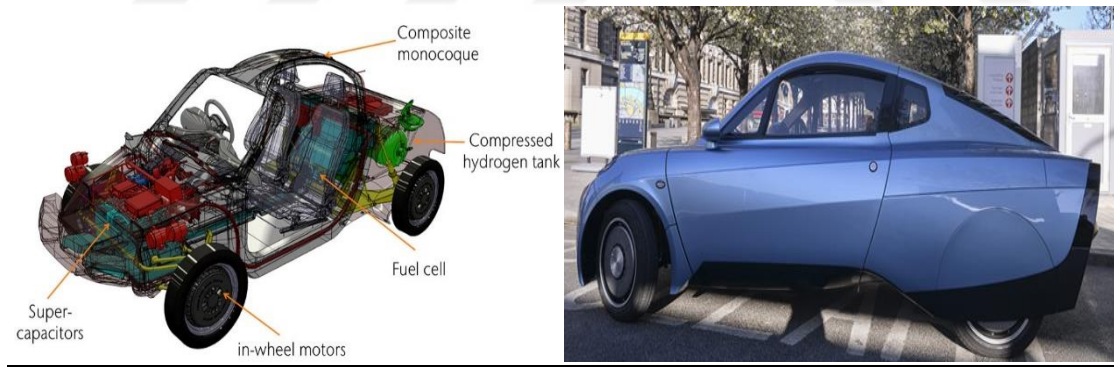
Parametreler	Değerler
Yakıt Pili Türü (Her İki Sistemde)	Lityum İyon
Yakıt Pili Kapasitesi (Her İki Sistemde) (KWh)	13,5
Hidrojen Tankının Malzeme Yapısı	Karbon Fiber

Tank Ağırlığı (kg)	4,4
Tank Basıncı (bar)	700
Yakıt Tüketimi (gH₂/km)	9,1
Carbon Emisyonu (Her iki Sistemde) (g)	0
Güç Tüketimi (Yakıt Pili) (KWh/km)	0,18
Yakıt İkmal Süresi (Yakıt Pili-Hibrit) (dk)	3-90
Menzil (Yakıt Pili) (km)	400
Elektriksel Çıktı (Hibrit) (KW)	160

Kaynak: Daimler, 23 Temmuz 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Rasa

Rasa, İngiliz menşeyli Riversimple Şirketi tarafından 2016 yılında üretilmiş olan hidrojen yakıt özelliğine sahip bir araçtır (Wikipedia, 8 Ağustos 2020). Araç, iki kişilik olarak dizayn edilmiş olup, aracın en arka kısmında bir adet basınçlı hidrojen tankı, onun hemen önünde proton değişimli membran (PEM) içerikli yakıt pili, her bir tekerliğe bağlı olan dört adet elektrik motoru ve en ön tarafında süper kapasitör yer almaktadır (Şekil 15).



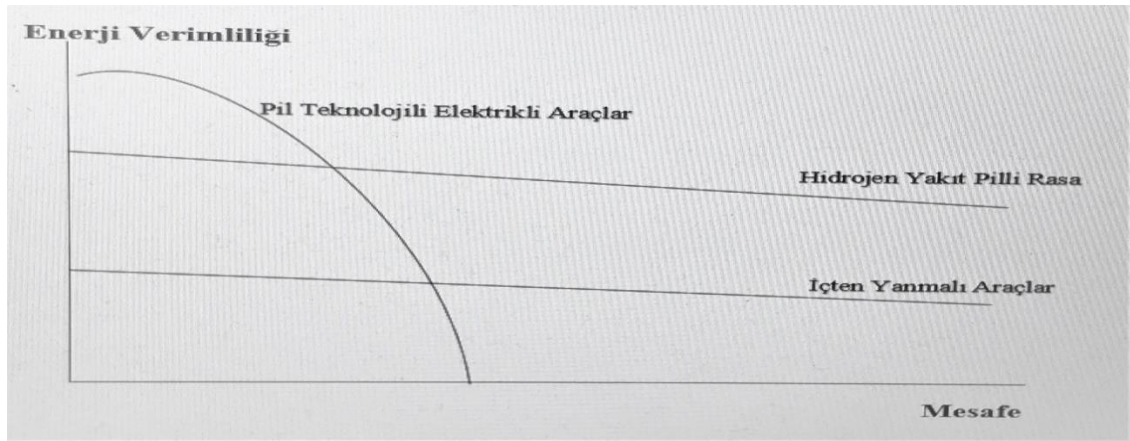
Şekil 15: Rasa ve Ekipman Düzenneği

Kaynak: Riversimple, 24 Temmuz 2020.

Rasa'nın diğer araçlardan farkı Şekil 15'te de görüleceği üzere motorun kaput bölgesinde değil de tekerleklerde yer almasıdır. Motorun tekerleklerde yer alması, araca dört çekiş özelliği kazandırmakta ve böylece aracın yola daha güvenli bir tutuş sağlamasına yardımcı olmaktadır. Aracın kaput bölgesinde ise, bir kapasitör yer almaktadır. Bu kapasitör, aracın duraklama esnasında ısı şeklinde kaybolan kinetik enerjiyi elektrik

enerjisi olarak absorbe ederek motora geri göndermektedir. Böylece enerji kaybını ortadan kaldırmakla birlikte enerjinin araç içerisinde hızlı bir şekilde dolaşımını sağlamaktadır (Riversimple, 24 Temmuz 2020).

Ayrıca Rasa, diğer çalışma prensibine sahip araç teknolojilerine göre özellikle uzun mesafeler için enerji verimliliği konusunda da oldukça ileri düzeydedir. Grafik 88’de de görüleceği üzere Rasa’nın mesafe arttıkça diğer çalışma prensibine sahip araç teknolojilerine kıyasla enerji verimliliği daha üst seviyelerde olmaktadır. Bu da Rasa’yı uzun mesafeli yolculuklar için daha tercih edilebilir kılmaktadır.



Grafik 88: Rasa ve Diğer Araç Teknolojilerini Enerji Verimliliği Karşılaştırmaları
Kaynak: Riversimple, 25 Temmuz 2020.

Bununla birlikte Rasa’nın mekanik ve performansa dayalı özellikleri Tablo 63’de verilmektedir. Buna göre araç, karbon emisyonu üretmemekte ve menzili diğer hidrojen yakıt pilli araçlarla benzer olmakla birlikte km başına düşük hidrojen tüketimi özelliği göstermektedir.

Tablo 63: Rasa’nın Mekanik ve Performans Özellikleri

Parametreler	Değerler
Aracın Ağırlığı (kg)	580
Hızı (km/s)	97
Menzili (km)	483
Yakıt Tüketimi (gH ₂ /km)	5
Hidrojen Yakıt Hücresi Kapasitesi (KW)	8,5
Pil Türü	Lityum İyon
Kullanılan Elektrik Motoru (Adet)	4

Elektrik Motorundaki Toplam Güç (KW)	16
Karbon Emisyonu	0

Kaynak: Riversimple, 24 Temmuz 2020; Riversimple, 25 Temmuz 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunların dışında yakın zamanda üretilmiş olan hidrojen yakıt pil teknolojisine sahip araçlar; Hyundai Nexo ve Nikola One'dir (Şekil 16). Bu araçlardan Hyundai Nexo, 2018 yılında üretilmiş olup 600 km'lik menzile, 5 dk'lık yakıt ikmal süresine, 120 KW değerinde motor gücüne ve 150 litrelik hidrojen yakıt deposuna sahiptir. Araç, saatte 180 km'lik maksimum hıza ve 0'dan 100 km'ye 10 saniyede ulaşabilmekte, sessiz ve emisyonlu çalışabilmektedir (Hyundai, 27 Temmuz 2020). Nikola One ise, Nikolo Motto şirketi tarafından 2016 yılında tır segmentinde üretilmiş olan hidrojen yakıt pili teknolojisine sahip bir araçtır. Aracın yakıt ikmal süresi 10 ila 15 dk arasındadır. Bu süre aynı segmentteki dizel yakıtı sahip araçlarla aynı olmakla birlikte, elektrikli araçlardan ise en az %17 daha düşük olmaktadır. Bunların dışında araç, hidrojen türü olarak sıkıştırılmış hidrojen kullanmakta, TİP IV karbon fiber yapıya sahip yakıt tankına sahiptir (Nikolamotor, 27 Temmuz 2020).



Şekil 16: Hyundai Nexo ve Nikola One

Kaynak: Hyundai, 27 Temmuz 2020; Nikolamotor, 27 Temmuz 2020.

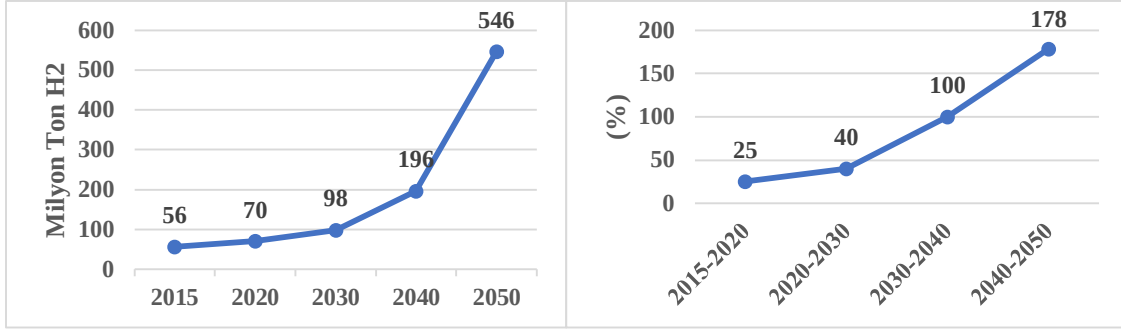
Yakıt pili teknolojisi, buraya kadar ki olan bölümde hem teorik hem de pratik olarak incelendiğinde performans özellikleri bakımından geleneksel içten yanmalı motorlarla benzer seyirler izlemekle birlikte içten yanmalı motorlara göre emisyon üretmemesi ve sessiz çalışmaya olanak tanınması, elektrikli araçlara göre ise daha düşük yakıt ikmal sürelerine ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip olması nedeniyle ön plana

çıkılmaktadır. Bununla birlikte hidrojenin, daha önceden de belirtildiği üzere diğer yakıtlara göre (benzin, doğalgaz, kömür vb.) daha verimli bir yakıt olması, hidrojeni bu yakıt türlerine ve teknolojilerine göre ön plana çıkarmaktadır. Bu sebeple hidrojen enerjisine ve teknolojilerine yapılacak olan yatırımların, AR-Ge çalışmalarının ve kamu-özel sektör teşviklerinin hidrojen ekonomisinin gelişmesinde oldukça önemli olacağı aşikar olmaktadır.

Hidrojen Talebi, Yatırımları ve Kamu-Özel Sektör Çalışmaları

Bir enerji kaynağının ne kadar önemli olduğu ve ne kadar yüksek potansiyel taşıdığı o enerji kaynağının kullanıldığı alanın önem derecesine ve talep miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Buna göre bir enerji kaynağının bir ülke için önem arz eden sektörlerde ne kadar çok kullanılma imkanı varsa o enerji kaynağı o ülke için o denli önemli olmakta ve yüksek potansiyel taşımaktadır. Ulaşım, enerji ve sanayi sektörleri ülke ekonomileri açısından gelişmişlik yolunda olmazsa olmaz sektörlerin başında gelmektedir. Hidrojen ise, enerji kaynağı olarak bu sektörlerde önemli derecede kullanılabilme potansiyeline sahip olmakla birlikte sıfır emisyon, düşük maliyet ve yüksek verimlilik gibi önemli avantajları da beraberinde getirebilmektedir.

2015-2050 arası dünya hidrojen talep ve talep değişim projeksiyonları incelendiğinde, gelecek 35 yıl içerisinde dünya hidrojen talebinde ciddi miktarlarda ve oranlarda artışların yaşanacağı görülmektedir. Özellikle talep artış artışlarının 2030-2040 ve 2040-2050 arası dönemlerde yüksek boyutlara ulaşması beklenmektedir. Bu artışlar, 2030-2040 arası dönemde %100, 2040-2050 arası dönemde ise %178 oranlarda artış şeklindedir (Grafik 89). Talep artış oranları diğer enerji kaynakları olan fosil enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları ile kıyaslandığında 2030-2040 arası dönemde bu oranlar; fosil enerji kaynaklarında % 6 artış ve yenilenebilir enerji kaynaklarında ise %25 artış şeklinde olmaktadır (IEA, 2018). Bu da hidrojenin 2030-2040 arasında dünya genelinde diğer enerji kaynaklarına göre daha bir iştahlı şekilde talep edileceğinin bir göstergesidir. Grafikte 90'da belirtilecek diğer bir nokta da hidrojen talep artış hızlarının belirtilen dönemleri içerisinde sürekli olarak artan olarak devam eden şeklinde olmasıdır.



Grafik 89: 2015-2050 Arası Dönemde Dünya Geneline Hidrojen Talebi (Solda) ve Değişimleri (Sağda)

Kaynak: Hydrogen Council, 2017b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bununla birlikte hidrojenin dünya genelinde artan talebi sayesinde 2050 yılına kadar küresel enerji talebinin %18'ini karşılayabilir duruma geleceği öngörülmektedir ve 2050 yılında yaklaşık 550 milyon ton H2 olması beklenen dünya hidrojen talebinin %28'inin ulaşım, %21'inin sanayi, %14'ünün konut, %12'sinin enerji üretim ve %15'inin de diğer sektörler tarafından talep edilmesi beklenmektedir. (Hydrogen Council, 2017b).

Hidrojen, dünya genelinde önemini her geçen gün daha fazla arttıran geleceğin önemli enerji kaynaklarından biri olma yolunda hızla ilerlemektedir. Bu bakımdan gerek kamu-özel sektör ortaklıkları gerek önemli boyutlardaki AR-GE çalışmaları gerekse de pazara giriş teşvikleriyle pek çok ulusal ve uluslararası şirket hidrojen teknolojilerine önemli boyutlarda yatırım gerçekleştirmektedir.

ABD Enerji Bakanlığı tarafından 2003 yılında aralarında Ford, Daimler Chrysler, Shell, Exxon Mobil ve BP gibi önemli araç üreticilerinin ve yakıt şirketlerinin de bulunduğu hidrojen yakıtlı araç teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik kamu-özel ortak işbirliği ile geliştirilen FreedomCAR ve Fuel Partnership projelerine toplamda 500 milyon \$'lık finansman sağlanmıştır. Bunun yanında 2000 yılında 2000-2040 ve daha sonrasını da kapsayan süreç için içerisinde alt yapı, AR-GE ve pazara giriş gibi çalışmaları da barındıran 4 aşamalı hidrojen ekonomisine geçiş programı yürürlüğe konulmuştur (UNEP, 2006). Özel teşebbüs olarak ABD'li Cummins şirketine bağlı Hydrogenectic firması Fransız menşeli Alstom Transport firması ile Avrupa'daki banliyö trenlerine yönelik hidrojen yakıt pilleri geliştirmek için 2015-2025 yıllarını kapsayacak şekilde 50 milyon avroluk anlaşma imzalamışlardır (IEA, 2017).

Japonya hükümeti, 2003 yılında başlayan ve 2020'ye kadar sürmesi planlanan hidrojen teknolojisinin ve altyapısının geliştirilmesine yönelik olan Yeni Hidrojen Projesi (NEP)'ne 320 milyon \$'lık fon aktarımında bulunmuştur (UNEP, 2006). Ayrıca pek çok üniversite (Kawasaki, Obayashi, Osaka vb.) ve özel sektör (J-Power, Mitsubishi, Chiyoda vb.) işbirliği ile oluşturulan ve Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Gelişme Örgütü (NEDO) tarafından desteklenen projeler kapsamında 2018 yılında çeşitli formlardaki hidrojenin doğalgaz ile kompoze edilmesiyle çalışan 1.000 KW'lık santral inşası gerçekleştirilmiş ayrıca farklı ülkelerden (Avusturalya, Brunei vb.) Japonya'ya hidrojen üretimi sağlamaya ve hidrojen altyapısı oluşturmaya yönelik çalışmalar yapılmış nihayetinde 2020 yılında yaklaşık 210 ton hidrojen temini sağlanmıştır (Hydrogen Council, 2017b).

Almanya, kamu-sanayi işbirliği tarafından finanse edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından ve çelik üretimi sırasında açığa çıkan gazlardan hidrojen üretimine yönelik olarak Carbon2Chem projesine yaklaşık 2 milyon \$ kaynak sağlamıştır. Fransa'nın H2V şirketi, doğalgaz şebekelerine empoze edilmek üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından yıllık 500.000 ton hidrojen üretimini gerçekleştirecek üretim kapasitelerini oluşturmaya yönelik 4 milyar \$'lık yatırım planı bulunmaktadır. Hollanda'da ise Statoil, Vattenfall ve Gasunie şirketlerinin ortaklığında 2017 yılında karbon emisyonlarını yılda 4 milyon ton azaltmayı hedefleyen yaklaşık 1.500 MW kapasiteye sahip bir hidrojen güç santralinin kurulumunu gerçekleştirmişlerdir (Hydrogen Council, 2017b).

Avusturalya'da Commonwealth Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü'nün yakıt pilli araç teknolojilerine yönelik amonyaktan yüksek saflık derecesine sahip hidrojen eldesi için çalışmaları mevcuttur. Avusturya'nın Voestalpine limanında Alman teknoloji devi Siemens tarafından geliştirilen pilot bir elektrolizör tesisi endüstriyel alanda kullanılmak üzere sıfır karbon emisyonuna sahip hidrojen üretimi gerçekleştirecektir. Kore, 2004 yılından 2011 yılına kadar hidrojen teknolojilerini geliştirmeye yönelik olarak yaklaşık olarak 600 milyon \$'lık bütçe ayrılmıştır (IEA, 2017; UNEP, 2006).

Belirli başlı bazı ülkeler tarafında kamu-özel sektör işbirliğine dayanan hidrojen ekonomisine geçişin de önünü açacak olan teknoloji ve alt yapı yatırımları ve çalışmaları bu şekilde olmakla birlikte dünya genelinde hidrojen ekonomisine 2030 yılına kadar kümülatif (birikmiş) olarak toplamda 280 milyar \$'lık yatırım planı mevcuttur. Bu yatırımların, %40'a yakını hidrojen üretimine ilişkin olurken, %30'a yakınının hidrojen altyapısına ve tedarik zincirine, %32'sinin ise nihai kullanım alanlarına yönelik olması beklenmektedir (Tablo 64). Bu yatırımlarla birlikte hidrojen ekonomisini dünya genelinde 2030 yılına kadar 140 milyar \$ ve 2050 yılına kadar da yaklaşık 4 milyar \$'a ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 64: 2018-2030 Arası Hidrojen Enerjisine Yapılması Planlanan Kümülatif Yatırımlar

Yatırım Türleri	Yatırım Miktarı (Milyar \$)	Dağılımlar (%)
Hidrojen Üretimi	110	39
Hidrojenin Depolanması, Taşınması ve Dağıtımı	80	29
Nihai Kullanımı (Hammadde, Endüstriyel Enerji vb.)	90	32
Toplam	280	100

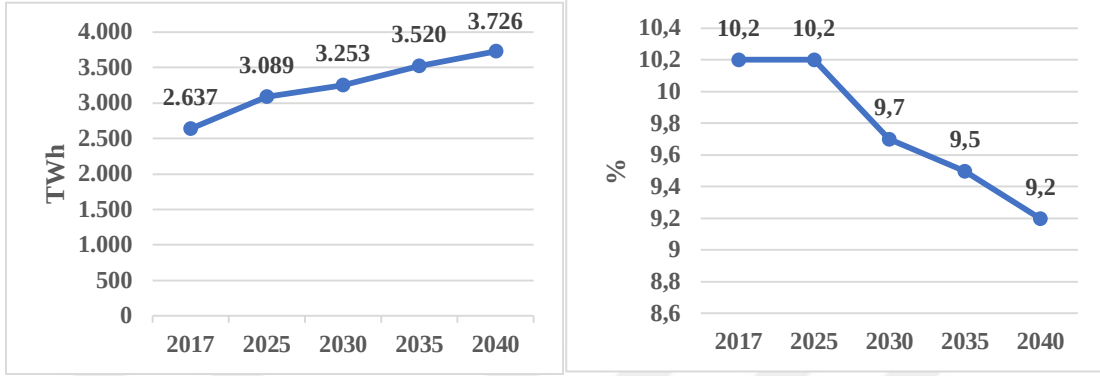
Kaynak: Hydrogen Council, 2017b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur

3.4. Nükleer Enerji

Nükleer Filyon

Nükleer filyona dayalı küresel elektrik üretimlerinin projeksiyonel görünümüleri incendiğinde, dünya genelinde nükleer filyona dayalı elektrik üretimlerinin 2040 yılına kadar olan süre içerisinde toplamda %41 oranında artarak yaklaşık 4 PWh değerine ulaşması beklenmektedir. Ancak aynı projeksiyon dönemi içerisinde nükleer filyona dayalı elektrik üretimlerinin dünya toplam elektrik üretimleri içerisindeki paylarına bakıldığında, nükleer filyona dayalı elektrik üretimlerinin dünya toplam elektrik toplam elektrik üretimleri içerisindeki paylarının sürekli olarak düşeceği görülmektedir (Grafik 90). Bunun nedeni, Çin, Rusya ve G. Kore gibi ülkelerde nükleer filyona dayalı enerji kapasitelerinde artış meydana gelse de dünyanın önemli filyon üreticisi olan ülkelerde meydana gelen kapasite-üretim düşüşleri (bk. Tablo 28) ve yeni enerji kaynaklarının keşfine bağlı olarak enerji üretim teknolojilerinde meydana gelen gelişmelerdir (örneğin

yenilenebilir, hidrojen vb. enerji teknolojileri). Bu da nükleer fisyonu dayalı enerji üretimlerinin önümüzdeki yıllar içerisinde dünya genelinde önemini yavaş yavaş kaybetmeye başlayacağını bir göstergesidir.



Grafik 90: 2017-2040 Arası Dönemde Dünya Geneline Nükleer (Fisyon) Elektrik Üretimleri (Solda) ve Toplam Elektrik Üretimi İçerisindeki Payları (Sağda)

Kaynak: IEA, 2018’den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur

Nükleer Füzyon

Dünya Geneline Nükleer Füzyon Çalışmaları

TFTR (Tokamak Füzyon Test Reaktörü)

TFRT (Tokamak Füzyon Test Reaktörü), 1974 yılında DOE (ABD Enerji Bakanlığı) tarafından projelendirilmiş ve AEC (ABD Atom Enerjisi Komisyonu) tarafından PPL’de (Princeton Plazma Fiziği Laboratuvarı) geliştirilmek üzere onaylanmış dünyanın ilk nükleer füzyon test reaktörüdür (Bell, 2016). Reaktörün ve tesisinin görünümü Şekil 17’de gösterilmektedir.



Şekil 17: TFRT (Tokamak Füzyon Test Reaktörü) Tesis

Kaynak: PPPL, 10 Ağustos 2020.

Projede temel olarak üç ana hedef üzerinde durulmuştur. Bunlar; tokomaklara ait plazma fiziğinin incelenmesi, reaktör ve plazma sisteminde meydana gelebilecek teknik sorunlara karşı deneyimlerin kazanılması ve manyetik alanlarla çevrilmiş dairesel plazma sisteminde döteryum-trityum reaksiyonuna bağlı füzyon gücünün ve 1 ila 10 MJ değerinde plazma enerjisinin üretimidir (Meade, 1995). Buna bağlı olarak sistem; içerisinde 20 adet manyetik bobinin bulunduğu 2,5 birim yarıçapa ve 5 m uzunluğa sahip dairesel alanı, 20 adet paslanmaz çelik yapısına sahip 2,6 m uzunluğunda ana yarıçapa ve 1,1 m uzunluğunda küçük yarıçapa sahip vakum kabını, çeşitli plazma bileşenlerini, ısıtma ve enjeksiyon sistemlerini, trityum taşıma, dağıtım ve çıkış sistemlerini ve koruyucuları kapsayacak şekilde dizayn edilmiştir (Bell, 2016).

TFTR’de sistem çalışmalarına 1982 yılında başlanmış olup, füzyon çalışmaları 1997 yılında sonlandırılmıştır. Buna bağlı olarak 1982’den 1993 yılına kadar geçen 11 yıllık süreçte döteryum-trityum reaksiyonuna dayalı plazma çalışmalarının alt yapısı oluşturulmuş ve 1993 yılında döteryum-trityum reaksiyonuna dayalı ilk füzyon denemeleri gerçekleştirilmiştir (PPPL, 11 Ağustos 2020).

Kasım ve Aralık 1993’te olmak üzere sırasıyla %98 döteryum - %2 trityum ve %50 döteryum - %50 trityum içeriğine sahip çok sayıda füzyon denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler neticesinde 2 MA plazma akımında, 5 tesla dairesel alanda, 31 MW nötr ışın gücü (füzyon enjektisi)’nde, 12 Kev (139 milyon °C) elektron ve 29 Kev (336 milyon °C) iyon sıcaklığında ve 5 MJ plazma enerjisinde 65 KW’lık füzyon gücü elde edilmiştir. 1994 yılında ise döteryum-trityum reaksiyonuna dayalı füzyon parametrelerinde 1993 yılına kıyasla önemli artışlar gerçekleşmiştir. Bu denemelerde plazma akımı 2,5 MA’e, dairesel alan 5,1 tesla’ya, nötr ışın gücü 34 MW’a, iyon sıcaklığı 44 Kev (510 milyon °C)’e, plazma enerjisi 6,5 MJ’e ve füzyon gücü de 14 bin kat artırılarak 9,3 MW’a ulaştırılmıştır.

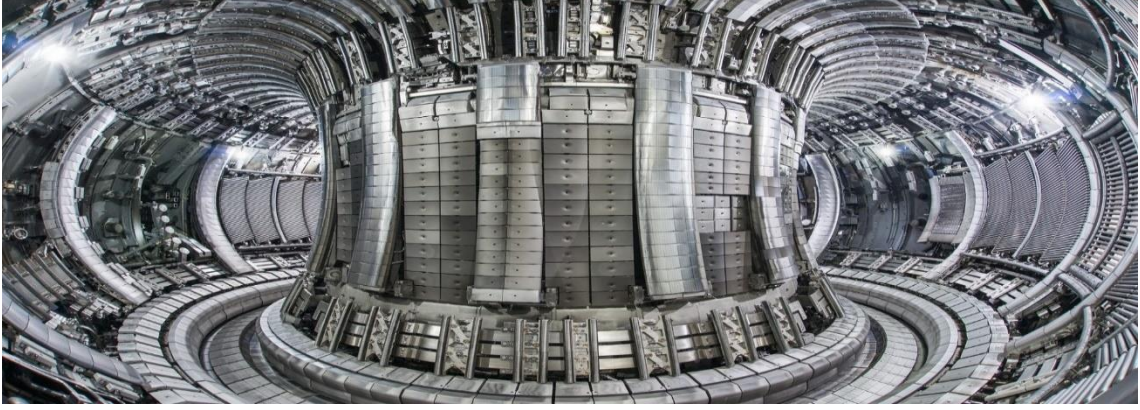
Ayrıca yine bu dönem içerisinde TRFR’ de o zamana kadarki en yüksek füzyon gücü elde edilmiştir. Döteryum-trityum reaksiyonuna dayalı sisteme enjekte edilen yaklaşık 40

MW'lık nötr ışın gücü sonucunda ve 0,18 saniye plazma hapsetme süresi boyunca 10,7 MW'lık füzyon çıktısına ulaşılabilmiş, bu enerji ile o dönemin şartlarında 3 binden fazla evin enerji ihtiyacı karşılanabilir düzeye ulaşılabilmektedir. Elde edilen füzyon verimi (çıktı füzyon gücü/enjekte edilen nötr ışın gücü) de $Q=0,27$ olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte elde edilen 7 MJ plazma enerji değeri ile 1976 yılında hedeflenen 1-10 MJ'lük plazma enerji değerine yüksek oranda ulaşılabilmektedir. Buna ek olarak diğer füzyon parametreleri; plazma akımı 2,7 MA, dairesel manyetik alan 5,6 tesla, elektron sıcaklığı 13 Kev (151 milyon °C), iyon sıcaklığı 36 Kev (410 milyon °C) olarak gerçekleşmiştir (Hawryluk vd., 1998; PPPL, 11 Ağustos 2020).

1993'ten 1995 yılına kadar geçen süreç içerisinde trityumun saf olarak kullanıldığı 400'ün üzerinde ve içerisinde nötr ışın enjeksiyon ısıtmalı, iyon sikloton frekans aralığı ısıtmalı olarak toplamda 12 binden fazla ve 1997 yılına kadar da toplamda 21 binden fazla plazma denemeleri gerçekleştirilmiştir. Proje toplamda 263 milyon \$'a mal olmuştur. Bu maliyetin büyük bir çoğunluğunu %89'u işletme ve bakım maliyetleri, bunların haricinde %0,05'ini sistem iyileştirme, %0,03'ünü projeye dışarıdan destekte bulunan çeşitli üniversitelere ve laboratuvarlara ayrılmış olan çalışma ödeneklerinden ve %10'u da diğer maliyetlerden oluşmuştur (Bell, 2016; PPPL, 1995).

JET (Avrupa Ortak Torusu)

JET (Avrupa Ortak Torusu), 1978 yılında Eurotom (Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu), İsveç ve İsviçre önderliğinde İngiltere ile birlikte Avrupa'da nükleer füzyon gücünün elde edilmesi ve bunun test edilmesine yönelik olarak başlatılmış olan bir projedir. Proje, İngiltere'nin Culham Füzyon Araştırmaları Merkezi'nde yürütülmektedir. Proje'nin amacı, füzyon gücünün elde edilmesi kapsamında daha sonraki dönemlerde üretilecek olan füzyon çalışmalarına özellikle de ITER projesine bir dayanak- bir referans oluşturabilmektir. Bu bakımdan JET, ITER'in mini bir versiyonu olarak kabul edilmektedir (World Nuclear Association, 4 Ağustos 2020). JET, tokamak türü bir füzyon reaktörüdür ve içyapısı Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18: JET Füzyon Reaktörü

Kaynak: CCFE, 12 Ağustos 2020.

Reaktör, mekanik bir iskelet etrafına yerleştirilmiş transformatör kanatlar, iç ve dış poloidal alan bobinler, 20 m²'lik bir vakum tankı ve toroidal alan bobinlerinden meydana gelmektedir. Ayrıca sistem, 100 m³'lük plazma hacmine sahiptir (Wesson, 1999).

JET ile ilgili ilk tasarım çalışmalarına 1973 yılında başlanmış olup 1975 yılında tasarımın ana hatları belirlendikten sonra 1979 yılında ilk inşaat çalışmaları başlamıştır. Haziran 1983'te 3MA plazma akımına ve yaklaşık 23 milyon °C'lik elektron sıcaklığına sahip ilk plazma üretilmiştir. 1988'de plazma akımı 7MA değerine, elektron sıcaklıkları yaklaşık 232 milyon °C'ye ve nötr ışın enjeksiyonu 21 MW'a çıkarılarak toplamda 35 MW'lık bir ısı güç elde edilmiş, bu değerler altında plazma kabı içerisinde 1 saniye süresince plazma hapsi gerçekleşmiştir. Kasım 1991'de ise ilk trityum denemeleri başlamıştır. Bu denemelerde %50 döteryum - %1 trityum ve %50 döteryum - %10 trityum olmak üzere iki füzyon çarpışması gerçekleştirilmiş, her iki çarpışma sonucunda yaklaşık 2 dakika boyunca 1.7 MW'lık füzyon gücü üretilmiştir. 1997'de dünya genelinde o zamana kadarki en yüksek füzyon gücü elde edilmiştir. Döteryum-trityum reaksiyonuna bağlı olarak sisteme enjekte edilen 24 MW'lık enerji sonrasında yaklaşık 464 milyon °C elektron sıcaklığında ve 14 saniye boyunca 16 MW'lık füzyon gücü elde edilmiştir ($Q=0,66$) (Wesson, 1999).

JET'te, 2009-2010 arasında, berilyum-tungsten yapılı plazma cephe duvarı kurarak bunu ITER için test edilmeye ve 2019-2020 arası dönemde de daha uzun süreli füzyon gücü elde edebilmek için döteryum-trityum denemelerine hazırlanılmıştır. JET'in bu başarısı

2013 yılında inşa edilen dünya'nın ilk ticari nitelikteki füzyon reaktörü olan ITER'in oluşumunu hazırlayarak gelecekteki nükleer füzyon tesislerde kullanılmak üzere tokamak'a olan ilgiyi ve güveni attırmıştır. (CCFE, 15 Ağustos 2020).

Tüm bunların yanında JET projesi, CCFE'de 30'u Avrupa'dan ve 70'i ABD, Japonya, Rusya ve G. Kore'den olmak üzere toplamda 450 bilim adamı, mühendis ve üniversitelerin yer aldığı bir ekip tarafından sürdürülmektedir (EUROfusion, 2019). Proje toplamda 438 milyon \$'a mal olmuş, bunun %50'si AB tarafından finanse edilmiştir (EUROfusion, 15 Ağustos 2020; Wikipedia, 8 Ağustos 2020).

EAST (Deneysel Gelişmiş Süper İletken Tokomak)

EAST (Deneysel Gelişmiş Süper İletken Tokomak), 2006 yılında CASHIPS (Çin Bilimler Akademisi Hefei Fizik Bilimleri Enstitüsü) bünyesinde inşa edilmiş, ITER için bir test reaktörü olma özelliğine sahip bir nükleer füzyon reaktörüdür. Reaktörde ilk plazma çalışmaları Eylül 2006'da başlamıştır ve bu tarihte 3 saniyelik plazma süresi boyunca 200 KA'lık elektriksel akım üretilmiştir (CHINA.ORG.CN, 16 Ağustos 2020).



Şekil 19: EAST (Deneysel Gelişmiş Süper İletken Tokomak) Nükleer Füzyon Tesisi

Kaynak: CASHIPS, 17 Ağustos 2020.

1 yıl sonra yani 2007 yılında reaktörden elde edilen plazma süresi % 67 arttırılarak 5 saniye ve elektriksel akım da %150 arttırılarak 500 KA olacak şekilde geliştirilmiştir. Çalışmaları takiben 2011 yılında plazma, yaklaşık 1 dk boyunca 50 milyon °C'lik sıcaklık değerine ulaşabilmiştir (CHINA.ORG.CN, 16 Ağustos 2020). EAST'ta en yüksek füzyon

parametreleri 2018 yılında elde edilmiştir. Reaktöre enjekte edilen 10 MW'lık güç sonrasında 3,5 tesla dairesel alanda 1 MA plazma akımında yaklaşık 2 dk boyunca 100 milyon °C'lik plazma sıcaklığı ve 100 KJ'lük plazma enerjisi elde edilebilmiştir (CASHIPS, 18 Ağustos 2020; CASHIPS, 19 Ağustos 2020).

Wendelstein 7-X

Bir stellarator tipli deneysel füzyon reaktörü olan Wendelstein 7-X, 2014 yılında Almanya'nın kuzeyindeki Greifswald bölgesinde bulunan Max Planck Plazma Fiziği Enstitüsü'nde inşa edilmiştir (Ongena - Ogawa, 2016). Buna bağlı olarak da tesisinin görünümü Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 20: Wendelstein 7-X Nükleer Füzyon Tesisi

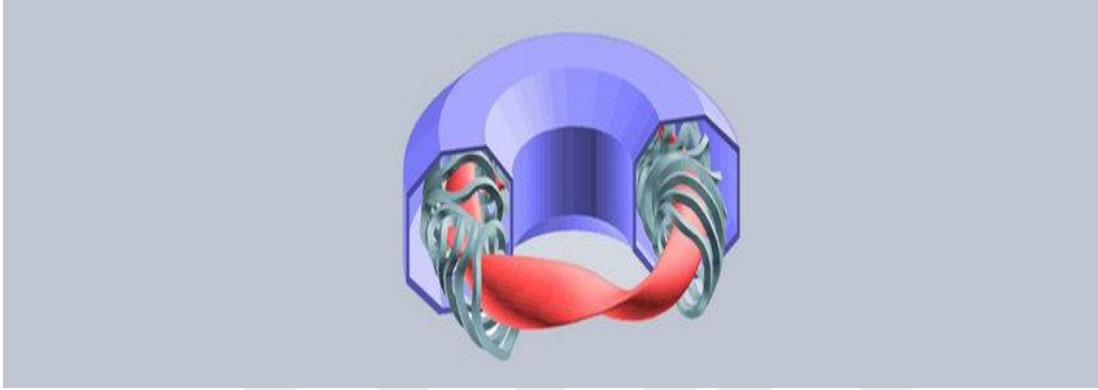
Kaynak: IPP, 19 Ağustos 2020.

Reaktörün inşa edilmesindeki temel amaç; füzyon olayını gerçekleştirebilmek ve bunun sonucunda güvenilir veriler elde ederek sistemin füzyon santralleri için kullanılabilirliğini ispatlamaktır. Bu doğrultuda sistem, yüksek plazma sıcaklıklarının ve plazmanın merkezinde istenilen seviyelerde iyon hapsinin elde edilmesine yönelik olarak dizayn edilmiş olup çalışmalar bu odak çerçevesinde şekillenmiştir (Wolf vd., 2017).

Reaktörün basitleştirilmiş kesit görüntüsü Şekil 21'de verilmektedir. Buna göre şekildeki mavi renkli bölge reaktör kabını, gri renkli helisel yapı manyetik bobinleri ve kırmızı bölge ise plazmayı göstermektedir. Sistem bileşenlerini biraz daha ayrıntılı bir şekilde anlatacak olursak sistem dört bileşen üzerinde kendisini göstermektedir. Bunlar mıknatıs sistemi, kriyostat (düşük sıcaklık koruma kabı), soğutma sistemi ve plazma bileşenleri (duvar panelleri, ısı kalkanları, kontrol bobinleri ve kriyo pompalar)'dir. Mıknatıs

sisteminde, 20 adedi düzlemsel ve 50 adedi düzlemsel olmayan toplamda 70 adet manyetik bobin, manyetik bobinleri birbirlerine bağlayan çubuk sistemi, akım kabloları ve manyetik destek yapıları bulunmaktadır. Kriyostat ise, plazma kabı, dış kap ve bağlantı noktalarından oluşmaktadır (Wegener, 2009).

Bunların dışında reaktör, 30 m³'lük plazma hacminde ve 30 dk süresince 10 MW'lık ısı güç üretimi üzerine tasarlanmıştır (Klinger vd., 2017).



Şekil 21: Stellarator Tipli Wendelstein 7-X Nükleer Füzyon Reaktörü

Kaynak: IPP, 19 Ağustos 2020.

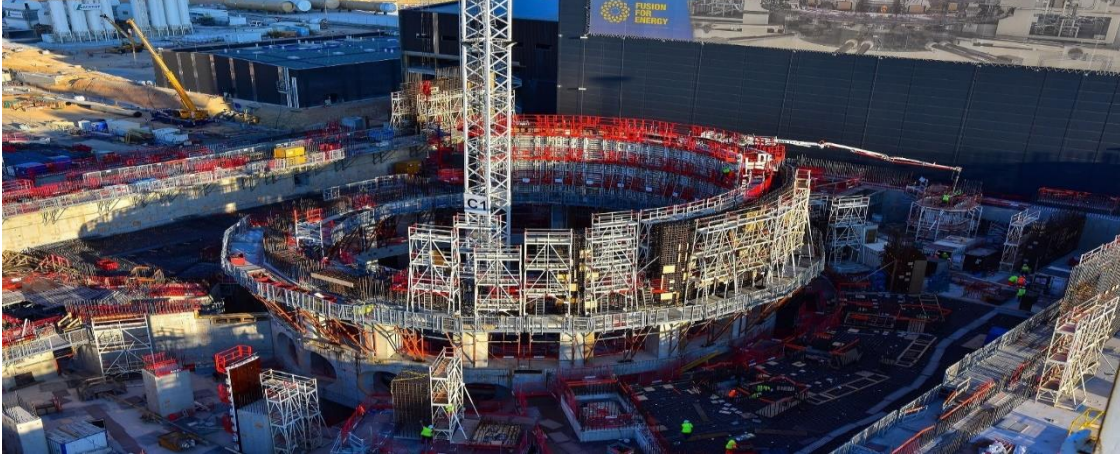
Wendelstein 7-X'te ilk plazma çalışmalarına Aralık 2015'te başlanmıştır. Bu ilk çalışmada öncelikli amaç, bir plazma eldesi ve bu sırada gerçekleştirilecek sistem aksaklıklarının tespitine yöneliktir. Bu aşamada yakıt olarak hidrojen ve helyum denemeleri yapılmıştır. Helyum denemesinde 1,3 MW'lık ısı güç için reaktörün plazma kabına enjekte edilen 1 mg helyum gazı sonrasında 1/10 saniye boyunca yaklaşık 1 milyon °C'lik helyum plazması elde edilmiştir. Akabinde Şubat 2016'da yapılan hidrojen enjektisi sonucunda sistemde yaklaşık 10 milyon °C, plazma elektronlarında ise yaklaşık 100 milyon °C sıcaklık değerleri elde edilmiştir (Milch, 2019; Wikipedia, 8 Ağustos 2020). Plazma çalışmalarına yönelik ikinci deneme 2017 yılında yapılmıştır. Bu deneme sonucunda 6 saniyelik süre boyunca 4,3 MW'lık güç eldesi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü denemenin ise, 2021 yılında gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Burada 30 dk'lık süreç için 10 MW'lık bir güç eldesi amaçlanmaktadır (Klinger vd., 2017; Wikipedia, 8 Ağustos 2020).

Sistemin genel yapısı bu şekilde olmakla birlikte proje, %35'i yatırım, %9'u inşaat, %29'u personel ve %26'sı işletim giderlerinden oluşmak üzere toplamda 1,2 milyar €'ya mal olmuştur (IPP, 19 Ağustos 2020). Bunun yanında proje maliyetlerinin %80'i Almanya Federal Hükümeti tarafından fonlanırken %20'si AB tarafından desteklenmektedir. Ayrıca bu proje, Max Planck Plazma Fiziği Enstitüsü ile birlikte dünya'nın çeşitli ülkelerinde bulunan 37 füzyon laboratuvarı ile koordineli bir şekilde yürütülmektedir (Wikipedia, 8 Ağustos 2020).

ITER (Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü)

ITER (Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü), dünya genelinde füzyon enerjisinin kullanımına yönelik olarak oluşturulan bir uluslararası işbirliği projesidir. Bu projenin temelleri 1985 yılında Sovyetler birliğinin öncülüğünde ABD, Japonya ve çeşitli Avrupa ülkelerinin katılımıyla füzyon enerjisinin kullanımına yönelik bir makine (tokamak)'nin geliştirilmesi fikri üzerine IAEA (Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu) çatısı altında atılmıştır. Daha sonrasında projede bazı aksaklıkların yaşanmasına rağmen 2005 yılında projenin kapsamı genişletilerek 7 ülke (Fransa, AB., ABD, Çin, G. Kore, Japonya ve Hindistan) ortaklaşa düzenlediği anlaşmayla Fransa'nın Cadarache kentinde bir nükleer füzyon tesisi kurmayı kararlaştırmışlardır (World Nuclear Association, 4 Ağustos 2020).

Projenin ortakları bu 7 ülke olmakla birlikte projeye, dışarıdan Avusturalya, Kanada, Kazakistan ve Taylan gibi ülkelerin yanı sıra çok sayıda uluslararası kuruluş ve üniversite de destek vermektedir. Tesis, Fransa'nın Cadarache kentinde 42 hektarlık alan üzerine inşa edilecek olup, tesisin inşası 2013 yılında başlatılmış ve 2025 yılına kadar tamamlanması planlanmaktadır. Bunun yanında tesisin 2025 yılının aralık ayında plazma, 2035 yılında da döteryum-trityuma dayalı reaksiyon denemelerine başlaması beklenmektedir (ITER, 23 Ağustos 2020). Tesisin 2017 yılına ait inşa görünümü Şekil 22'de verilmiş olup günümüze kadar geçen süreç içerisinde büyük bir bölümü tamamlanmıştır.

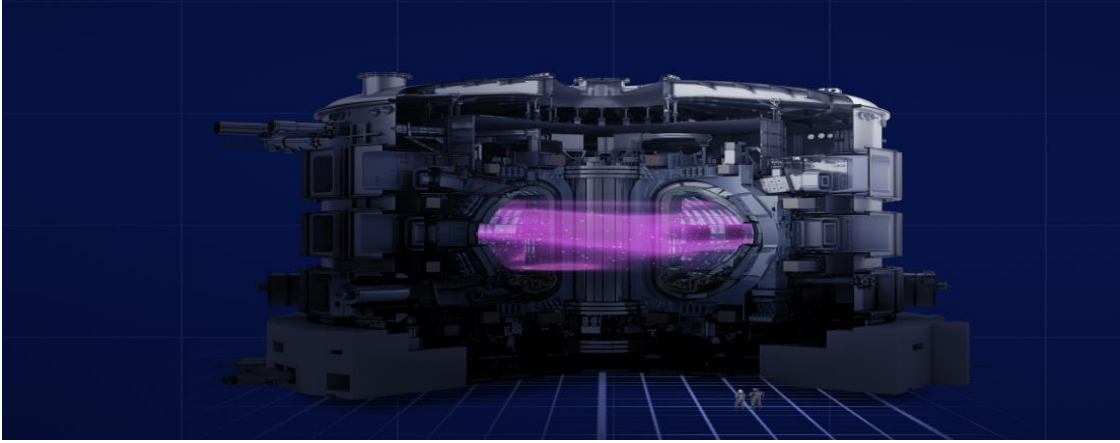


Şekil 22: ITER'in Ana Gövde İnşası

Kaynak: ITER, 23 Ağustos 2020.

Tesisin toplam maliyetinin 20 milyar €'yu aşacağı tahmin edilmektedir. Bu maliyetin %45'ini AB, %13'ünü Japonya ve ABD, %10'unu Çin, G.Kore ve Rusya ve %32'sinin ise EUROTOM (Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu) tarafından finanse edilmesi beklenmektedir (Wikipedia, 8 Ağustos 2020). Tesiste tokamak türü bir cihaz kullanılacak olup ilk etapta füzyonun hammaddelerinden biri olan trityum üretimine öncelik verilecektir. ITER'de kullanılacak tokamak tipli füzyon reaktörün bir kesiti Şekil 23'de verilmektedir.

Buna göre Tokamak, 24 m yüksekliğinde 30 m genişliğinde ve 23.000 ton ağırlığında dizayn edilecek olup, yakıt olarak ise döteryum-trityumu kullanacaktır. Ayrıca reaktörün ortasında bulunan ve füzyonun gerçekleşeceği plazmayı gösteren halka şeklindeki pembe renkli alanın hacminin ise 830 m³ olması beklenmektedir (Fusion for Energy, 23 Ağustos 2020). Bu alan, diğer sistemlere kıyasla şimdiye kadar oluşturulan en büyük plazma hacmi olma özelliğine sahiptir. Ayrıca sistem, 6 m plazma ana yarıçapına, 3 m plazma küçük yarıçapına, 5 tesla manyetik dairesel alana, 15 MA plazma akımına ve yaklaşık 100 milyon °C'lik iyon ve elektron sıcaklığına ulaşabilecek düzeyde inşası gerçekleştirilecektir (Siccinio vd., 2020).



Şekil 23: Tokomak Tipli ITER Nükleer Füzyon Reaktörü ve Nükleer Füzyonun Oluşumu

Kaynak: Fusion for Energy, 23 Ağustos 2020.

Tüm bunların yanında ITER, yüksek füzyon gücü elde edilmeye yönelik olarak inşa edilmektedir. ITER’de füzyon verimi önemli ölçüde iyileştirilmiş, bu oran $Q \geq 10$ olarak belirlenmiştir. Yani sisteme enjekte edilecek olan 50 MW’lık termal güç sonrasında elde edilecek termal çıktı gücü en az 500 MW olarak gerçekleşecektir. Bu çevrim oranı şimdiye kadar elde edilen çevrim oranlarından TFTR’den 37 kat, JET’ten ise yaklaşık 15 kat daha fazladır ve elde edilecek olan füzyon gücüne 7 ila 10 dk’lık bir zaman dilimi içerisinde ulaşılabacaktır (Fusion for Energy, 23 Ağustos 2020; ITER, 23 Ağustos 2020).

Bunların dışında dünya genelinde deneysel reaktör bazında ülkesel olarak yapılmış-yapılmakta olan diğer füzyon çalışmaları ise ABD’de CIRCUS, CNT, CTH, HIDRA, HSX, NCSX, Alcator, D3-D, HBT-EP ve NSTX; Japonya’da Heliotron, LHD ve JT-60; Almanya’da TJ-K, ASDEX ve TEXTOR; Fransa’da WEST; G.Kore’de KSTAR; Çin’de HL-2A ve HT-7; Rusya’da FT-2, Globus-M, T-10 ve T-15; İtalya’da FTU; Avusturalya’da H-1NF; Kosta Rika’da SCR-1; İspanya’da TJ-11; Hindistan’da ADITYA ve SST-1; Çekya’da COMPASS ve GOLEM; Portekiz’de ISTTOK; Brezilya’da NOVAA; AB’de DEMO ve TCA-Br; Kanada’da STOR-M şeklindedir (IPP, 19 Ağustos 2020).

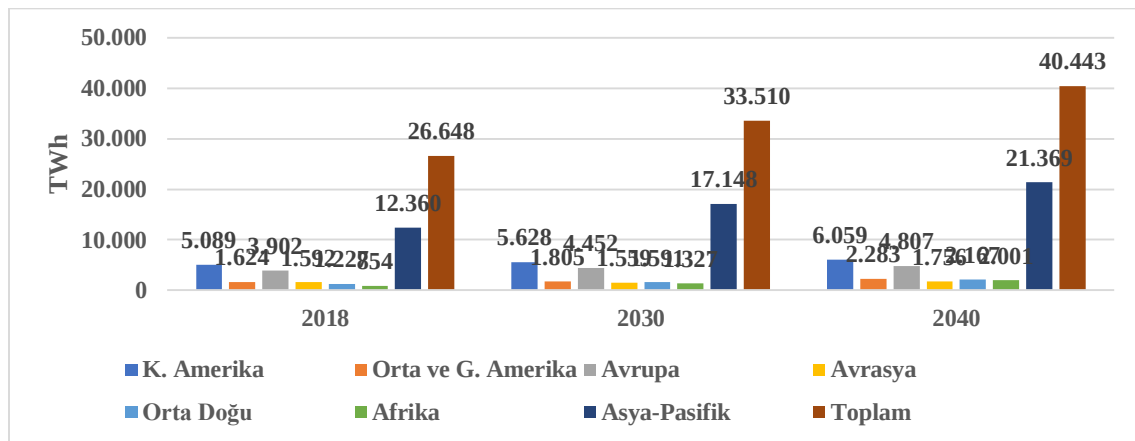
Buraya kadar olan bölümde dünya genelinde nükleer füzyon çalışmaları temelde iki reaktör tipi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biri tokomak diğeri ise stellarator tipleridir. Bu reaktör tiplerinde dünya genelinde çok sayıda çalışma yapılmış-yapılmakta olup bunların neticesinde önemli gelişimler sağlanmış ve sağlanmaya devam

edilmektedir. Dünya genelinde reaktör tipine bağlı olarak gerçekleştirilen ilk füzyon çalışmalarından günümüze kadar geçen yaklaşık 40 yıllık ve onu takip edecek süre içerisinde füzyona dayalı enerji üretimlerinde yaklaşık 50 kat (TFTR’de füzyon çıktısı 10,7 MW, ITER’de hedeflenen 500 MW), füzyon sürekliliğinde yaklaşık 60 kat (TFTR’de füzyon süresi 0,17 saniye, ITER’de hedeflenen 7-10 dakika), füzyon verimliliğinde 37 kat (TFTR’de füzyon verimi $Q=0,27$, ITER’de hedeflenen $Q=10$) ve diğer reaktör parametrelerinde önemli iyileştirmelerin gerçekleşmesi beklenmektedir.

Bu bakımdan pek çok bilim adamı tarafından, ITER’den elde edilecek başarının geleceğin füzyon enerjisine dayalı nükleer elektrik santrallerinin ve buna bağlı olarak elektrik üretimlerinin önünü açacağı belirtilmektedir.

3.5. Elektrik Enerjisi

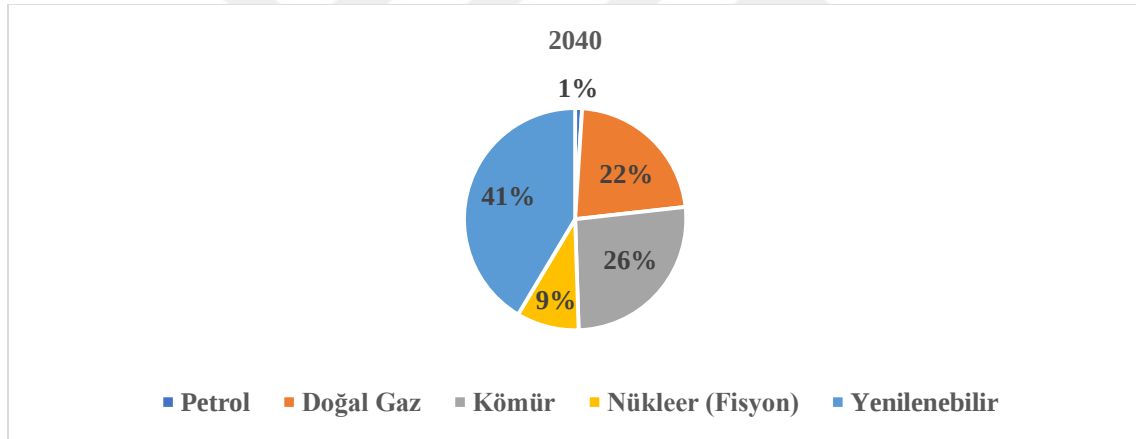
Dünya elektrik enerjisi üretiminin 2018-2040 projeksiyon dönemindeki görünümü incelendiğinde küresel elektrik üretiminin bir önceki dönemde (2000-2018) olduğu gibi artış trendinin devam ederek bu dönem içerisinde toplamda %52 oranında artarak 40 PWh değerine ulaşması beklenmektedir (Grafik 91). Bölgesel bazda ise bu %52’lik artışın büyük bir bölümünün % 33’ünün Asya Pasifik tarafından gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Bu %37’lik artışın ise büyük bir bölümünü de Çin (%16) ve Hindistan (%12) gibi ülkelerin oluşturacağı düşünülmektedir (Enerdata, 27 Haziran 2020; IEA, 2018). Bu bölgelerin dışında bu projeksiyon dönemi içerisinde elektrik üretimlerinde toplamda K. Amerika’da %19, Orta ve G. Amerika’da %41, Avrupa’da %23, Avrasya’da %10, Orta Doğu’da %77 ve Afrika’da %134 oranlarında artışların yaşanacağı tahmin edilmektedir (Grafik 91).



Grafik 91: 2000-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Üretimi

Kaynak: Enerdata, 27 Haziran 2020; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Küresel elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımlarına bakıldığında ise, küresel elektrik üretimi içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının 2000 yılında %19 ve 2018 yılında da %25 olan payının (bk. Grafik 38) 2040 yılına kadar süre içerisinde %41'e çıkararak önemini arttıracak, fosil ve nükleer (fisyon) enerji kaynaklarının da yine 2040 yılına kadar olan süre içerisinde önemini bir önceki döneme göre daha da kaybedeceği görülmektedir. Buna göre 2000 ve 2018 yıllarında fosil enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki toplam payının %65 iken (bk. Grafik 38) 2040 yılına kadar bu oranın %49'a, aynı şekilde nükleer (fisyon) dayalı elektrik üretiminin de 2000 ve 2018 yıllarında sırasıyla %17 ve %10 olan elektrik üretimlerinin 2040 yılına kadar olan süre içerisinde %9'a kadar düşmesi beklenmektedir (Grafik 92).

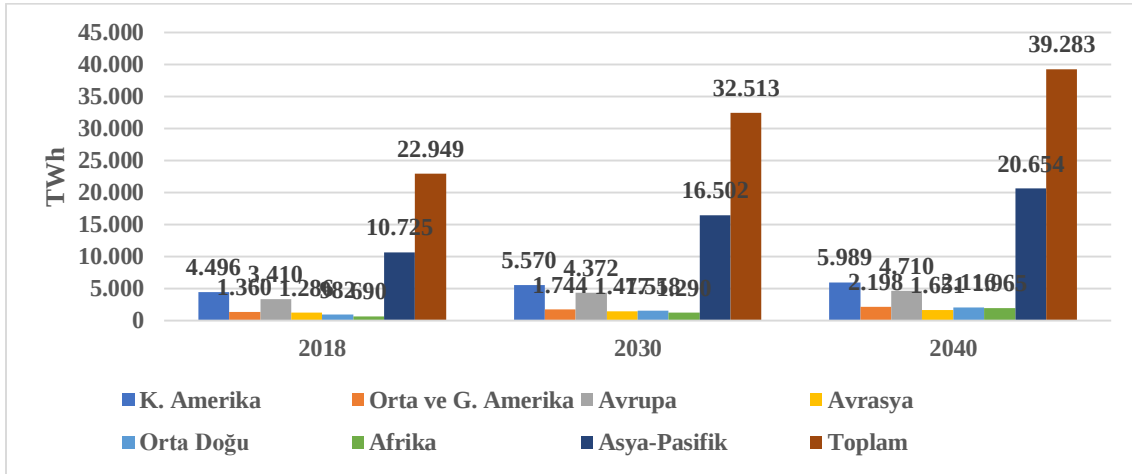


Grafik 92: 2040 Yılı İtibariyle Dünya Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Dağılımları

Kaynak: IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dünya elektrik talebinin projeksiyon dönemi içerisinde dağılımlarına bakıldığında dünya elektrik talebinin toplamda 2030 yılına kadar %42 oranında 3,5 PWh ve 2040 yılına kadar da %72 oranında artarak 39,2 PWh değerine kadar yükselmesi beklenmektedir. Bölgesel bazda ise yine bu dönem içerisinde en büyük artışların sırasıyla %115 ile Orta Doğu'da, %101 ile Afrika'da ve %93 ile Asya-Pasifik bölgelerinde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Bunların dışında K. Amerika'da %33 ve Avrupa'da %38, Avrasya'da %28 ve Orta ve G. Amerika'da %62 oranlarında elektrik talebinde büyüme beklentisi mevcuttur (Grafik 93). Bununla birlikte bu projeksiyon dönemi içerisinde en yüksek

elektrik talep artışının en çok yaşanmasının beklendiği bölgeler olan Afrika'nın, Orta Doğu'nun ve Asya-Pasifiğin aynı zamanda bu süreç içinde ekonomik büyümenin en fazla olacağı bölgelerin olması beklenmektedir. Buna göre bu bölgelerden Afrika'da %4,4, Orta Doğu'da %3,5 ve Asya Pasifik'te %4 oranında büyüme beklentisi mevcuttur. Diğer bölgelerden K. Amerika'da bu oranın %2, Orta ve G. Amerika'da %3, Avrupa'da %1,6 ve Avrasya'da %2,5 olacağı düşünülmektedir (IEA, 2018).



Grafik 93: 2000-2040 Arası Bölgesel Bazda Dünya Elektrik Talebi

Kaynak: Enerdata, 27 Haziran 2020; IEA, 2018'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

BÖLÜM 4: ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI OLARAK BOR

4.1. Borun Tanımı, Kapsamı ve Genel Özellikleri

Bor, kelime kökeni olarak Arapça'da Buraq-Baurach ve Farsça'da Burah kelimelerinden meydana gelen bir elementtir (TMMOB, 2008). Periyodik tabloda 3A grubunda yer almaktadır. Atom numarası 5 ve atomik ağırlığı 10.811 g/mol'dür (Taşcıoğlu, 1992). Bunun yanında cm³ başına 2,84 gr yoğunluğa ve yarı iletken özelliğe sahiptir (Yenmez, 2009). Bor, ayrıca element olarak kristal bir görünüme sahiptir ve doğada B10 ve B11 gibi kararlı yapıya sahip iki izotoptan oluşmaktadır. Bu izotoplardan B10'un doğada bulunma oranı %19 ila %20 arasında değişim gösterirken, B11'in bulunma oranı %80 ila %81 arasında değişebilmektedir (Eti Maden, 10 Ekim 2020). Bunların dışında borun atom yapısı ve diğer bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 65'te verilmektedir.

Tablo 65: Borun Atomik Yapısı, Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Değişkenler	Değerler	Değişkenler	Değerler
Atom Çapı (Å)	1,17	Kaynama Noktası (°C)	4002
İyon Çapı (Å)	0,23	Ergime Noktası (°C)	2300
Atom Hacmi (cm ³ /mol)	4,46	Mohs Sertliği	9,3
Elektron Dizilimi	1s ² 2s ² p ¹	Vickers Sertliği MN M-2	4900
Elektron Sayısı	5	Buharlaşma Isısı (KJ/mol)	489,7
Nötron Sayısı	6	Buhar Basıncı (pa)	0,348
Füzyon Isısı (KJ/mol)	50,2	Fiziksel Görünümü (20°C ve 1 ATM Basınç)	Katı

Kaynak: Eti Maden, 10 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bor, doğada saf halde bulunmayan çeşitli elementlerle (sodyum, kalsiyum, magnezyum vb.) bileşik yapıları halinde bulunmaktadır. Borun bu elementlerden sodyum kökenli bileşik yapılarına Tinkal-Boraks, kalsiyum kökenli bileşik yapılarına Kolemanit ve hem sodyum hem de kalsiyum karışımli bileşik yapılarına üleksit denilmektedir (Yenmez, 2009). Ayrıca bor, oksijenle bağ kurabilen yapısı nedeniyle basit ve karmaşık yapıları çok sayıda

bileşik oluşturabilmektedir. Bu şekilde oluşan bileşiklere ise borat denilmektedir. Doğada borat halinde birbirinden farklı 230 bor minerali bulunmaktadır (Yılmaz, 2002).

Bor mineralleri, doğada toprakta, suda ve kayalarda da bulunabilmektedir. Buna göre bor, toprağın içerisinde ortalama 10 ila 20 ppm, deniz suyunda 0,5 ila 9,6 ppm ve tatlı sularda da 0,01 ila 1,5 ppm arası yoğunlukta yer alabilmektedir (DPT, 2001).

Bunların yanında bor elementi, yanma sonucunda açığa çıkardığı enerji miktarı bakımından da diğer elementlere ve enerji kaynaklarına göre bir üstünlüğü bulunmaktadır. Buna göre bir litre bor elementi yanma sonucunda yaklaşık olarak 93 MJ değerinde enerjiyi açığa çıkarabilmektedir. Bu değer, aynı miktarda yanma sonucunda doğalgazdan yaklaşık 4,5 kat, benzinden yaklaşık 3 kat, petrol türevlerinden olan bütandan 2 ve oktandan da yaklaşık olarak 3 kat daha fazladır. Bir kg kömürün yanmasından ise, 3 ila 6 kat daha fazla enerji içeriğine sahiptir (bk. Tablo 6). Bunların yanında geleceğin enerji kaynaklarından biri olarak gösterilen hidrojenden de yanma sonrasında tam 11 kat daha fazla enerji açığa çıkarabilmektedir. Element olarak sadece Alüminyum, bor elementine göre daha yüksek enerji içeriğine sahiptir. Bundan sonra enerji içeriği bakımından bor elementine en yakın element ise berilyumdur (Tablo 66).

Tablo 66: Bor Madeninin ve Diğer Bazı Elementlerin Enerji İçerikleri

Elementler	Enerji İçerikleri (MJ/l)
Bor	92,77
Hidrojen	8,41
Metan (D. Gaz)	20,8
Metanol	15,9
Benzin	31,8
Etanol	21,3
Bütan	45,6
Lityum	15,69
Berilyum	86,15
Oktan	33,22
Karbon	54,01
Magnezyum	29,52
Silis	51,55
Alüminyum	357,42
Fosfor	43,01

Kaynak: Acaroğlu, 2003.

4.2. Borun Tarihçesi

Borun kökeni milattan öncesi döneme kadar dayanmaktadır. Bu dönemdeki uygarlıklar bor madenini pek çok alanda kullanmışlardır. Buna göre tarihte bor madeni ilk olarak 4.000 yıl öncesi dönemde Tibet'te bor tuzları şeklinde kullanılmıştır. Bor tuzlarını daha sonrasında Babiller, değerli eşyalarının ergitilmesinde, Mısırlılar mumyalamada, Eski Yunan ve Romalılar da temizlik işlerinde kullanmışlardır. Ayrıca MS 875 yılında Araplar bor bileşiklerinden tedavi amaçlı olarak ilaç üretimi gerçekleştirmiştir. Bor, elemental hale ise 1808 yılında Fransız kimyager Gay-Lussac ve İngiliz kimyager Sir Humphry Davey tarafından getirilmiştir (Moseman, 1994).

Bor madeni, modern endüstriyel anlamda 1200'lü yıllarda Marco Polo'nun önderliğinde Tibet'ten Avrupa'ya taşınmasıyla başlamıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde 1771 yılında İtalya'da sıcak su kaynaklarında bir bor bileşiği olan Sassolit keşfedilmiş, 1830 yılında da buna bağlı olarak borik asit üretimi gerçekleştirilmiştir. 1852 yılında ilk defa endüstriyel tarzda boraks madenciliği Şili'de başlamıştır. Daha sonrasında ABD'nin çeşitli eyaletlerinde (Nevada, California vb.) bor yataklarının keşfedilip işleme açılmasıyla ABD, bor üretiminde küresel güç haline gelmiştir.

Türkiye'de ise bor madeninin Doğu Roma İmparatorluğu dönemlerinden itibaren var ve kullanılmakta olduğu düşünülmektedir. Buna göre Türkiye'de ilk bor madeni yatakları Balıkesir'in Sultançayırı bölgesinde bulunmuştur. İşletmeciliği ise uzun dönem yabancı şirketlerin kontrolünde gerçekleşmiştir. Türkiye'de bor madeninin işletilmesine yönelik olarak ilk defa 1861 yılında çıkarılan Maadin Nizamnamesi ile madenlerin işletilmesine yönelik olarak bir Fransız şirketine 20 yıl süreyle imtiyaz hakkı tanınmıştır. Daha sonrasında bu imtiyaz 1887 yılında bir İngiliz şirketi olan Boraks Consolidated Ltd.'ye 71 yıl süre ile tanınmıştır. Türkiye'de bu imtiyazlar, 1927 yılına kadar 624 yabancı kökenli şirkete daha tanınmıştır. Türkiye'de II. Dünya Savaşı'ndan sonra Maden Tetkik ve Arama (MTA) ve Etibank tarafından bor madenine yönelik olarak arama faaliyetleri arttırılmıştır. Bu faaliyetler neticesinde de 1950 yılında Balıkesir-Bigadiç'te, 1952 yılında Bursa-Mustafa Kemal Paşa'da ve 1956 yılında Kütahya-Emet'te Kolemanit yatakları keşfedilmiştir. 1958 yılında da bu bor yataklarının işletme hakları Etibank'a verilmiştir. Ayrıca İngiliz bor arama şirketi Boraks Consolidated Ltd., Türkiye'nin mevcut arama

faaliyetleri sonucunda artan boraks cevheri nedeniyle Eskişehir-Kırka'daki Sodyum tuzu yataklarını özel maden şirketlerinden devralarak bu madenleri Türk Boraks kimliği altında işletmeye başlamış ancak devir işlemlerinde yaptığı usulsüzlükler nedeniyle işletme hakkı geri alınarak 1968 yılında itibaren işletilmek üzere Etibank'a devredilmiştir. Son olarak ise 1978 yılında Türkiye'deki mevcut bor madeni yataklarının devlet tarafından işletilmesine yönelik olarak alınan kararla bor madeni ile ilgili yatırım, üretim ve pazarlama hakkı Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne devredilmiş o tarihten bu yana da bor madeni ile ilgili tüm tasarruflar Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir (Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020).

4.3. Bor Yataklarının Oluşumu

Dünya genelinde bor yataklarının oluşumu yaklaşık olarak 24-2 milyon yıl öncesi üçüncü zamana (neojen dönem) kadar dayandığı bilinmektedir. Yer bilimciler tarafından bu dönemdeki bor yataklarının yer küre üzerinde yer alan plaka-levha sınırları boyunca uzandıkları tespit edilmiştir (Yılmaz, 2002).

Küresel anlamda bor yatakları karasal alanlarda çökelme, deniz evaporitlerinde ve magma kaynaklı olmak üzere üç farklı şekilde oluşabilmektedir. Bunlardan çökelme neticesinde oluşan bor yatakları dünya genelinde en fazla meydana gelen bor oluşum şeklidir. Çökelimler ise, termal kaynakların, taban çamurlarının, buharlaşmanın ve sellenmenin yüksek olduğu alanlarda meydana gelmektedir (Helvacı, 2004).

Playa-göl volkano-sedimanter çökellerinde ekonomik olarak uygun borat yataklarının oluşması için; playa-göllerinin, playa gölünde bor konsantrasyonunun, kurak ve yarı kurak mevsim şartlarının, 8,5 ila 12 Ph aralığındaki göl sularının, graben kaynaklı faylar boyunca hidrotermal çözeltilerin, havzaya doğrudan doğruya düşen kül yağışlarının ve çeşitli volkanitlerin (andezitik, riolitik vb.) var olması gerekmektedir (Helvacı, 2017).

Denizel evaporitlerde, bor yatakları büyük tuz kubbelerinin zirve noktasında damarimsı şeklinde yer alırlar. Bunlar, tuz kubbelerinin sokulumu esnasında tuzdan ayrışıp yoğunlaşarak (konsantre hale gelerek) oluşumunu tamamlamaktadırlar (Helvacı, 2004).

Son olarak magma kaynaklı oluşan bor yatakları, ya yer altından yüzeye doğru sokulan magma tabakasının yüzeye sokuldukça ısıl değerini kaybedip soğuyarak etrafındaki farklı kayalar türlerinin yüksek basınçlarından ve ısıl değerlerinden etkilenmesiyle ya da yine yer altındaki magmanın yüzeye yükselimi esnasında kristalleşmesiyle oluşabilmektedirler (Kistler – Helvacı, 1994).

4.3.1. Dünya'daki Başlıca Bor Yatakları

Dünya genelindeki mevcut bor madeni yatakları batı – doğu uzantısında geniş bir coğrafi alana yayılmışlardır. Buna göre K. Amerika'da ABD'de, G. Amerika'da Peru, Bolivya, Şili ve Arjantin'de, Avrupa'da (Türkiye hariç) Sırbistan, Rusya'da ve Asya'da Çin, Hindistan ve Kazakistan'da çeşitli bor yatakları ve bor cevherleri bulunmaktadır (Tablo 67). Bor cevherleri içerisinde de kolemanit, tinkal (boraks), kernit, üleksit, pandemit ve hidroborasit, szaybelit, borasit, datolit, sassolit ve tinkalkonit ticari önem teşkil eden bor cevherleridir (Lyday, 2002).

Tablo 67: Dünya Gelinde Bor Yataklarının Bulundukları Yerler ve Çıkan Bor Cevherleri

Ülkeler	Bulunduğu Yerler	Bulunan Bor Cevheri Türleri
ABD	Searles Lake, Ford Cady, Boron, Billie Mine, Death Valey, San Bernardino, Owens Lake, Lone Pine, Riverside, Danbury, Connecticut	Kernit, Kolemanit, Probertit, İyonit, Nobleit, Mayerhofferit, Danburit, Pinnoit, Vonsenit, Bakerit, Searlesit, Teepleit, Tinkal
Peru	Laguna Salinas, Arequipa	Üleksit, Pandemit
Bolivya	Unyuni Sur, Salar de Caruchari, Jujuy Loma Blanca, Jujuy Pasdos Grandes, Altiplano Pampa, Nor Lapis Province	Üleksit, Tinkal, Kolemanit, Hidroborasit
Şili	Surire	Üleksit
Arjantin	Loma Blanca, Tincalayu, Salinas Grandes, Salta Province, Sijes	Tinkal, Kernit, Hidroborasit, Kolemanit
Kazakistan	İnder	Datolit, Hidroborasit, İnderborit, Szaybelit, Kurnakovit, İnderit
Rusya	Dalnegorsk, Yakutiya, Buryatiya, Nalyodnoye, Titovskoye	Datolit, Szaybelit,
Çin	Liaoning, Qaidam, Xizang, Liaodong, Qinghai	Datolit, Szaybelit, Kernit, Üleksit

Sırbistan	Jarandol, Balijevac	Kolemanit, Üleksit,
Hindistan	Puga Valley, Jammu, Keşmir, Lake Sambhar	Tinkal

Kaynak: Bayrak vd., 2010; Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; Helvacı, 2017'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

4.3.2. Türkiye'deki Başlıca Bor Yatakları

Türkiye'deki başlıca bor madeni yatakları: Eskişehir-Kırka, Bursa-Kestelek, Kütahya-Emet ve Balıkesir-Sultançayırı ve Bigadiç'te yer almaktadır. Türkiye'de bulunan bu yatakların tamamı Marmara Bölgesi'nin güneyini de kapsayacak şekilde Batı Anadolu'da doğu-batı yönünde 300 km ve kuzey-güney yönünde 150 km'lik bir alan içerisinde bulunmaktadır. Bununla birlikte bu yataklar üçüncü jeolojik zamanda (Tersiyer dönemde) Batı Anadolu bölgesinde bulunan göllerin kimyasal çökelmelere uğraması sonucunda meydana gelmiştir. Ayrıca bu yataklar, üçüncü jeolojik dönemden dördüncü jeolojik dönemin başına kadar hüküm süren volkanik faaliyetlerin olduğu dönemdeki Tersiyer dönemin göl sedimanlarında oluşmuştur. Yatakların kayaç yapıları birbirlerinden farklı olmasına rağmen genel itibarıyla kumtaşı, kireçtaşı, çakıltası, tuf, marn ve killeri ara katmanlı yapıdadır. Oluşan bor cevherleri ise, kurak ya da yarı ılıman mevsim şartlarının varlığı altında ve birbirleriyle ilintili olan göl havzalarında toplanmıştır. Yataklardaki bor cevherleri, kalsiyum, sodyum ve magnezyum kökenli ya da sodyum-kalsiyum olarak bileşik yapıdadır (Helvacı, 1983). Bunlara göre Türkiye'de mevcut durumda bulunan bor cevher türleri Tablo 68'de verilmektedir.

Tablo 68: Türkiye'deki Bor Yataklarının Bulundukları Yerler ve Çıkan Cevherler Türleri

Bulunduğu Yer	Yatak	Cevher
Kütahya	Emet	Kolemanit, Üleksit, Probertit, Hidroborasit, Kahnit, Tünelit
Eskişehir	Kırka	Boraks, Kernit, Üleksit, Kolemanit, İnyonit, Mayerhofferit, İnderit, Hidroborasit, Kurnakovit
Bursa	Kestelek	Kolemanit, Probertit, Üleksit, Hidroborasit
Balıkesir	Bigadiç	Kolemanit, Havlit, Mayerhofferit, Üleksit, Probertit, Pandemit, Hidroborasit, İnyonit
	Sultançayırı	Pandemit, Havlit, Kolemanit

Kaynak: Bayrak vd., 2010.

4.4. Bor Madeninin Sınıflandırılması

4.4.1. Ham (Cevher) Borlar

Doğada, köken olarak sodyum, kalsiyum, magnezyum ya da bunların bileşikleri halinde olmak üzere 230’u aşkın bor minerali bulunmaktadır (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020b). Bu minerallerden daha öncede belirtildiği üzere ticari-ekonomik açıdan en önemlileri: tinkal, kernit, üleksit, probertit, kolemanit pandermite, hidroborasit, datolit, sassolit, szaybelit ve borasittir. Bor minerallerin ticari önemini belirleyen ise içerdikleri bor oksit (B2O3) değerleridir (Tablo 69). Tablo 69’da ticari öneme sahip bor cevherleri, içerdikleri bor oksit (B2O3) miktarları ve bulunduğu ülkeler verilmektedir.

Tablo 69: Ticari Öneme Sahip Bor Cevherinin Bor Oksit (B2O3) İçerikleri ve Bulundukları Ülkeler

Ham Borlar	Kimyasal Formülleri	Bor Oksit (B2O3) İçerikleri (%)	Bulunduğu Ülkeler
Tinkal (Boraks)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36,5	Türkiye-Arjantin-ABD-Bolivya-Hindistan
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51	Türkiye-Arjantin-ABD-Çin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43	Türkiye-Arjantin-Sırbistan-ABD-Şili-Peru-Bolivya
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50,8	Türkiye-ABD-Şili-Arjantin
Pandermite	CaB ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	59,8	Türkiye-Peru
Hidroborasit	CaMgB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O	50,5	Türkiye-Kazakistan-Arjantin
Probertit	NaCaB ₃ O ₉ ·5H ₂ O	49,6	Türkiye-ABD
Datolit	CaBSiO ₄ ·OH	24,9	Rusya-Kazakistan
Sassolit (Doğal Borik Asit)	H ₃ BO ₃	56,3	İtalya
Szaybelit	MgBO ₂ ·20H	41,4	Bğsz. Dev. Top.
Borasit	Mg ₆ B ₁₄ O ₂₆ C ₁₂	62,2	Almanya

Kaynak: Acarkan, 2002; Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; DPT, 2001’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Tinkal (Boraks)

Tinkal, sodyum kökenli bir bor cevheridir (Helvacı – Alonso, 2000). Suda çözünebilen mineral sedimentlerinin bulundukları ortamlardaki tuzlu yapıya sahip göl sularının buharlaşması (evaporasyon) sonucunda meydana gelebilmekte, yatak içerisinde karbonat, sülfat ve halit gibi minerallerle bir arada bulunmaktadır. Tinkalin kristal sistemi monoklinik, kristal biçimi kısa prizmatik kristalli ve levhamsıdır. Görünüşü renksiz ve saydam olabilmekle birlikte bileşimindeki safsızlıklar dolayısıyla grimsi, yeşilimsi ve mavimsi olabilmektedir. 2 ila 2.5 Mohs sertliğinde ve 1.715 g/cm³ ağırlığındadır (MTA, 10 Eylül 2020). Dünya genelinde ABD, Arjantin, Bolivya ve Hindistan’da, Türkiye’de ise Kırka’da yer almaktadır (Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; DPT, 2001).



Şekil 24: Tinkal (Boraks) (Solda) ve Üleksit (Sağda) Cevherleri

Kaynak: MTA, 10 Eylül 2020.

Üleksit

Sodyum-kalsiyum kökenli bor cevheridir (Helvacı – Alonso, 2000). Tinkal yataklarının yer aldığı bölgelerde sedimanter kayalarda kolemanit cevheri ile bir arada bulunmaktadır. Üleksitin kristal sistemi triklinik kristal biçimi ise çoğunlukla iğnemsî olmak üzere mercekli veya nodüler yapıdadır. Görünüş olarak beyaz, renksiz, ipeksi, şeffaf ve camsı görünüme sahiptir. Düşük yoğunlukta ve sıcak suda çözünebilmektedir. Bununla birlikte 2.5 Mohs sertliğinde ve 1.955 g/cm³ ağırlığındadır (MTA, 10 Eylül 2020). Dünya genelinde Arjantin, Sırbistan, ABD, Şili, Peru ve Bolivya’da Türkiye’de Bigadiç, Emet ve Kırka’da bulunmaktadır (Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; DPT, 2001).

Kernit

Sodyum kökenli bir başka bor cevheridir (Helvacı, 2015). Kristal tortul havzalarının bulunduğu yataklarda yer almaktadır. Kristal sistemi, monokliniktir. Doğada renksiz saydam olarak bulunmaktadır ve kırılğan yapıdadır. 2.5 ila 3 Mohs sertliğe ve 1.9 ila 1.92 g/cm³ ağırlığa sahiptir (Webmineral, 15 Ekim 2020). Soğuk sularda çözünme oranı düşüktür. Dünya genelinde Arjantin, ABD ve Çin’de Türkiye’de Kırka’da bulunmaktadır (Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; DPT, 2001).



Şekil 25: Kernit (Solda) ve Kolemanit (Sağda) Cevherleri

Kaynak: Mineralienatlas, 15 Ekim 2020.

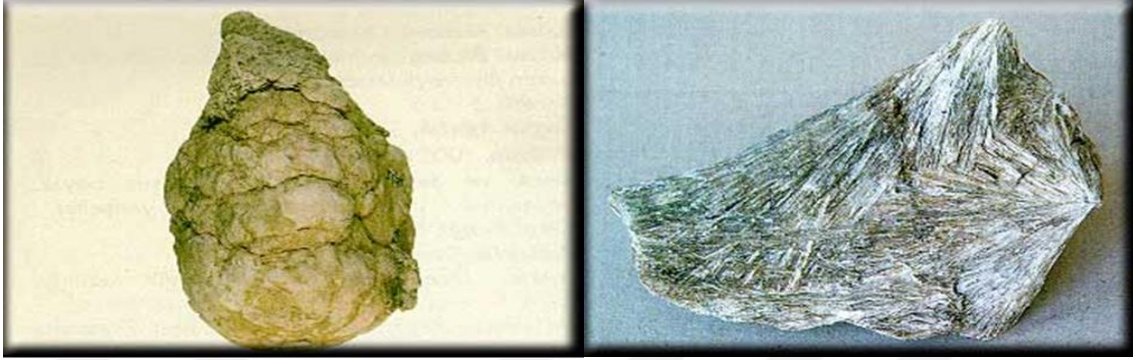
Kolemanit

Kalsiyum kökenli bir borattır (Helvacı, 2015). Kurak mevsim koşulların yoğun olduğu bölgelerdeki playa ve tuz göllerinde tinkal cevheri ile birlikte bulunmaktadır. Monoklinik kristal sistemi içerisinde kısa ve eş boyutlu prizmatik, kompakt ve taneseli biçimlidir. Diğer bor cevherlerine kıyasla daha sert yapılıdır. Görünüş olarak camsı, şeffaf ve yarı şeffaf görünümündedir. 4.5 Mohs sertliğe ve 2.42 g/cm³ ağırlığa sahiptir (MTA, 10 Eylül 2020). Hidroklorik asitte hızlı, suda yavaş çözünebilmektedir. Bor cevherleri arasında en yaygın olarak bulunan bor cevheridir. Küresel çapta Arjantin, Şili ve ABD’de Türkiye’de ise Emet, Bigadiç ve Kestelek’te bulunmaktadır (Acarkan, 2002; DPT, 2001).

Pandermit

Kalsiyum kökenli bir diğer bor cevheridir (Helvacı, 2015). Kıl ve Jips gibi suda eriyebilen kayaç yapılarının bulunduğu yataklarda ve sıcak su kaynaklarının etrafındaki çökellerde oluşur. Triklitik kristal sistemi içerisinde nodüler veya düzensiz kütleler halindedir.

Görünüm olarak toprağımsı görünümüne sahiptir. 3 ila 3.5 Mohs sertliğinde ve 2.43 g/cm³ ağırlığındadır (MTA, 10 Eylül 2020). Pandemit, dünya genelinde Peru’da (bk. Tablo 87) Türkiye’de Kırka ve Bigadiç’te bulunmaktadır (Yiğitbaşoğlu, 2004).



Şekil 26: Pandemit (Solda) ve Hidroborasit (Sağda) Cevherleri

Kaynak: MTA, 10 Eylül 2020.

Hidroborasit

Magnezyum-kalsiyum kökenli bir bor cevheridir (Schubert, 2011). Lifsi bir dokusu, iğnemsî bir kristal görünümü vardır. Beyaz renklidir ancak içerdiği arsenik miktarına göre kırmızımsı yahut sarımsı renklere bürünebilir. Borat yataklarında kolemanit, üleksit ve probertit cevherleriyle bir arada yer almaktadır. Türkiye’de Emet ve Kestelek’te (Yiğitbaşoğlu, 2004), dünya genelinde de Kazakistan ve Arjantin’de bulunmaktadır (bk. Tablo 67).

Probertit

Kalsiyum-sodyum kökenli bir bor madenidir (Schubert, 2011) ve ağırlıkça %6,5 oranında sodyum ve %11,4 oranında kalsiyum içermektedir. Cevher, monoklinik kristal yapıda, 3.5 Mohs sertliğinde ve 2.13 g/cm³ ağırlığındadır (Mineralienatlas, 15 Ekim 2020). Açık sarı ya da kirli beyaz renge ve lifli bir görünüme sahiptir. Türkiye’de Emet’te (DPT, 2001), dünya genelinde ABD’de bulunmaktadır (bk. Tablo 67).



Şekil 27: Probertit Cevheri

Kaynak: Mineralienatlas, 15 Ekim 2020.

4.4.2. Rafine Borlar

Başta tinkal, üleksit ve kolemanit olmak üzere çeşitli bor cevherlerinin kimyasal reaksiyona uğraması sonucunda rafine bor ürünleri elde edilebilmektedir. Bu elde edilen ürünler Tablo 70’de verilmiş olup, bu cevherlerden en fazla elde edilen rafine bor ürünleri; boraks pentahidrat, borik asit, boraks dekahidrat, sodyum Perborat ve susuz borakstır (Güyağüler, 2001).

Tablo 70: Ham Bor Cevherlerinden Üretilen Başlıca Rafine Bor Ürünleri

Rafine Borlar	Kimyasal Formülleri	Bor Oksit (B ₂ O ₃) İçerikleri (%)
Boraks Dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36,5
Boraks Pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O	47,8
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,3
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56,5
Susuz Borik Asit (Bor Oksit)	B ₂ O ₃	100
Sodyum Metaborat	NaBO ₂	64,2
Sodyum Perborat	NaBO ₃ ·4H ₂ O	22
Disodyum Oktaborat	Na ₂ B ₈ O ₁₃	81,8

Kaynak: Acarkan, 2002.

4.4.3. Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları

Özel bor ürünleri ve kimyasalları, ham bor cevherlerinin çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlere uğraması neticesinde ortaya çıkan borik asit ve susuz borik asitten elde edilmektedir. Bu işlemler neticesinde ortaya çıkan borik asit ve susuz borik asit gibi rafine bor ürünlerinin yeniden bir takım fiziksel ve kimyasal işlemlere tabii tutulması ile

elementel borlar, potasyum tetraborat ve pentaboratlar, çinko boratlar, amonyum tetraborat ve pentaboratlar, lityum tetraborat ve metaboratlar, baryum metaboratlar, kalsiyum boratlar, fluoborik asitler, bor fosfatlar, ferrobörler, bor karbür, triklorür ve triflorürler, borik asit esterleri ve diboranlar-dekaboranlar gibi çeşitli özel bor ürünleri ve kimyasalları üretilmektedir. Bu ürünler ve kimyasallar içinde de elementel borlardan; titanyum ve magnezyum diborürler, fluoborik asitlerden; fluoborat tuzları, borik asit esterlerinden; boronik, metil boronik ve fenil boronik esterlerle birlikte sodyum, lityum, potasyum ve magnezyum bor hidrürler, bor triflorürlerden; diboranlar ve dekaboranlarla birlikte sodyum, lityum, potasyum ve magnezyum bor hidrürler ve diboran ve dekaboranlardan da; başta organo bor bileşikleri olmak üzere yine sodyum, lityum, potasyum ve magnezyum kökenli bor hidrürlerin eldesi sağlanabilmektedir (Tablo 71).

Tablo 71: Rafine Borlardan Üretilen Birtakım Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları

Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları	Kimyasal Formülleri	Özel Bor Ürünleri ve Kimyasalları	Kimyasal Formülleri
Elementel Bor	B	Borik Asit Esterleri	-
- Titanyum Diborür	TiB₂	- Boronik Ester	-
- Magnezyum Diborür	MgB₂	- Metil Boronik Ester	-
Potasyum Tetraborat	K₂B₄O₇·4H₂O	- Fenil Boronik Ester	-
Potasyum Pentaborat	K₂B₁₀O₁₆·8H₂O	- Sodyum Bor Hidrür	NaBH₄
Çinko Borat	ZnB₂O₄·2H₂O	- Lityum Bor Hidrür	LiBH₄
Baryum Metaborat	BaB₂O₄·2H₂O	- Potasyum Bor Hidrür	KBH₄
Amonyum Tetraborat	(NH₄)₂B₄O₇·3H₂O	- Magnezyum Bor Hidrür	MgBH₄
Amonyum Pentaborat	(NH₄)₂B₁₀O₁₆·8H₂O	Bor Triflorür	BF₃
Lityum Tetraborat	Li₂B₄O₇	- Sodyum Bor Hidrür	NaBH₄
Lityum Metaborat	LiB₂O₃	- Lityum Bor Hidrür	LiBH₄
Baryum Metaborat	BaB₂O₄·2H₂O	- Potasyum Bor Hidrür	KBH₄
Fluoborik Asit	HF₃	- Magnezyum Bor Hidrür	MgBH₄

-Fluoborat Tuzlar	-	- Diboran-Dekaboran	B₂H₆-B₁₀H₁₄
Bor Fosfat	BpO₄	Diboran-Dekaboran	B₂H₆-B₁₀H₁₄
Ferrobör	F₂B	- Sodyum Bor Hidrür	NaBH₄
Bor Karbür	B₄C	- Lityum Bor Hidrür	LiBH₄
Bor Nitrür	BN	- Potasyum Bor Hidrür	KBH₄
Bor Triklörür	BCl₃	- Magnezyum Bor Hidrür	MgBH₄

Kaynak: Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; Sümer, 2004'Ten Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

4.5. Bor Minerallerinin Mevcut Kullanım Yerleri ve Alanları

Bor madeni, fiziksel ve kimyasal özelliklerine ek olarak meydana gelen teknolojik gelişmeler sayesinde ileri bir teknoloji ürünü olarak birçok kullanım alanı mevcut olmuştur. Teknoloji gelişmeler sayesinde bor mineralleri küresel ölçekte; kimya, cam, inşaat, metalürji, gıda, tarım, sağlık, seramik, demir-çelik, nükleer, otomotiv ve enerji sektörleri olmak üzere çok sayıda sektör tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede bor mineralleri, hammadde tedariki açısından küresel sektörlere önemli alternatifler ve avantajlar oluşturmıştır. Tablo 72'de cevher, ürün ve kimyasal olarak bu bor minerallerinin mevcut kullanım yerleri ve alanları verilmiştir.

Tablo 72: Bazı Bor Madenlerinin (Cevher-Ürün-Kimyasallar) Mevcut Kullanım Yerleri ve Alanları

Bor Türleri	Kimyasal Formülleri	Kullanım Yerleri ve Alanları
Alüminyum Borat	Al₄B₄O₁₂H₂O	Cam ve Seramik Endüstrileri
Amonyum Pentaborat	(NH₄)₂O.5B₂O₃.4H₂O	Bor Kimyasallarından Ara Ürün, Atom Denizaltılarında Kontrol İşleri, Elektrolitik Yoğunlaştırıcı ve Kağıt Kaplama
Amonyum Tetraborat	(NH₄)₂ B₄O₇.4H₂O	Ure-Formaldehit reçine ve Yanmaz Eşya Üretimi
Baryum Metaborat	BaO.B₂O₃.H₂O	Boya, Plastik, Tekstil ve Kağıt Endüstrileri
Bakır Metaborat	CuB₂O₄	Yağ Pigmentleri ve Böcek İlaçları
Disodyum Oktaborat	Na₂B₈O₁₃.4H₂O	Kereste ve Diğer Selülozik Yanmayı Giderici, Gübre, Tarım İlaçları
Lityum Tetraborat	Li₂B₄O₇.3H₂O	Cam İmalatı ve X-Işınlarının Yayılım Analizi

Manganez Tetraborat	MnB₄O₇.H₂O	Tutucu ve Matbaa Mürekkebi Kurucusu
Potasyum Pentaborat	K₂O.5B₂O₃.8H₂O	Paslanmaz Çelik Üretiminde Demir Dışı Metaller İçin Kaynak ve Lehim Flaksı
Sodyum Metaborat	Na₂B₂O₄.H₂O	Yapıştırıcı, Deterjan ve Temizleyici, Tarım İlaçları, Tekstil, Fotoğrafçılık
Sodyum Perborat	NaBO₃	Deodorant, Tekstil Boyaları ve Beyazlatıcıları, Mikrop Öldürücü, Dişçilik Malzemeleri, Oksitleyiciler Saç Yapım Maddeleri, Diş ve Leke Temizleyici
Bor Tribromür	BBR₃	Elektronik Endüstrisi
Bor Triflorür	BF₃	Katalizör
Potasyum Fluoborat	KBF₄	Öğütme Çarkları, İndirgeyici, Flaks, kimyasal Temizleyici
Çinko Fluborat	Zn(BF₄)₂	Tekstil Endüstrisi ve Boya ve Kaplama Çözeltileri
Bor Karbür	B₄C	Nükleer Zırh ve Aşındırıcı, Nükleer Reaktörde Kontrol Kalemleri
Manganez Diborür	MnB₂	Çeşitli Demir Alaşımları
Kalsiyum Borür	CaB₆	Kozmetik Sanayi
Bor-10	B₁₀	Nükleer Savuma Sanayi
Ferrobör	F₂B	Çelik Üretiminde Katkı Maddesi ve Dökümhanelerde
Bor Flamenti	-	Uzay Araştırmalarında Malzeme Direncini Arttırıcı
Bor Filmi	-	Direnç Arttırıcı
Metil Borik Asit Esterleri	-	Metal Alevleri İçin Söndürücü
Trimetil Borat Esterleri	(CH₃O)₃B	Elektronik Uygulamaları, Kaynak Flaksı
Amin Boranlar		İlaç Sanayi, Fotoğrafçılık ve Kaplama
Kolemanit	Ca₂B₆O₁₁.5H₂O	Yangın Söndürücüleri, Tekstil Cam Elyafı, Yüksek Fırın Eritgeni, Sodyum Perborat, Bor Alaşımları
Borik Asit - Bor Oksit	H₃BO₃ - B₂O₃	Cam Hamuru ve Vernikleri, Tekstil, Porselen Boyaları, Sert (Borasilikatlı

		Camlar, Tekstil Cam Elyafı, Mikrop Öldürücü, Kozmetik Sanayi, Fotoğrafçılık, Katalizör, Kaynak ve Lehim Eritgenleri
Boraks Pentahidrat	Na₂B₄O₇·5H₂O	Çamaşır Tozu, Sabun, Temizlik Maddeleri, Tarım İlaçları, Deri Sanayi, Gübre, İlaç ve Kozmetik, Antifrizlerde Paslanmayı Giderici, Çimento, Elektrotlar, Böcek ve Mantar İlaçları
Üleksit	NaCaB₅O₉·8H₂O	Sert (Borasilikath Camlar ve Cam Ürünleri İzolasyonu
Çinko Borat	2Zn·3B₂O₃·7H₂O	Seramik, Mantar İlaçları, Tıp, Yangın Söndürücü

Kaynak: Poslu-Çebi, 2001; Sümer, 2004' Ten Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

4.5.1. Cam ve Seramik Sektörleri

Bor madeni cam sektöründe; pencere camı, şişe camı v.b. cam ürünlerinin yanında yalıtımlı ve optik cam elyaflarında ve borosilikat cam üretimlerinde kullanılmaktadır. Cam üretiminde kullanılan borik asit, susuz boraks, kolemanit, tinkal vb. bor mineralleri camların ara fazlarında yer alarak yüzey sertliklerini ve viskozitelerini (ağdalılıklarını) arttırmaktadır.

Yine binalarda yalıtım amaçlı olarak cam elyaflarının yapımında kullanılan boraks pentahidrat, üleksit ya da probertit ürünlerin sertliklerini ve dayanaklılıklarını arttırmaktadır. Bu sayede içerisinde bor katkılı cam elyafı bulunan plastikler, otomotiv ve uçak endüstrilerinde girdi olarak kullanılan çeliğe ve diğer metallere alternatif oluşturmaktadır. İngiltere’de otomobil başına 75 kg cam yünü tüketilirken, Fransa’da otomobil firması olan Renault, üzerine polyester paneller konulabilen bor katkılı metal şasi üretimini gerçekleştirmektedir. Otomobillerde bor katkılı ürünlerin kullanımı, araçların ağırlıklarını azaltmak suretiyle yakıt tüketiminde tasarruf sağlamaktadır (DPT, 2001).

Bunlara ek olarak optik cam elyafı yapımında kullanılan tinkal, kolemanit ve borik asit camın yansıtabilirliğini ve camın ısıya karşı mukavemetini arttırarak camı çizilmelere karşı korumaktadır. Borun cam sektöründeki bu denli yararından ötürü otomobillerde, fırınlarda, çamaşır makinelerinde ve çanak çömleklerde bor ürünleri tercih edilmektedir. ABD’de, başta Corning Glass Works, Andron Hocking ve General Electric olmak üzere cam üretiminde bor minerallerini kullanan 100’e yakın şirket bulunmaktadır (DPT, 2001).

Seramik sektöründe kolemanit ve üleksit, seramik sırlarının ve emayelerin yapımında kullanılmaktadır. Bor mineralleri bu yapılar içerisinde sırların ve fritlerin ergime ısılarının azaltılmalarına, sırlarda meydana gelen ısıl genişlemelerin seramikle uyumlu olmasına, emaye kaplamaların mekanik ve çizilme mukavemetlerinin ve seramik malzemelerin hem kimyasal hem de suya karşı olan dirençlerinin arttırılmasına katkı sağlamaktadır (TMMOB, 2016).

4.5.2. Temizlik ve Tekstil Sanayi

Temizlik endüstrisinde bir bor minerali olan sodyum perborat, bir temizlik ürünü olan deterjanlar içerisinde %20 ila %25 oranında kullanılmaktadır. Bu kullanım sayesinde sodyum perborat; beyazlatıcı ve leke çıkartıcı, sudaki Ph dengeleyici, suyu yumuşatıcı, yağları parçalayıcı ve bakteri giderici özellik göstermektedir. Ayrıca deterjanlar içerisinde belli oranlarda sodyum perborat kullanılması su tüketiminin ve yıkama süresinin azaltılmasını ve makine içerisindeki çelik yapıli aksamaların aşınmalarını engellemektedir. Bunların yanında düşük sıcaklık değerleri altında verimli olabilmekte ve yıkama esnasındaki kumaşın deformasyonunu azaltabilmektedir (Acarkan, 2002).

Tekstil endüstrisinde ise, bor mineralleri yanmayı geciktirici özelliklerinden ötürü cam elyafı olarak kumaş imalatında kullanılmaktadır. Bunların dışında yine bu sektör içerisinde koruyucu özelliğinden ötürü kumaş boyalarında ve kumaş imalatı sırasında kumaşa esneklik ve nemlilik kazandırmak amacıyla da tercih edilmektedir (Acarkan, 2002).

4.5.3. Otomotiv ve Atık Temizleme Sektörü

Otomotiv sektöründe, bor minerali olarak elementel bor ve boraks ilave bir katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu minerallerden elementel bor, potasyum nitrat ile karıştırılarak araçlarda meydana gelebilecek kaza esnasında aracın içerisindeki elektronik sensörü harekete geçirerek araçta bulunan hava yastıklarının daha çabuk bir şekilde şişmesini sağlayarak koruma sağlamaktadır. Diğer bir kullanılan bor minerali olan boraks ise, paslanmayı giderici olarak araçların antifrizlerine katılmaktadır. Bu sayede araçların soğutma aksamalarında meydana gelebilecek paslanmayı giderebilmektedir (Buluttekin, 2010).

Atık temizlemede ise sodyum borhidrat minerali kullanılmaktadır. Sodyum borhidrat, atık sulara bulunan ağır metallerin (cıva, gümüş, kurşun v.b.) sudan ayrıştırılarak atılmasına yardımcı olmaktadır (Buluttekin, 2010).

4.5.4. Metalürji ve Nükleer Sanayi

Metalürji endüstrisinde; değerli ve demir olmayan bazı metallerin geri kazanılmalarında, tel çekmede, alaşım imalatlarında, amorf metallerde, nadir toprak mıknatıslarında, borlamada, sert lehimlemede, kaynak ve lehim akıllarında, mücevher imalatındaki ergitme işlemlerinde ve tozlu paslanmaz çelik cüruflarında olmak üzere susuz boraks, borik asit, potasyum boratlar, ferrobor ve tinkal gibi çeşitli bor mineralleri kullanılmaktadır. Bor mineralleri bu işlemlerden; çelik ve tel çekmede paslanmayı önleyici ve kayganlaştırıcı, çelik-alüminyum alaşımlarında ve borlamada mukavemet arttırıcı, amorf metallerde transformatörlerin imalatında katkı maddesi, nadir toprak mıknatıslarda üstün manyetizasyon sağlamada, sert lehimleme, kaynak ve lehim akıllarında oksitlenmeyi önleyici ve tozlu paslanmaz çelik cüruflarda da tozlanmayı giderici rol oynarlar (Schubert, 2011).

Nükleer uygulamalarda ise, nükleer reaktörlerde fisyon sonucu açığa çıkan alfa, beta parçacıklarının ve gama ışınlarının ve nöronların kontrol etmek amacıyla bor-10 izotopu kullanılmaktadır. Bu izotop, alfa parçacıklarını tamamen absorbe edebilirken gama ışınlarının ise büyük bir bölümünün emilimini sağlayabilmektedir (Garrett, 1998).

Ayrıca yine nükleer uygulamalarda bor karbürler, nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında iyi bir nötron emici olarak yer almaktadırlar. Bununla birlikte reaksiyon sonucunda kullanılmış yakıt çubuklarının taşınmalarında ve depolanmalarında da kullanılabilir (Garrett, 1998).

4.5.5. Tarım ve Sağlık Sektörleri

Borlar, tarım sektöründe bitkilerde, gübre eldesinde, haşerelerle savaşmada, yabani ve istenmeyen otların kontrol edilmesinde ve ormancılıkta ahşap koruma amacıyla kullanılmaktadır. Bor mineralleri, bitkilerde kullanıldığında onların büyümelerinde, gelişimlerinde, ürün verimlerinde ve çekirdek oluşumlarında, şeker-nişasta ve şeker-karbonhidrat dengesinin sağlanmasında, hücre bölünmelerinde, protein formasyonlarında, tozlaşmada ve tohum oluşumunda da oldukça önemli rol oynamaktadır. Boraks pentahidrat, sodyum perborat, boraks dekahidrat, borik asit ve disodyum oktaborat tetaborat gibi rafine bor ürünleri bitkilerin ve toprağın verimini arttırmak amacıyla karışım halinde gübrelerin içerisinde kullanılabilir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a).

Sağlık alanında bor, kanser tedavilerinde kullanılmaktadır. Bor Nötron Yakalama Tedavisi (BNCT) ile insan beyninin içerisindeki hastalıklı hücreler tespit edilip imha edilebilmektedir. Ayrıca bu tedavinin sağlıklı hücrelere zarar verme düzeyi asgari seviyelerdedir. Bu sebeplerden ötürü BCNT, kanser tedavilerinde alternatif bir tedavi yöntemi olarak kullanımı mevcuttur. Hatta bazı ülkeler tarafında insan vücudunda belli oranlarda bulunan bor mineralleri tablet halinde üretilip satışa sunulmuştur (DPT, 2001).

4.5.6. Yanmayı Önleyici Olarak ve Diğer

Ateşe karşı dayanıklılık arttırıcı olarak kullanılan borik asitler ve boratlar selülozik yapıdaki maddelerin yanma sıcaklıklarına erişmeden bünyelerindeki su moleküllerini uzaklaştırarak yanması erteleyebilmektedir. Bunun yanında çinko borat, borfosfatlar, amonyum fluoboratlar ve baryum metaborat gibi bor mineralleri plastik yapıları malzemelerde de yanmayı geciktirici rol üstlenmektedirler (DPT, 2001).

Bunların haricinde bor mineralleri, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve bunların dışındaki diğer mobil iletişim, elektronik ve bilgisayar teknolojilerinde kullanılan akım levhalarında bulunmaktadır (Yiğitbaşoğlu, 2004). Çimento endüstrisinde kullanılan kolemanitler çimentoların dayanıklılıklarını arttırabilmektedir. Keza kimya endüstrisinde de kullanılan alüminyum borhidritler ve bor trihidritler bir indirgeyici olarak görev almaktadırlar (Bayrak vd., 2010).

4.6. Bor Minerallerinin Enerji Bazında Kullanım Yerleri ve Alanları

Bor mineralleri enerji kaynağı olarak; güneş enerji sistemlerinde depolamadan elektrik enerji sistemlerindeki iletim kayıplarını önlemeye, hidrojen üretiminden depolamaya, direk yakıt olarak kullanımdan yakıt üretiminde katkı maddesi ve katalizöre ve nükleer enerji üretiminden yakıt pili sistemlerine kadar pek çok alanda kullanılabilmektedir. Buna göre Tablo 73’de bazı bor minerallerini enerji bazında kullanım yerleri ve verilmektedir.

Tablo 73: Bazı Bor Minerallerinin Enerji Bazındaki Kullanım Yerleri ve Alanları

Bor Mineralleri	Kimyasal Formülleri	Kullanım Yerleri ve Alanları
Magnezyum Diborit	MgB₂	Haberleşme, Görüntüleme Cihazları, Elektrik Motorları, Manyetik Rezonans, Manyetik Fırlatma Elektrik Enerjisi Şebekeleri, Hızlı Trenler
Boraks Dekahidrat	Na₂B₄O₇·10H₂O	Güneş Enerjisini Depolama
Diboranlar	B₂H₆	Jet ve Roket Yakıtlarında Katalizör
Lityum Fluoborat	LiBF₄	Pil Elektrolitleri
Lityum Borhidrit	LiBH₄	Roket Yakıtı
Sodyum Borhidrit	NaBH₄	Hidrojen Üretimi, Depolama, Jet ve Roket Yakıtı ve Yakıt Pili Teknolojilerinde Enerji Girdisi
Potasyum Borhidrit	KBH₄	Hidrojen Üretimi
Sodyum Tetaborat	Na₂B₄O₇	Yakıtlar İçin Katkı Maddesi
Bor Triflorür	BF₃	Petrol Rafinerilerinde Katalizör
Bor Triklorür	BCl₃	Petrol Rafinerilerinde Katalizör
Bor Esterleri	-	Petrol Rafinerilerinde Katalizör
Pentaboran	B₅H₉	Jet ve Roket Yakıtı
Dekaboran	B₁₀H₁₄	Jet ve Roket Yakıtı
Bor-11	B₁₁	Nükleer Füzyon Reaktörlerinde Girdi
Tetrametil Amonyum Borhidrit	(CH₃)₄NBH₄	Yüksek Hidrojen Yoğunluğu Gerektiren Nükleer Uygulamalar

Tetraetil Amonyum Borhidrit	(C₂H₅)₄NBH₄	Yüksek Hidrojen Yoğunluğu Gerektiren Nükleer Uygulamalar

Kaynak: Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; Helvacı, 2004; Sümer, 2004;

Yiğitbaşoğlu, 2004' Ten Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

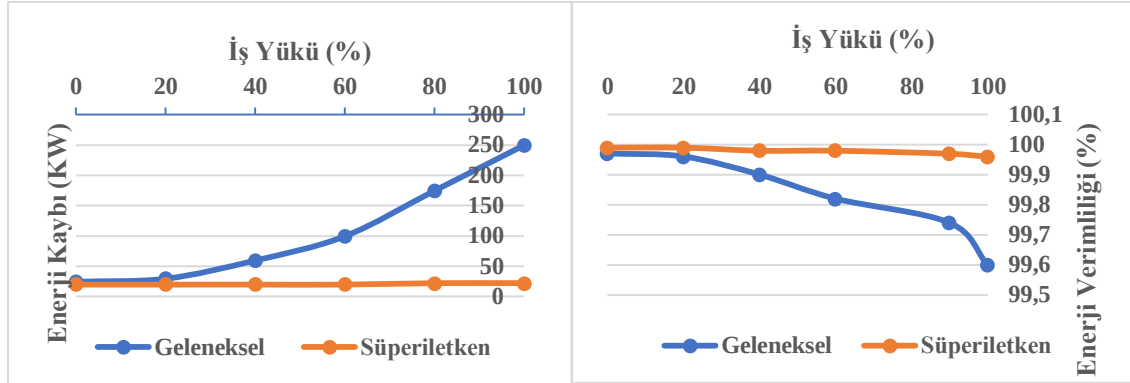
Ancak Tablo 73'de de görüleceği üzere bor minerallerinin enerji bazında pek çok kullanım alanına sahip olmasına rağmen bu bölümde, Türkiye'nin mevcut enerji ihtiyacına ve enerji verimliliğine çözüm oluşturabilmesi açısından genel itibariyle potansiyel vadeden Bor-11, sodyum borhidrit ve magnezyum diborid gibi bor mineralleri ve kullanım alanları ve dünya'da ve Türkiye'de yapılan çalışmalar ele alınacaktır. Bunlara ek olarak etilboran ve pentaboranlarla ilgili yapılan çalışmalardan da bahsedilecektir.

4.6.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborit (MgB₂)

Süperiletkenlik, sıcaklık değerlerinin belirli bir eşik seviyesinde (kritik değer) altına indiğinde her türden elektriksel akım dirençlerinin ortadan kalkması olayıdır. Bunu için kritik eşik değeri -230°C (39-40 K) olarak kabul edilmektedir. Süperiletkenlik sayesinde elektriksel akım dirençleri ortadan kalkarak 1 amper/cm³ gibi yüksek mertebelerdeki akım yoğunlukları hiçbir enerji kaybına uğramadan taşınabilmektedir (Yılmaz, 2002). Süperiletken yapılar genellikle kablo formunda kendilerini gösterebilmektedirler ve süperiletken kablolar, normal kablolarla kıyasla 2 ila 10 kat daha fazla akım taşıyabilmektedir. Ayrıca bu kablolar süperiletkenlik özelliği gösterebilmeleri için soğutma işlemine tabii tutulacağından yer altında yer almaktadırlar. Bu durum, kablolarda herhangi bir ısınmanın meydana gelmemesi nedeniyle enerji verimliliğini de arttırabilmektedir (Terzioğlu – Çavuş, 2015). Bu bakımdan süperiletkenlik özelliği gösteren malzemeler enerjinin daha verimli bir şekilde iletilmesine yönelik enerji nakil hatlarından enerjinin manyetik alanlarda depolanmasına, güçlü manyetik özellik gerektiren uygulamalardan mikro-elektrik uygulamalarında istenmeyen sıcaklıkların uzaklaştırılmasına ve jeneratörlere kadar pek çok alanda kullanılabilmektedir (Yılmaz, 2002).

Geleneksel ve süperiletken yapıların enerji santrallerindeki mevcut enerji kayıplarının ve enerji verimliliklerinin görünümü Grafik 76'da gösterilmektedir. Buna göre süperiletken

yapılar, geleneksel yapılara kıyasla iş yükü arttıkça daha düşük enerji kayıplarına neden olurken enerji verimliliğinde ise daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadırlar (Grafik 94).



Grafik 94: Geleneksel ve Süperiletken Yapıların Enerji Santrallerindeki Enerji Kayıpları ve Enerji Verimlilik Düzeyleri

Kaynak: Berger vd., 2010'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Süperiletken yapılar, kendilerini iki şekilde gösterebilmektedir. Bunlardan ilki düşük sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösteren yapılar, ikincisi ise yüksek sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösteren yapılardır. Düşük sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösteren yapılar, 25 K'den (-248°C) daha düşük sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği göstermektedirler. Bu yapıların bu denli düşük sıcaklık değerlerine ulaşabilmeleri için sıvılaştırılmış helyum ile soğutulmaları gerekmektedir. Bu şekilde bir soğutma, helyum eldesindeki kıtlıktan dolayı oldukça pahalı olabilmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösteren yapılar ise, 25 K ila 150 K (-248°C ila -123°C) arasındaki sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösterebilmektedir. Bu yapıların bu sıcaklık değerlerine ulaşabilmeleri için sıvılaştırılmış azot ile soğutulmaları gerekmektedir. Bu şekilde bir soğutma, helyum soğutmasına göre daha ucuz ve kompakt olabilmektedir (Kaya – Devocioğlu, 2006).

Tablo 74'te süperiletkenlik gösteren bazı elementlerin ve bileşiklerin elektriksel direncin ortadan kalktığı yani süper iletken özellik gösterdiği sıcaklık değerleri verilmektedir.

Tablo 74: Süperiletkenliğe Sahip Bazı Elementlerin ve Bileşiklerin Süperiletken Özellik Gösterdiği Sıcaklık Değerleri

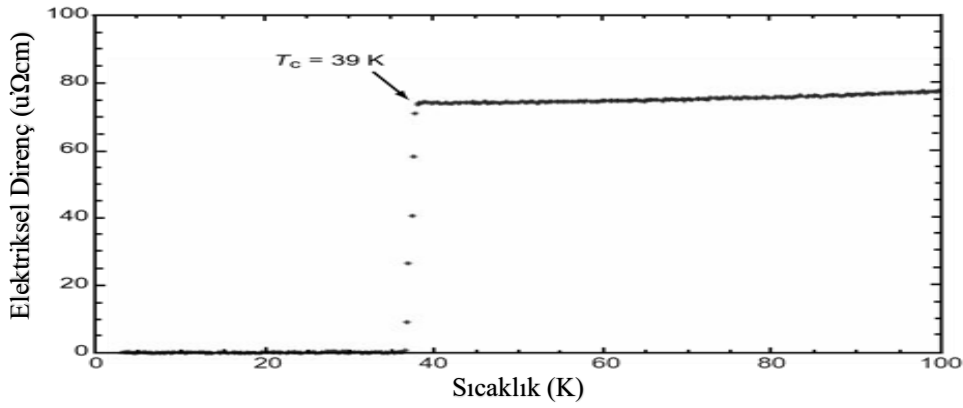
Süperiletkenler	Süperiletken Kritik Sıcaklık Değerleri T_c (K) - °C	Süperiletkenler	Süperiletken Kritik Sıcaklık Değerleri T_c (K) - °C
Alüminyum (Al)	1,19 - (-271,9)	Nibodyum alüminit (Nb₃Al)	18,7 - (-254,4)
Galyum (Ga)	1,08 - (-272)	Nibodyum - tin (Nb₃Sn)	18 - (-255,1)
Cıva (Hg)	4,15 - (-269)	Nibodyum - galyum (NbGa)	23 - (-250,1)
İndiyum (In)	3,4 - (-270)	Nibodyum nitrit (NbN)	15,7 - (-257,4)
Nibodyum (Nb)	9,26 - (-263,8)	Nibodyum titanyum (NbTi)	9,3 - (-263,8)
Kurşun (Pb)	7,19 - (-265,9)	Nibodyum (Alüminyum-Germenyum) (Nb(AlGe))	21 - (-252,1)
Kalay (Sn)	3,72 - (-269,4)	Vanadyum - Silisyum (V₃Si)	16,9 - (-256,2)
Tantal (Ta)	4,47 - (-268,6)	Vanadyum - Galyum (V₃Ga)	14,8 - (-258,3)
Titanyum (Ti)	0,39 - (-272,7)	Kurşun - Mobilden -Kükürt (PbMoS)	14,4 - (-258,7)
Vanadyum (V)	5,3 - (-267,8)	Tungsten (W)	0,015 - (-273,1)

Kaynak: Ankara Üniversitesi Süperiletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 8 Aralık

2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Buna göre Tablo 74'te verilmiş olan süperiletken yapıdaki elementlerin ve bileşiklerinin tümünün düşük sıcaklık değerlerinde süperiletkenlik özelliği gösteren yapılar olduğu görülmektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere bu yapıların süperiletkenlik özelliği gösterebilmesi için yapılması gereken soğutma işlemleri oldukça pahalı olabilmektedir. Bunların dışında süperiletken malzemeler konusunda yapılan çalışmalarda rutenyumdan (Ru) sonra önemli malzemelerden biri olan bakır oksit (Cu₂O) ve bunun dışındaki diğer malzemelerden süperiletkenlik için elde edilen en yüksek sıcaklık değerleri 33 K (-240 °C) olmuştur (Yılmaz, 2002).

Ancak 2001 yılında bazı Japon bilim insanları (Akimitsu vd.) yaptığı çalışmalarda magnezyum diboritin (MgB₂) yüksek sıcaklık değerlerinde süperiletken özelliğini keşfetmişlerdir. Akimitsu vd. (2001) yaptıkları çalışmada magnezyum diboritin 39 K (-243°C) derecesine kadar soğutulduğunda elektriksel direncinin kaybolarak süperiletken bir yapıya kavuştuğunu belirtmiştir. Bu durum Grafik 95'te gösterilmektedir.



Grafik 95: Magnezyum Diboritin (MgB₂) Sıcaklık Elektriksel Direnç İlişkisi

Kaynak: Akimitsu vd., 2001.

Magnezyum diboritin süperiletkenlik konusunda Japon bilim adamları tarafından bu keşfin süperiletken malzemeler konusunda dünya genelinde yapılacak olan çalışmalarda yol gösterici nitelikte olabileceği ifade edilmiştir.

4.6.2. Hidrojen Üretiminde ve Depolamada Sodyum Borhidrit (NaBH₄)

4.6.2.1. Sodyum Borhidrit (NaBH₄)

Periyodik tablonun 7A grubunda yer alan aktinitler haricindeki diğer tüm elementlerin yapılarında borhidridler bulunmaktadır. Ancak bunların içerisinde ticari öneme sahip olan borhidridler alkali grubu metallerin yapılarında bulunan borhidridlerdir. Bu hidridler, indirgeyici özelliğe sahip olan yapılar bilinmekte ve kimyasal tepkimelerin meydana gelmesinde hidrojen kaynağı olarak kullanılabilir. Bunlar içerisinde en önemli hidritlerden biri ise sodyum borhidrittir (NaBH₄) (Bilici, 2004).

Sodyum borhidrit (NaBH₄) endüstriyel ölçekte bir indirgeyici olmakla birlikte organik ve farmasötik (ilaç endüstrisinde kullanılan maddeler) maddelerin sentezlenmelerinde, atık suların arıtılmalarında ve kâğıtların ağartılmaları işlemlerinde kullanılabilmektedir. Bunların haricinde enerji hammaddesi olarak doğrudan ya da hidroliz reaksiyonu ile hidrojen üretiminde depolanmasında da kullanılabilmektedir (Wu vd., 2004).

Sodyum borhidrit (NaBH₄), kuru havalarda sabit, nemli havalarda ise yavaş bir reaksiyon özelliği gösteren katı yapılı bir bor bileşiğidir. Vakumlu bir şekilde 400 °C'nin üzerinde

ısıtılabilmekte ve ısıtıldığında da gözle görülebilecek türden bozulmalara neden olmamaktadır. Sodyum borhidrit (NaBH_4), suda yüksek çözünürlüğe sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda ısıtılmadığı müddetçe havada alev almamakta, su ile reaksiyona girdiğinde hidrojen üretimini gerçekleştirmektedir. Reaksiyona giren su, oda sıcaklığında ya da bundan daha düşük sıcaklıklarda ise reaksiyonda hidrojen oluşum hızı yavaşlayabilmektedir. Ancak su soğuksa sodyum borhidritin (NaBH_4) önemli bir bölümü suyun düşük sıcaklık değerleri altında buharlaştırılması yoluyla tekrardan geri kazanılabilmektedir. Hidrojen üretimindeki artış, sıcaklık değerlerinin yükseltilmesiyle ya da kimyasal reaksiyona katılan hızlandırıcı özellikteki katalizörlerin sodyum borhidrit (NaBH_4) ile karıştırılması suretiyle sağlanabilmektedir (Schlesinger – Brown, 19 Aralık 1950). Sodyum borhidritin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 75’te verilmektedir.

Tablo 75: Sodyum Borhidritin (NaBH_4) Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Moleküler Ağırlığı (g/mol)	37,8
Teorik Olarak Ağırlıkça H_2 İçeriği (%)	10,8
Ergime Noktası (2-6 Atm. H_2 Basıncında (°C)	500
Vakum Altında Bozunma Sıcaklığı (°C)	400
Kristal Yapısı ($A=6,15\text{\AA}$)	Yüzey Merkezli Kübik
Oluşum Entalpisi (A, H°) 25°C (KJ/mol)	188,6
Oluşum Gibbs Enerjisi ($\Delta_f G^\circ$) 25°C (KJ/mol)	123,9
Entropi (S°) (J/mol/K)	101,3
Isıl Kapasite (C) 25°C (J/mol/K.H)	86,8

Kaynak: Bilici, 2004.

Sodyum borhidrit (NaBH_4), su, sıvı amonyak, metilamin, etilamin vb. çok sayıdaki madde ile karışım (çözelti) oluşturabilmektedir. Sodyum borhidrit (NaBH_4), bu çözücü maddeler içerisinde en çok sıvılaştırılmış amonyak ve saf su içerisinde çözünebilmektedir. Özellikle saf su ile çözelti oluşturduğunda saf suyun sıcaklık değeri arttıkça çözünürlükte artabilmektedir. Buna göre sodyum borhidrit (NaBH_4), 25 °C sıcaklık değerinde 100 g saf su ile çözelti oluşturduğunda 55 g’ı çözünürken, sıcaklık

60°C'ye çıkarıldığında 88.5 g'ı çözünebilmektedir. Sıvılaştırılmış amonyak içerisinde ise 25°C'de 104 g çözünmektedir (Tablo 76).

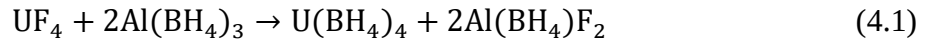
Tablo 76: Sodyum Borhidridin (NaBH₄) Bazı Karışım Maddeleri İçerisindeki Çözünürlüğü

Çözücü Maddeler	Sıcaklık (°C)	Çözünürlük (g/100 g çözücü)
Su	0	25
	25	55
	60	88.5
Amonyak (Sıvı)	25	104
Metilamin	20	28
Etilamin	17	21
n-Propilamin	28	10
İzopropilamin	28	6
n-Bütilamin	28	5
Piridin	0-75	3-3.5
Morfolin	25	1.4
	75	2.5
Etanol	20	4
Metanol	20	16.4
İzopropanol	25	0.37
Dimetil Asetamit	20	14
Dimetil Sülfoksit	25	5.8
Asetonitril	28	2
Tetrahidrofuran	20	0.1

Kaynak: Schlesinger vd., 1953a; Wade, 1983.

4.6.2.2. Sodyum borhidrit (NaBH₄) Üretim Yöntemleri

Borhidritler (BH₄), ilk olarak 1930 yılında Chicago Üniversitesi'ndeki bilim adamları tarafından üretilmiştir. Bu hidritlerden alüminyum kökenli olanlar uranyum ile bileşik oluşturarak savaşlarda kullanılmaya başlanmıştır.

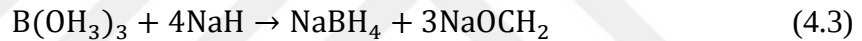
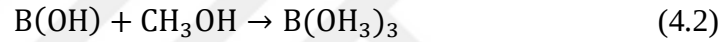


Bunların haricinde pek çok bilim adamı tarafından diğer borhidritlerin (potasyum, lityum, sodyum vb.) de kullanım alanları incelenmiştir. Sodyum borhidrit (NaBH₄), ilk olarak roket motorlarında ve balonlarda sonrasında da yakıt pili teknolojilerinde hidrojen hammaddesi ve ayrıca doğrudan olarak kullanılabilmesi nedeniyle ön plana çıkmıştır. Hem doğrudan hem de hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılabilen sodyum borhidrit çeşitli

yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu yöntemler içerisinde bilinen en eski yöntem Schlesinger ve Alman Bayer AG. firması tarafında üretilen yöntemleridir. Daha sonrasında bunların haricinde pek çok üretim yöntemi geliştirilmiştir (Amendola vd., 30 Aralık 2003; Schlesinger – Brown, 1953).

Schlesinger Prosesi

Schlesinger Prosesinde, öncelikli olarak 1 mol değerindeki borik asit ($B(OH)_3$), 1 mol değerindeki metanol (CH_3OH) ile kimyasal reaksiyona girerek 1 mol değerinde trimetil borat ($B(OCH_3)_3$) üretimi gerçekleşmektedir. Daha sonrasında üretilmiş olan bu trimetil borattan ($B(OCH_3)_3$) da, 4 mol sodyum hidrit (NaH) ile indirgenerek 1 mol değerinde sodyum borhidrit ($NaBH_4$) ve yan ürün olarak 3 mol değerinde sodyum metoksit ($NaOCH_3$) üretilmektedir.



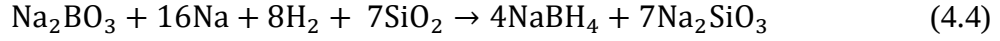
(Schlesinger vd., 1953b).

Reaksiyon neticesinde 1 mol sodyum borhidrit ($NaBH_4$) eldesi sağlamak için 4 mol sodyuma ihtiyaç duyulması prosesin ekonomik açıdan verimli olmasını engellemektedir. Bunun yanında reaksiyon sırasında kullanılan sodyumun yaklaşık %75'inin sodyum metoksite ($NaOCH_3$) dönüşmesi prosesin verimli olmasını engelleyen diğer bir husustur (Bilici, 2004). Ayrıca reaksiyon da yer alan trimetil borat ($B(OCH_3)_3$) üretimiyle ilgili de sorun mevcuttur. Bu sorun, trimetil borat üretilmesiyle ilgili olarak borat ve metanolün (CH_3OH) birlikte damıtılması ve trimetil boratı ($B(OCH_3)_3$) ayırtmak için de ilave bir işlemin uygulanması gerektiğidir (Wu vd., 2004).

Bayer Prosesi

Schlesinger Prosesine kıyasla bu proses, üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu proseste 1 mol susuz boraks ($Na_2B_4O_7$), 16 mol sodyum (Na) ve 7 mol kuvars (SiO_2) 8 mol hidrojen (H_2) varlığı altında sodyum borhidrit ($NaBH_4$) üretimini gerçekleştirmek üzere reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon neticesinde 4 mol

sodyum borhidrit (NaBH₄) üretimi gerçekleşirken yan ürün olarak 7 mol sodyum silikat (Na₂SiO₃) açığa çıkmıştır.



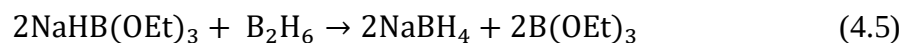
(Schubert vd., 12 Şubat 1963).

Reaksiyonda, susuz boraks (Na₂B₄O₇) ve silis öncelikli olarak ergiyik haldeki sodyum borosilikat camının üretildiği döner durumdaki eritme fırınına beslenmektedir. Daha sonrasında borosilikat cam, döner yapılı değirmende ufalanmak suretiyle ince bir şekilde öğütülmekte ve buradan da depolama hunisine aktarılmaktadır. Burada sodyum borosilikat cam ve sodyum (Na) 450 ila 500 °C’de ve 3 atm. basınçta hidrojen ile reaksiyona sokulmaktadır. Reaksiyon sonucunda reaktörden gelen karışım, bir cendereye boşaltılmakta ve buradaki sodyum borhidrit (NaBH₄), sıvı haldeki amonyak tarafından çözünerek sodyum silikattan (Na₂SiO₃) uzaklaştırılmaktadır. Daha sonrasında çözelti, kurutucuya beslenerek katılaşmış halde sodyum borhidrit (NaBH₄) elde edilmektedir (Cooper, 21 Ekim 1969).

Bu proseste de 1 mol sodyum borhidrit (NaBH₄) üretimi için 4 mol sodyuma (Na) gereksinim duyulması prosesin enerji maliyetini arttırmakta ve dolayısıyla da ekonomik açıdan verimliliğini düşürmektedir. Çünkü Schlesinger Prosesinde olduğu gibi bu proseste de sodyum (Na) kullanmanın enerji maliyeti sodyum borhidritten (NaBH₄) elde edilen enerjiye kıyasla yüksektir. Ayrıca reaksiyon sonucunda yüksek miktarda sodyum silikat üretimi gerçekleşmektedir. Bu yan ürün yeniden geriye kazanılamadığından bunları imha etmek için ekstra enerji harcanması gerekmektedir (Amendola vd., 30 Aralık 2003).

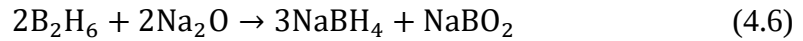
Diboranlardan Sodyum Borhidrit (NaBH₄) Sentezi

1 mol diboran (B₂H₆) ile 2 mol sodyum trietoksitborhidrit (NaHB(OEt)₃) kimyasal bir reaksiyona girerek 2’şer mol sodyum borhidrit (NaBH₄) ve yan ürün olarak trietil borat B(OEt)₃ üretilmektedir.



(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

2 mol diboran (B₂H₆) ile 2 mol sodyum speroksit (Na₂O) indirgemesiyle 3 mol sodyum borhidrit (NaBH₄) ve 1 mol sodyum metaborat (NaBO₂) elde edilmektedir. Reaksiyon molar bazda avantajlı görülmekle birlikte yan ürün olarak elde edilen sodyum metaborat (NaBO₂) tekrardan sodyum borhidrite (NaBH₄) dönüştürebilmektedir.



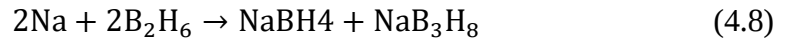
(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

Bir diğer diboran sentezi, kolayca bulunabilen hidrit iyonlarını içeren sodyum trimetiloksitborhidritin (NaBH(OCH₃)₃) sodyum borhidrit (NaBH₄) eldesi için diboranla (B₂H₆) hızlı bir şekilde reaksiyonunu içermektedir. Reaksiyonda girdi olarak kullanılan 1 mol diboran (B₂H₆) ve 2 mol sodyum trimetiloksitborhidritin (NaBH(OCH₃)₃) neticesinde 2'şer mol sodyum borhidrit (NaBH₄) ve bor trimetiloksit (B(OCH₃)₃) üretimi gerçekleşmektedir.



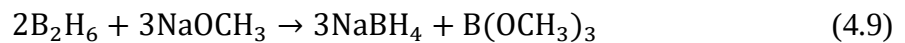
(Schlesinger vd., 1953a).

Dietil eter içerisinde sodyum amalgamın ve diboranın (B₂H₆) 24 saat kesintisiz indirgenmesinden sodyum borhidrit (NaBH₄) üretilmektedir.



(Bilici, 2004).

Sodyum borhidrit (NaBH₄), sodyum metoksit (NaOCH₃) ile diboranın (B₂H₆) reaksiyonu neticesinde oluşmaktadır. Reaksiyon sonucunda 3 mol sodyum borhidrit (NaBH₄) ve 1 mol bor trimetiloksit (B(OCH₃)₃) üretilmektedir.



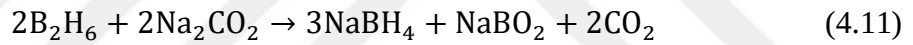
(Schlesinger vd., 1953a).

Diboran (B₂H₆) ile sodyum hidroksitin (NaOH) reakte olmasıyla sodyum borhidrit (NaBH₄) üretimi gerçekleşmektedir. Buna göre 1 mol diboran (B₂H₆) ile 4 mol sodyum hidroksit (NaOH), 3 mol sodyum borhidrit (NaBH₄), 2 mol su (H₂O) ve 1 mol sodyum metaboratı (NaBO₂) açığa çıkarmaktadır. Reaksiyon sonucunda 3 mol sodyum borhidrit üretmek için 4 mol sodyuma ihtiyaç duyulsa da sodyum metaborat oluşumu bunu telafi etmektedir.



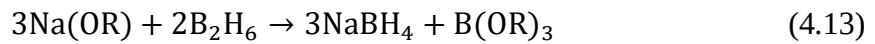
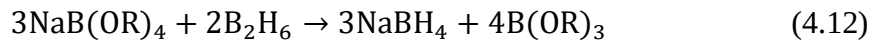
(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

2 mol sodyum karbonatın (Na₂CO₃) 2 mol diboran (B₂H₆) ile sentezlenmesiyle 3 mol sodyum borhidrit (NaBH₄), 2 mol karbondioksit (CO₂) ve 1 mol sodyum metaborat (NaBO₂) oluşmaktadır. Reaksiyon, molar ve sodyum metaboran üretimi açısından avantajlı olmakla birlikte tek sakıncası karbondioksit üretimidir.



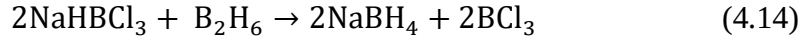
(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

Sodyum tetrametoksiborat (NaB(OR)₄) ve alkoksitin (Na(OR)) çeşitli reaksiyonlara uğraması neticesinde sodyum borhidrit (NaBH₄) elde edilebilmektedir.



(Bilici, 2004).

Didoran (B₂H₆) sentezine dayanan diğer bir alternatif sodyum borhidrit (NaBH₄) üretim yöntemi de sodyum trikloritborhidrit (NaHBCl₃) kimyasal sentezidir. 2 mol sodyum trikloritborhidrit (NaHBCl₃) 1 mol diboran (B₂H₆) ile reaksiyonu sonucunda 2'şer mol sodyum borhidrit (NaBH₄) ve boron triklorit (BCl₃) üretilmektedir.



(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

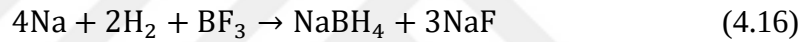
Sodyum trimetiloksitborhidritin (NaHB(OMe)_3), diboran (B_2H_6) ile reaksiyonu ile sodyum borhidrit (NaBH_4) üretimi gerçekleşmektedir.



(Amendola vd., 30 Aralık 2003).

Borhalojenürlerinden Sodyum Borhidrit (NaBH_4) Sentezi

Sodyum borhidrit (NaBH_4), sodyumun (Na) hidrojen (H_2) ve bortriflorür (BF_3) içerisine kimyasal yolla enjekte edilmesi suretiyle üretilebilmektedir. Reaksiyon sonucunda yan ürün olarak 3 mol sodyum florür (NaF) elde edilmektedir.



(Jackson, 8 Mayıs 1956).

Sodyum borhidrit (NaBH_4), bilyalı bir değirmende gaz halinde bulunan bortriflorür (BF_3) ile reaksiyona girmesi neticesinde elde edilmektedir. Reaksiyon sonucunda yan ürün olarak 3 mol sodyum florür (NaF) açığa çıkmaktadır. Hem eşitlik (4.16) hem de (4.17) de 1 mol sodyum borhidrit (NaBH_4) üretebilmek için 4 mol sodyuma (Na) gereksinim duyulmaktadır.



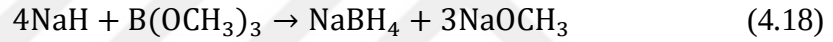
(Hansley vd. 26 Nisan 1960).

Sodyum borhidrit (NaBH_4) eldesinde diğer bir yöntem sentez oluşturabilmek için bir bor kaynağı olarak trialkil amin borhalojenürlerden yararlanılmasıdır. Reaksiyon neticesinde sodyum borhidrit (NaBH_4), polietilen glikol metil eter ya da sıvılaştırılmış amonyak aminlerle ekstraksiyon işlemi sonucunda saf halde elde edilmektedir (Bronaugh, 31 Mart 1959).

Bor Trimetil Esterlerinden ve Alkoksı Bor Bileşiklerinden Sodyum Borhidrit (NaBH₄) Sentezi

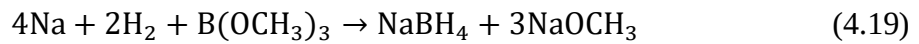
Alkali metal borhidritler, alkali metal hidrürlerin alkali borat, hidrojen ve alkali metal alkoksı borhidritlerle ayrıca sodyum trimetoksiborhidritlerin, metal hidritlerle ve sodyum tetraalkoksiboratlardan dietilen glikol, dimetil eterli ortamdaki rekristalizasyonu ile indirgenmesi süratiyle üretilebilmektedir (Ashby – Foster, 1962; Schlesinger – Brown, 19 Aralık 1950).

Sodyum hidrit (NaH), metil borat (B(OCH₃)₃) ile 200°C ila 275°C’de reaksiyona sokularak sodyum borhidrit (NaBH₄) üretilir. Reaksiyon sonucunda 1 mol sodyum borhidritin (NaBH₄) yanında yan ürün olarak 3 mol sodyum metoksit (NaOCH₃) elde edilmektedir.



(Cooper, 21 Ekim 1969).

Sodyum borhidrit (NaBH₄), alkali metal – sodyum (Na) ve alkali borat karışımlarının – metil borat (B(OCH₃)₃) hidrojen varlığı altında 1000 lbs. basınç altında ısıtılmasıyla da üretilmektedir.



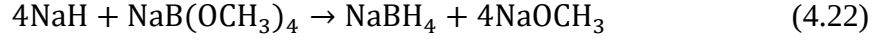
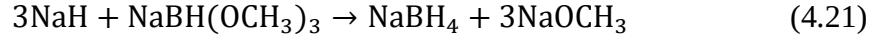
(Schlesinger – Brown, 19 Aralık 1950).

Sodyum trimetoksiborhidrit (NaBH(OCH₃)₃), 250°C ila 255°C’de küçük bir amino hidrojenatörün havası alınmış astarlarında ısıtılmak suretiyle üretilebilmektedir. Reaksiyon sonucunda yan ürün olarak 3 mol sodyum tetrametoksiborat (NaB(OCH₃)₄) açığa çıkmaktadır.



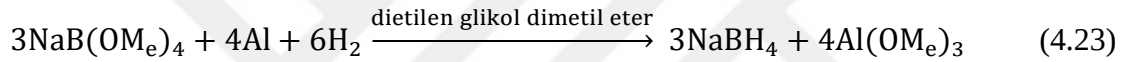
(Schlesinger vd., 1953a).

Sodyum trimetoksiborhidrit ($\text{NaBH}(\text{OCH}_3)_3$) ve sodyum tetrametoksiborat ($\text{NaB}(\text{OCH}_3)_4$) kaynaklı diğer sodyum borhidrit (NaBH_4) üretimleri;



şeklindedir (Schlesinger vd., 1953a).

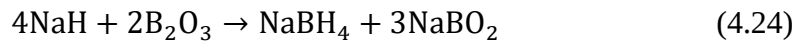
Sodyum tetraalkoksiboratlardan ($\text{NaB}(\text{OMe})_4$), alüminyum (Al) ve hidrojen indirgenmesiyle de sodyum borhidrit (NaBH_4) sentezlenebilmektedir. Reaksiyon sonucunda 3 mol sodyum borhidrit (NaBH_4) elde edilmesine sodyum tetraalkoksiboratin ($\text{NaB}(\text{OMe})_4$) elde edilmesindeki güçlükler reaksiyonun verimini düşürmektedir



(Ashby – Foster, 1962).

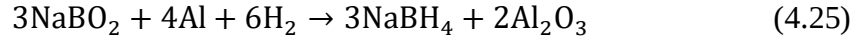
Bor Oksit ve Çeşitli Bor Minerallerinden Sodyum Borhidrit (NaBH_4) Sentezi

Sodyum borhidrit (NaBH_4), sodyum hidrit (NaH) ve bor oksitin (B_2O_3) 300 ila 375°C’de 46 saat süre ile bilyalı bir değirmende öğütülmesiyle elde edilmektedir. Reaksiyonda girdi olarak kullanılan 4 mol sodyum hidrit (NaH) ve 2 mol bor oksit (B_2O_3) neticesinde 1 mol sodyum borhidrit (NaBH_4) ve 3 mol sodyum metaborat (NaBO_3) üretimi gerçekleşmiştir. Reaksiyon sonucunda sodyum bor hidrit (NaBH_4) üretimi için geri dönüştürülebilen sodyum metaborat (NaBO_2) üretilmesine rağmen 1 mol sodyum borhidrit üretimi için 4 mol sodyum kullanılmış olması ve reaksiyonun yüksek sıcaklık değerleri altında ve kapalı bir ortamda gerçekleşmiş olması önemli bir engel teşkil etmektedir.



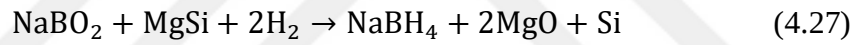
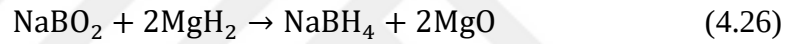
(Schlesinger – Brown, 19 Aralık 1950).

Sodyum borhidrit (NaBH_4), sodyum metaboratın (NaBO_2) alüminyum (Al) ve silisyum dioksit (SiO_2) kullanarak 100 atm. değerindeki hidrojen (H_2) basıncında indirgenmesiyle elde edilmektedir.



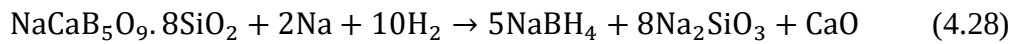
(Bilici, 2004).

Sodyum metaboratın (NaBO_2) magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) ile karıştırılıp bu karışımın 0.1 ila 7MPa hidrojen (H_2) basıncı altında karıştırılması ve ardından 400°C ila 550°C 'lerde oktav kullanılarak tavlınması ile sodyum borhidrit (NaBH_4) sentezi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca sodyum borhidritin (NaBH_4), kok ve sodyum metaborat (NaBO_2) kullanılarak geri dönüşümü sağlanabilmektedir. Reaksiyon 550°C 'de %98'lik verime sahiptir.



(Kojima – Haga, 2003).

Bir diğer yöntem de kurutulmuş üleksitin (NaCaB_5O_9) kuvars tozu ile birlikte yaklaşık 1000°C 'de sinterlenmesiyle elde edilmektedir. Sinterlenen karışım, 3 atm hidrojen (H_2) basıncı altında 390°C ila 540°C 'de sodyum (Na) ile oktavda reaksiyona girerek sodyum borhidrit (NaBH_4) üretimi gerçekleştirilmiştir.



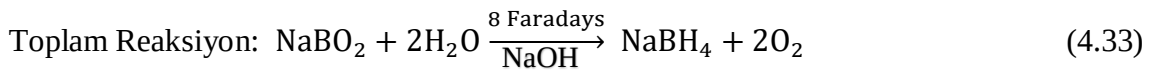
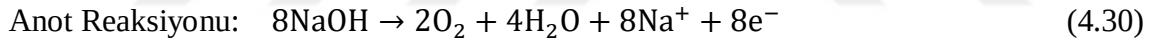
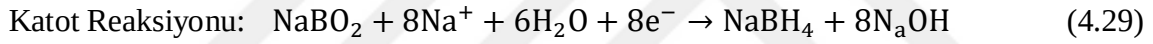
(Schubert vd., 12 Şubat 1963).

Elektrokimyasal Sentez

Elektrokimyasal sentez yani elektroliz yöntemi, sodyum borhidritin (NaBH_4) üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla geliştirilmiştir. Sodyum borhidrit (NaBH_4) üretim maliyetlerindeki temel belirleyici unsur üretiminde girdi olarak kullanılan metalik sodyum maliyetleridir. Bundan önceki yöntemlere bakıldığında bu yöntemlerin büyük bir

bölümünde 1 mol sodyum borhidrit (NaBH_4) üretmek için yaklaşık 4 mol sodyuma gereksinim duyulmaktadır. Bu bakımdan elektroliz yöntemi bunu değiştirmeye yönelik olarak geliştirilmiştir.

Elektroliz yönteminde elektroliz işlemini gerçekleştirmek için bir membrandan yararlanılmaktadır. Membran, katyon seçimlidir ve eksi yüklü anot ve artı yüklü katottan oluşmaktadır. Bu yapıdaki katot bölmesinde borat iyonlarını içeren çözelti yer alırken anotta da alkali metal katyonlarının bulunduğu çözelti bulunmaktadır. Elektroliz işlemi sırasında elektriksel doğru akım, membran boyunca katotta doğru ilerleyerek katot içerisinde bulunan borat anyonlarının borhidrit iyonlarına doğru indirgemesi sağlamaktadır. İşlemin temel amacı, katot bölümünde alkali koşulların devamlılığını oluşturarak alkali borhidritin stabilizasyonunu sağlamak ve bunun hidroliz neticesinde de alkali metal borata ve hidrojene indirgenmesini minimize etmektir. İşlemin reaksiyonları (4.29), (4.30), (4.31), (4.32) ve (4.33)'te verilmektedir.

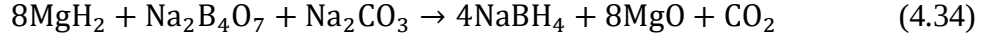


Sistemin önemli bir avantajı katolitteki borat iyonlarının sulu haldeki sodyum metaborat (NaBO_2) çözeltisinden, anottaki alkali metal çözeltilerinin ise sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinden sağlanmasıdır (Cooper, 22 Mayıs 1973). Sistemdeki diğer bir avantajlı durum ise, elektroliz sonucunda meydana gelen 1 mol sodyum borhidrit (NaBH_4) için 1 mol kullanılması ve yan ürün olarak ise zararsız oksijenin açığa çıkmasıdır.

Mekanik ve Kimyasal Sentez

Mekanik ve kimyasal olarak sodyum borhidrit (NaBH_4), magnezyum hidritin (MgH_2) oda sıcaklığında susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve çeşitli sodyum bileşikleriyle karışım

oluşturarak bilyalı bir değirmende öğütülmesiyle gerçekleştirilmektedir. Reaksiyonda ürün olarak elde edilen sodyum borhidrit (NaBH_4), bir argon (Ar) atmosferi altında %99 saflığındaki susuz etilendiamin ile ekstraksiyon sonucunda ayrılır ve oluşan ekstraksiyon çözeltisinin 0.5MPa basınç altında buharlaştırılması suretiyle elde edilir.



(Li vd., 2003a).

Diğer bir üretim yöntemi de magnezyum borhidritin (MgH_2) geri kazanılmasıyla elde edilmektedir. Magnezyumun (Mg) hidrojen varlığı altında elde edilen magnezyum borhidritin (MgH_2) sodyum metaborat (NaBO_2) ile kimyasal reaksiyonu sonucunda sodyum borhidrit (NaBH_4) üretilmektedir.



(Liv vd., 2003b).

4.6.2.3. Sodyum Borhidritten (NaBH_4) Hidrojen Üretimi ve Depolanması

Hidrojen üretim yöntemlerinde bir diğeri de sodyum borhidritin (NaBH_4) su (H_2O) ile hidrolizi sonucunda elde edilebilmektedir. İşlemin kimyasal reaksiyonu;

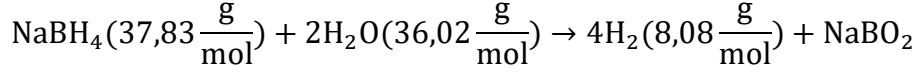


şeklindedir (Amendola vd., 2000).

Bu reaksiyonda 1 mol sodyum borhidrit (NaBH_4), sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve 2 mol saf su (H_2O) ile kimyasal bir reaksiyona girerek 4 mol hidrojen (H_2) ve 1 mol sodyum metaborat (NaBO_2) açığa çıkarmaktadır. Bu yöntem diğer hidrojen üretim yöntemlerine göre oldukça avantajlıdır. Çünkü reaksiyon sonucunda 4 mol hidrojen (H_2) elde etmek için sadece 1 mol sodyum borhidrite (NaBH_4) ihtiyaç duyulmuştur. Bunun yanında reaksiyon neticesinde yan ürün olarak elde edilen sodyum metaborat (NaBO_2)

tekrardan kimyasal bir işleme uğrayarak hidrojen oluşturmak üzere geri kazanılabilmektedir.

Reaksiyonun teorik açıdan ağırlıksal hidrojen verimliliği ise;



8,08 / 73,85 * 100= %10,94'tür. Bu değer aynı zamanda sodyum borhidritin (NaBH₄) ağırlıkça hidrojen depolayabilme kapasitesidir. Ayrıca bu oran, sodyum metaboratın (NaBO₂) tekrardan geri kazanılması durumunda artabilmektedir. Bununla birlikte reaksiyonun teorik olarak ağırlıksal hidrojen verimliliği, minimum ölçekte diğer hidrojen üretim yöntemlerinden metan-buhar reformasyonuna göre 1,84 kat, kısmi oksidasyon yöntemine göre 1,30 kat, dolaylı biyofotoliz yöntemine göre 2,17 kat, foto mayalanma yöntemine göre 21,88 kat, karanlık mayalanma yöntemine göre 364,66 kat ve SI (kükürt-iyot) yöntemine göre 2,66 kat ve Westinghouse yöntemine göre ise 5,33 kat daha verimli olabilmektedir. Bunların dışındaki diğer hidrojen üretim yöntemlerinden olan ototermal dönüşüm ve doğrudan biyofotoliz yöntemlerine göre ise verimlikleri sırasıyla sadece 0,92 ve 0,97 kat (bk. Bölüm 1) daha düşük olmakla birlikte sodyum metaboratın (NaBO₂) geri kazanılması durumunda bu yöntemlerden de daha verimli olabilmektedir.

Ayrıca bu yöntemde hem girdi olarak kullanılan ürünler hem de çıktı ürünleri hiçbir şekilde karbon salınımına neden olmamaktadır. Oysaki diğer üretim yöntemlerinde karbon salınımına neden olabilecek girdi olarak metan (CH₄) kullanılabilmekte ve çıktı olarak da karbondioksit (CO₂) oluşabilmektedir. Bunlara ek olarak sodyum borhidritin hidrojen depolama kapasitesi, hidrojen depolama yöntemlerinden olan metal hidritlerden, karbon ve bazı nano yapılardan ve gaz formunda çelik kaplardan daha iyi performans gösterebilmektedir (bk. Bölüm 1). Sodyum borhidridin mevcut hidrojen depolama kapasitesi araç teknolojileri için de oldukça yeterli durumdadır. Bu durum, hidrojen yakıtlı üretilmiş olan Toyota Mirai'nin mekanik ve performans özelliklerine bakıldığında açıkça görülmektedir (bk. Tablo 61).

Sodyum borhidrit (NaBH_4), normal şartlardaki oda koşulları altında reaksiyonu ile düşük miktarlarda hidrojen (H_2) oluşturmaktadır. Ancak reaksiyon içerisinde bir katalizör kullanılması durumunda tepkime hızı oldukça artabilmektedir (Özdemir- Akın, 2009). Tepkime hızını arttırıcı olarak anyon değişim reçineleri, florlanmış magnezyum (Mg) bazlı alaşımlar, karbon (C) ve metal oksit ile desteklenmiş platin (Pt) ve yine metal oksitlerle desteklenmiş rutenyum (Ru), Roney nikel, cobalt (Co) destekli rutenyumlar (Ru) ve nikel ve kobalt boritler kullanılmaktadır. Bunların dışında nikel-gümüş nano kompozit katalizörler, karbon nanotüpler, paladyum-karbon (Pd/C), paladyum-alüminyum oksit (Pd/y- Al_2O_3) ve radyum-karbon (Rh/C) gibi katalizörlerde inceleme konusudur (Patel vd.,2008).

Bu katalizörler içerisinde platin (Pt) ve rutenyum (Ru) varlığı altında kimyasal reaksiyonların tepkime hızları artarak yüksek miktarlarda hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yöndeki çalışmalardan biri olan Amendola vd. (2000) anyonik ve katyonik bazlı bir takım reçinelerle desteklenmiş rutenyum (Ru) katalizörlerinin tepkime hızlarını ölçmüştür. Çalışmada 25°C 'de %20 sodyum borhidrit (NaBH_4), %10 sodyum hidroksit (NaOH), %70 saf su (H_2O) ve %5 rutenyum (Ru) katalizörü kullanılmıştır. Çalışma sonucunda hidrojen tepkime hızlarının 6,3 ml/s.g'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Aynı çalışmada sıcaklığın katalizörün tepkime üzerindeki hızı da incelenmiş sıcaklık 25°C 'den 55°C 'ye çıkarıldığında yakıt pilinde hidrojen üretimi 0,3 KW/g Ru katalizöründen 2 KW/g Ru katalizörüne yükselmiştir.

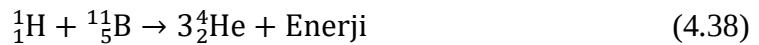
Kojima vd. (2002) yaptıkları çalışmada platin (Pt) katalizörlerini lityum kobalt oksit (LiCoO_2) ile desteklemişlerdir. Reaksiyonda 22°C 'de %20 sodyum borhidrit (NaBH_4), %10 sodyum hidroksit (NaOH), %70 saf su (H_2O) altında 50 mg ve 256 mg'lık platin-lityum kobalt oksit (Pt- LiCoO_2) katalizörleri kullanılmıştır. Reaksiyon sonucunda her iki durumda da yaklaşık olarak 1,6 l hidrojen üretimi gerçekleşmiştir. Bu üretim değerlerine 256 mg Pt- LiCoO_2 katalizörü kullanıldığında yaklaşık 100 saniyede ulaşılırken 50 mg Pt- LiCoO_2 katalizörü kullanıldığında yaklaşık 800 saniyede ulaşılabilmiştir. Ayrıca yine reaksiyon sonucunda yakıt piline 0,3 KW/g Pt- LiCoO_2 katalizör performansı sağlanabilmiştir.

Ersöz vd. (2007) ise yine Pt-LiCoO₂ katalizörünün varlığı altında farklı konsantrasyonlardaki ve sıcaklık değerlerindeki sodyum borhidrit (NaBH₄) ve sodyum hidroksit (NaOH) reaksiyonlarının tepkime hızlarını incelemişlerdir. Reaksiyon neticesinde sodyum borhidrit (NaBH₄) ve sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonlarının azaltılması ve sıcaklık değerlerinin yükseltilmesiyle reaksiyonun tepkime hızları arttırılmıştır.

Bunların dışında tepkime ekzotermik özellik göstermektedir. Bu sebepten ötürü sistem içerisine dışarıdan herhangi bir enerji girişi olmamaktadır. Bu durum, kimyasal reaksiyonun başlatılmasında suyun buharlaşması için ihtiyaç duyulan ısıyı elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Reaksiyonda kullanılan katalizör defalarca kullanılabilen tepkime istenilen zamanda durdurulabilmektedir. Bununla birlikte reaksiyon sonucunda üretilen enerji bir galon benzinden üretilen enerji ile eş değer olabilmektedir. Sistem, hem yakıt pili teknolojilerinde hem de içten yanmalı motor teknolojilerinde kullanılabilir. Ayrıca sistemden üretilen hidrojen mevcut benzin istasyonlarının alt yapılarıyla uyumlu olarak çalışabilmekte ya da ufak değişikliklerle bu alt yapılar kullanılabilir. Sodyum borhidrit (NaBH₄) asla zararlı ve tehlikeli değildir ve kolayca alev almamaktadır (Pehlivan – Çetinkaya, 2014).

4.6.3. Nükleer (Füzyon) Enerji Üretimi

Bora dayalı nükleer (füzyon) enerji üretimi, bir bor izotopu olan bor-11'in (B-11) proton (H-1) ile bombardımanı sonucunda meydana gelmektedir. İşlemin reaksiyonu denklem (4.38)'de verilmektedir.



(Muray – Holbert, 2015). Reaksiyon sonucunda 3 mol Helyum-4 izotopu ve bir miktar da enerji açığa çıkmaktadır. Reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji denklem (1.34)'ün sol tarafındaki eşitlikten hareketle;

$$Q = [(M_{\alpha} + m_x) - (m_y + M_{\beta})] \times c^2$$

ve denklem, reaksiyonda girdi ve çıktılar yer almak üzere yeniden düzenlendiğinde;

$$Q = [(M_{H-1} + M_{B-11}) - (3M_{H-4})] \times c^2$$

burada daha önceden de belirtildiği üzere proton'un (H-1) atomik kütlesi= 1.007825 akb (bk. Tablo 30), bor-11 izotopunun atomik kütlesi= 11.009306 akb ve helyum-4 izotopunun atomik kütlesi=4.002603 akb (Krane, 1996) olduğundan verilen değerler düzenlenen denklemde yerlerine koyulduğunda;

$$Q = [(1.007825 + 11.009306) - (3 \times 4.002603)] \times 931.5 \text{ Mev/akb}$$

den $Q = 8.68$ Mev olarak hesaplanabilir. Açığa çıkan kütle başına enerji değeri de Q/K 'dan $8.68/11.009306 = 0.79$ Mev/akb olabilmektedir.

Reaksiyonda girdi olarak kullanılan proton (H-1) ve bor-11 izotopu kesinlikle radyoaktif değildir. Bundan dolayı hem reaksiyon sırasında hem de herhangi bir kaza anında radyoaktivite salınımı gerçeklememektedir. Ayrıca bor-11 izotopu daha öncede belirtildiği üzere bor minarelinin içerisinde bolca bulunmaktadır. Reaksiyon sonucunda açığa çıkan teorik enerji D-D reaksiyonlarından daha iyi durumdadır. Kütle başına açığa çıkan enerji yani enerji verimliliği ise yakıt olarak uranyumun kullanıldığı fisyon reaksiyonundan %4 daha verimlidir. D-D(2) reaksiyonu ile ise hemen hemen aynıdır. Bu durum Tablo 77'de gösterilmektedir.

Tablo 77: Bazı Nükleer Fisyon ve Füzyon Reaksiyonlarının Toplam Enerji (Q) ve Kütle başı Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması

Reaksiyon Türleri	Q Değeri (Mev)	Q/K Değeri (Mev/akb)
Uranyum-235	179.5	0.76
D-D(1)	4.03	1.03
D-D(2)	3.27	0.81
D-T	17.59	3.5
D-He-3	18.32	3.66
P-B-11	8.68	0.79

Kaynak: Muray - Holbert, 2015'Ten Elde Edilen Verilerden Hesaplanarak Oluşturulmuştur.

Ancak proton-bor-11 reaksiyonu dışındaki diğer füzyon reaksiyonlarında (D-He-3 hariç) nükleer fisyon reaksiyonuna kıyasla az da olsa radyoaktivite salınımı gerçekleşmektedir. Bunun yanında bu reaksiyonlarda açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümü radyoaktif ürünlerden meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlarda radyoaktiviteyi (parantez içerisindeki ürünler) D-D(1) reaksiyonunda trityum (1.1 Mev), D-D(2) ve D-T reaksiyonlarında da nötronlar (2.45 – 14.07 Mev) oluşturmaktadır. Radyoaktiviteye neden olan bu ürünler reaksiyonlardan çıkarıldığında açığa çıkan enerji bakımından D-He-3 reaksiyonundan sonra en iyi performansa sahip reaksiyon P-B-11 reaksiyonudur (Tablo 78).

Tablo 78: Bazı Füzyon Reaksiyonlarının Enerji ve Radyoaktif Ürün Salınımı Açısından Karşılaştırılması

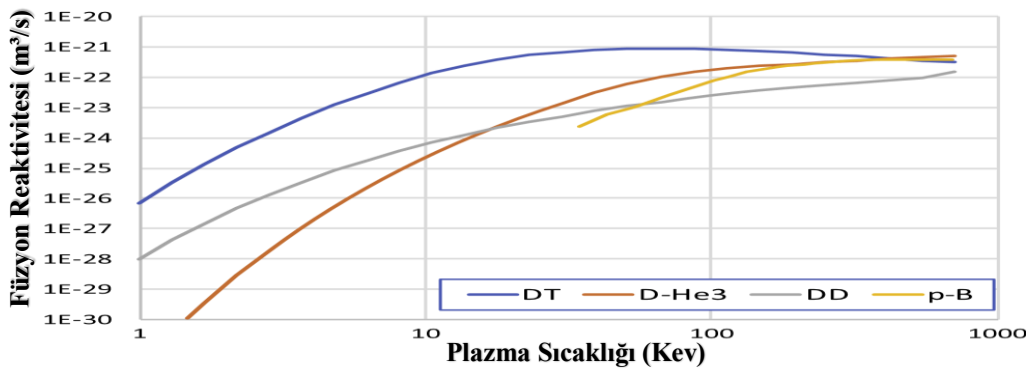
Füzyon Reaksiyonları			Açığa Çıkan Enerji (Mev)	Radyoaktivite Oluşumunu Sağlayan Ürünler	Radyoaktivitesiz Açığa Çıkan Enerji (Mev)
Reaksiyon Türleri	Girdiler	Ürünler			
D-D(1)	${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H}$	$({}^3_1\text{H}) + {}^1_1\text{H}$	4.03	Trityum	3.02
D-D(2)	${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H}$	${}^3_2\text{He} + ({}^1_0\text{n})$	3.27	Nötron	0.82
D-T	${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$	${}^4_2\text{He} + ({}^1_0\text{n})$	17.59	Nötron	3.52
D-He-3	${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He}$	${}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$	18.32	Yok	18.32
P-B-11	${}^1_1\text{H} + {}^{11}_5\text{B}$	$3{}^4_2\text{He}$	8.68	Yok	8.68

Kaynak: Muray - Holbert, 2015; Ryzhkov - Chirkov, 2019'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunların yanında P-B-11 reaksiyonu, Tablo 78'de de görüldüğü üzere D-D(2) ve D-T reaksiyonları gibi hızlı ve yüksek enerjili nötron oluşumuna neden olmamaktadır. Bu sebepten ötürü dolayı nükleer bombardıman esnasında füzyon makinelerinin iç yapılarında herhangi bir hasara neden olmamaktadır. Ayrıca reaktörler aracılığıyla üretilen enerjinin tamamına yakını (%90'ın üzerinde) elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. D-D(2) ve D-T reaksiyonları, oluşturdukları hızlı ve yüksek enerjili nötronlar nedeniyle bombardıman esnasında füzyon cihazlarının duvar malzemelerine zarara vererek bunların sıkça değiştirilmelerini zorunlu kılmakta, nötron absorbesinin bir sonucu olarak da bu malzemelerin radyoaktif hal almalarına neden olmaktadır. Bu reaksiyonların elektriksel dönüşüm verimlikleri %30 dolaylarındadır (Rostoker – Monkhorst, 26 Ağustos 2003).

D-He-3 reaksiyonu ise, herhangi bir radyoaktif ürün salınımına neden olmamakla birlikte tüm füzyon reaksiyonları içerisinde hem toplam hem de birim başına açığa çıkan enerji bakımından teorik açıdan en iyi performansa sahip reaksiyondur. Ancak bu reaksiyonunda önemli bir problemi helyum-3 izotopunun kıtlığıdır. Atmosferde helyum konsantrasyonları oldukça düşüktür. Hacim olarak sadece 5 ppm dolaylarında helyum bulunmaktadır. Helyum-3 konsantrasyonları ay kayaçlarında yüksek oranlarda bulunmaktadır. Hacim olarak her bir ay kayacının helyum-3 konsantrasyonu 140 ppm dolaylarındadır (Muray – Holbert, 2015). Bu durum, D-He-3 reaksiyonunun zorluğunu da beraberinde getirmektedir.

Bunun dışında füzyon reaksiyonlarında girdi olarak kullanılan atomların içerdikleri atom miktarları, reaksiyon sırasında elektrostatik itmeyi yani füzyon olayının gerçekleşme hızını etkilemektedir. Bor-11 izotopunun atom sayısı denklem (4.38)'de de görüleceği üzere 5'tir ve diğer füzyon reaksiyonları ile mukayeseye edildiğinde daha yüksek atom içeriğine sahiptir. Bundan dolayı diğer füzyon reaksiyonlarına göre elektrostatik itme gücü yani füzyon olayının gerçekleşme hızı D-D ve D-T reaksiyonlarından 5, D-He-3 reaksiyonundan ise 2,5 kat daha yüksektir (bk. denklem 1.36; 1.37; 1.38; 1.39). Ancak füzyonun pik yapabilmesi için plazmanın yüksek sıcaklık değerlerine (yaklaşık 1.000 Kev) ulaştırılabilmesi gerekmektedir (Grafik 96).



Grafik 96: Füzyon Reaksiyonlarının Gerçekleşebilmesi İçin Gerekli Olan Plazma Sıcaklıkları ve Füzyon Reaktiviteleri

Kaynak: Kembleton, 2020.

4.7. Türkiye'nin Bor Rezervleri

Türkiye, küresel çapta dünya'nın en fazla bor rezervlerine sahip ülkesi konumundadır. Türkiye, 2019 yılı itibariyle toplam 3,2 milyar tonluk bor rezervi ile küresel bor rezervlerinin %73'ünü elinde bulundurmaktadır. Türkiye'ye rezerv miktarı ile en yakın ülkelerden olan Rusya ve ABD, sırasıyla 360 milyon ton ve 270 milyon tonluk bor rezervleri ile küresel bor rezervlerinin sadece %8'ini ve %6'sını oluşturmaktadırlar (Tablo 79).

Tablo 79: Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanının Toplam Bor Madeni Rezervleri

Ülkeler	Bor Rezervleri (Milyon Ton)	Toplam Rezerv İçerisindeki Payı (%)
Türkiye	3.269	73
Rusya	360	8
ABD	270	6
Çin	135	3
Şili	135	3
Peru	135	3
Sırbistan	90	2
Kazakistan	45	1
Bolivya	45	1
Arjantin	45	1
Toplam	4.500	100

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü 2020b'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'nin sahip olduğu toplam bor rezervlerinin bölgesel/yatak bazındaki dağılımlarına bakıldığında en fazla bor rezervi Emet yatağında bulunmaktadır. Emet yatağı, yaklaşık 2 milyar ton'luk bor rezervi ile Türkiye'nin toplam bor rezervinin %55'ini oluşturmaktadır. Bu yatakta cevher olarak ağırlıklı olarak kolemanit bulunmakla birlikte probertit ve üleksit de yer almaktadır. Emet'ten sonra Türkiye'nin ikinci en büyük bor yatağı Kırka'dır. Kırka yatağı, Türkiye'nin tınkal deposudur. Bu yatakta, toplamda 825 milyon ton'luk tınkal rezervi bulunmaktadır ve Türkiye'nin toplam bor rezervinin %25'i bu yatakta yer almaktadır. Bu yatakta yan ürün olarak az da olsa kolemanit ve üleksit cevherleri de mevcuttur. Bu yatak aynı zamanda dünya'nın en büyük tınkal yatağıdır. Bunların dışında Bigadiç yatağında ağırlıklı olmak üzere kolemanit ve üleksit cevherleri yer almaktadır. Bu yatak, Türkiye'nin toplam bor rezervinin %19'unu elinde bulundurmaktadır. Türkiye'de en az bor cevherinin bulunduğu yatak Kestelek yatağıdır. Kestelek yatağında

kolemanit ve az miktarda üleksit bulunmaktadır ve 5 milyon ton'luk toplam rezerv ile Türkiye'nin bor rezervlerinin %1'ini elinde bulundurmaktadır (Tablo 80).

Tablo 80: Türkiye'nin Bölgesel Bazda Toplam Bor Rezervlerinin Dağılımları

Bölgeler	Rezerv Türü	Rezerv Miktarı (Milyon Ton)	Toplam Rezerv İçerisindeki Payı (%)
Emet	Kolemanit-Probertit-Üleksit	1.811	55
Kırka	Tinkal	825	25
Bigadiç	Üleksit-Kolemanit	628	19
Kestelek	Kolemanit	5	1
Toplam		3.269	100

Kaynak: Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020'Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bor madeninin ekonomik değerini belirleyen en önemli faktörün daha önceden de belirtildiği üzere içeriğindeki bor oksit (B₂O₃) miktarıdır. Buna göre Türkiye'de bulunan toplam bor rezervlerinin %30'a yakını ekonomik değere sahiptir ve Türkiye, bu rezerv yapısıyla da yine dünya'da en fazla ekonomik değere sahip bor rezervlerinin bulunduğu ülkesidir. Türkiye, bor oksit (B₂O₃) bazında toplamda 949 milyon tonluk toplam bor rezervi ile küresel bor rezervinin %73'üne hakim durumdadır. Bu rezerv, aynı zamanda Türkiye'nin yaklaşık 400 yıllık mevcut ihtiyacını karşılayabilecek durumdadır. Türkiye'den sonra bor oksit (B₂O₃) bazında da en fazla rezerve sahip ülkelerinden olan Rusya ve ABD, küresel bor rezervin yine sırasıyla %8'ini ve %6'sını oluşturmaktadır ve bu ülkelerin şuanki mevcut tüketimleriyle sadece 69 ve 55 yıl yetecek kadar bor rezervleri bulunmaktadır (Tablo 81).

Tablo 81: Türkiye'nin ve Dünya'nın Geri Kalanının Bor Oksit (B₂O₃) Bazındaki Toplam Bor Madeni Rezervleri

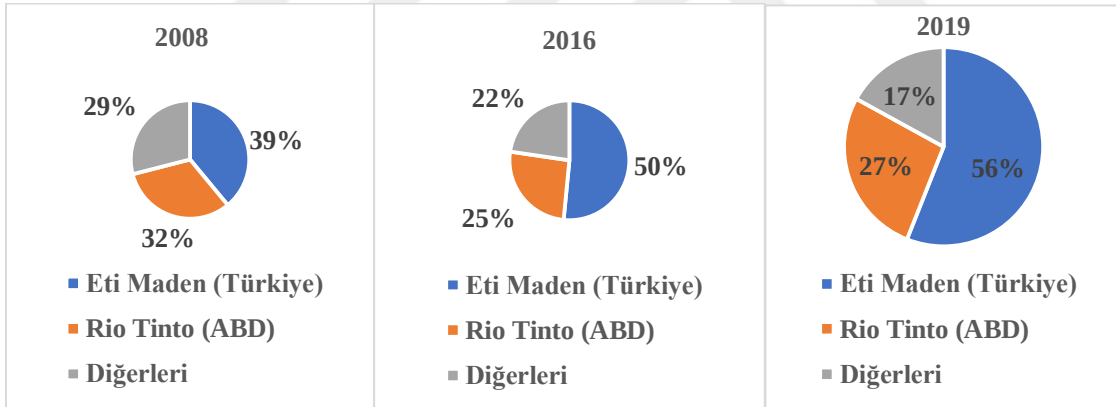
Ülkeler	Bor Oksit (B ₂ O ₃) Bazında Bor Rezervleri (Milyon Ton)	Toplam Rezerv İçerisindeki Payları (%)	Rezerv Ömürleri (Yıl)
Türkiye	949	73	389
Rusya	100	8	69
ABD	80	6	55
Şili	41	3	28
Çin	36	3	25
Peru	22	2	15
Sırbistan	21	2	14
Bolivya	19	2	13

Kazakistan	15	1	10
Arjantin	9	0,7	3
Toplam	1.310	100	621

Kaynak: Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020; Helvacı, 2004'Ten Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

4.8. Türkiye'nin Bor Üretimi ve Kapasitesi

Türkiye, küresel bazdaki en önemli bor üreticisi olan ülkedir. Türkiye'de bor madeninin üretilmesine yönelik olarak Eti Maden İşletmeleri, 2019 yılı itibariyle 3,8 milyon olan küresel bor üretiminin %56'sına hakim durumdadır. Türkiye'den sonra küresel çaptaki en büyük bor üreticisi olan Rio Tinto Şirketi (ABD), yine 2019 yılı itibariyle küresel bor üretiminin %27'sine sahiptir. Bunun dışındaki ülkeler küresel bor üretiminin sadece %17'sini oluşturmaktadır. Türkiye, aynı zamanda yıllar geçtikçe küresel bor üretimi piyasasındaki ağırlığını da arttırmaktadır. Buna göre Türkiye, 2008 yılı itibariyle küresel bor üretiminin %39'unu karşılayabilir durumdayken 2016 bu oran %50'sini ve 2019'da da az öncede belirtildiği üzere %56'sını karşılayabilir duruma gelmiştir (Grafik 97).



Grafik 97: Yıllar İtibariyle Türkiye'nin Küresel Bor Üretimi İçerisindeki Payları

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2009; 2017; 2020a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bunun yanında Türkiye'de bor madeni üretimi Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan Kırka Bor İşletme, Bigadiç Bor İşletme, Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletme ve Emet Bor İşletme Müdürlüklerinin üretim tesislerinde gerçekleştirilmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a).

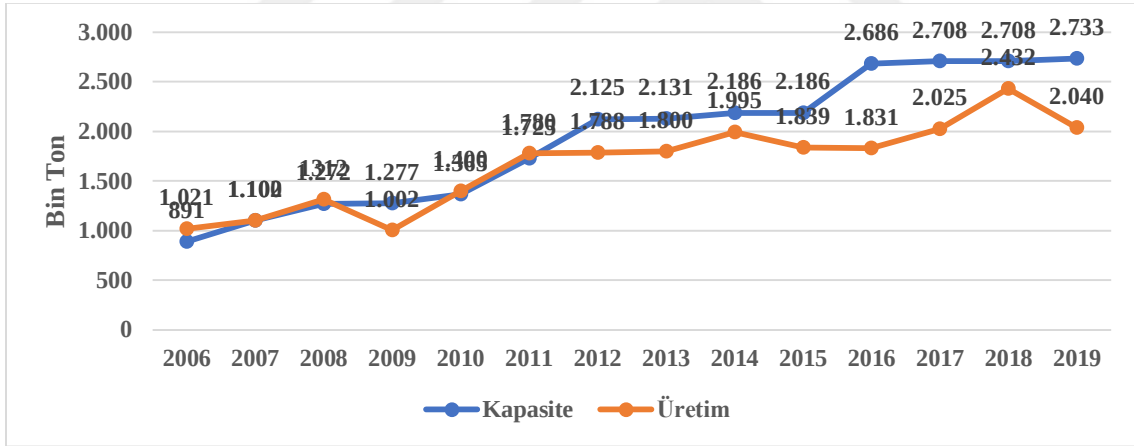
Bu işletme müdürlüklerinden Kırka Bor İşletme Müdürlüğüne bağlı üretim tesisinde ocaktan çıkarılan tinkal cevherleri işlenerek boraks pentahidrat ve boraks dekahidrata dönüştürülmek suretiyle üretimi gerçekleştirilmektedir. Bunların yanında yine bu tesiste, kalsine tinkal ve borlu temizlik ürünlerinin de üretimi yapılmaktadır. Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğüne bağlı üretim tesisinde, sahip olan dört adet açık ocaktan getirilen üleksit ve kolemanit cevherleri çeşitli işlemlere tabii tutularak öğütülmüş, konsantre ve granül kolemanit ve öğütülmüş, konsantre ve granül üleksit üretilmektedir. Bunların dışında doğal zeolit ve eticol-seramik üretimi de gerçekleştirilmektedir. Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları Genel Müdürlüğüne bağlı üretim tesislerinde, rafine bor üretimini gerçekleştirmek üzere ihtiyaç duyulan sülfürik asitin yanında boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks, zirai bor, borik asit, çinko borat, sodyum perborat, camsı-amorf bor oksit, etifert-b11ve etifert-b20 üretimleri gerçekleştirilmektedir. Emet Bor İşletmeleri Müdürlüğüne bağlı üretim tesisinde ise, Hisarcık ve Espey'deki ocaklardan elde edilen dünya'nın en büyük kolemanit cevherleri buradaki konsantratör tesislerinde işlenerek rafine bor ürünlerine dönüştürülmektedir. Bu tesiste ürün olarak borik asit, konsantre kolemanit, eticol-seramik ve etifert-17 üretimi yapılmaktadır. Üretilen bu ürünlerin büyük bir kısmı ise yurt dışına ihraç edilmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020b). Buna göre bu tesislerin 2014 yılı itibariyle yıllık bazda üretim kapasiteleri ve ortalama üretim miktarları Tablo 82'de verilmektedir.

Tablo 82: 2014 Yılı İtibariyle Türkiye'deki Bor Üretim Tesislerinin Üretim Kapasiteleri ve Üretim Miktarları

Tesisler	Bor Ürünleri ve Kimyasalları	Üretim Kapasiteleri (Bin Ton/Yıl)	Üretim Miktarları (Bin Ton/Yıl)
Bandırma	Boraks Dekahidrat	15	14
	Borik Asit	95	86
	Sodyum Perborat	35	32
	Bor Asit	2	1,8
	Zirai Bor	8	7
	Camsı Bor Oksit	6	5
Emet	Borik Asit	290	264
Kırka	Boraks Pentahidrat	840	764
	Kalsine Tinkal	5	4,5
	Boraks Dekahidrat	80	73
Bigadiç	Öğütülmüş Kolemanit	700	637
Toplam		2.181	1.888

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2015'Ten Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

2019 yılı baz alındığında ise, Türkiye'nin rafine bor ürünlerinin üretim kapasiteleri toplamda 2.7 milyon ton, rafine bor üretimleri de toplamda 2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılından geri dönük 13 yıl içerisinde ise Türkiye'nin rafine bor üretim kapasitelerinde toplamda %207, rafine bor ürünleri üretimlerinde de toplamda %100 artış gerçekleşmiştir. Türkiye'deki rafine bor ürünlerinin üretim kapasiteleri ve üretimlerindeki artışın büyük bir bölümü 2006-2012 arası dönemdeki 6 yıllık süre içerisinde gerçekleşmiştir. Bu süreç içerisinde Türkiye'nin rafine bor ürünlerinin üretim kapasiteleri toplamda %138, rafine bor ürünlerinin üretimleri de toplamda %75 oranında artış göstermiştir. 2012-2019 arası dönemdeki 7 yıllık süre içerisinde ise, rafine bor ürünleri üretim kapasitelerinde 2015-2016 arası dönem hariç durağan, rafine bor ürünleri üretimlerinde de dalgalı bir seyir izlenmiştir. Bu dönem içerisinde Türkiye'nin rafine bor ürünleri kapasitesi toplamda %29, rafine bor ürünleri üretimi de toplamda %14 oranında artış göstermiştir (Grafik 98).

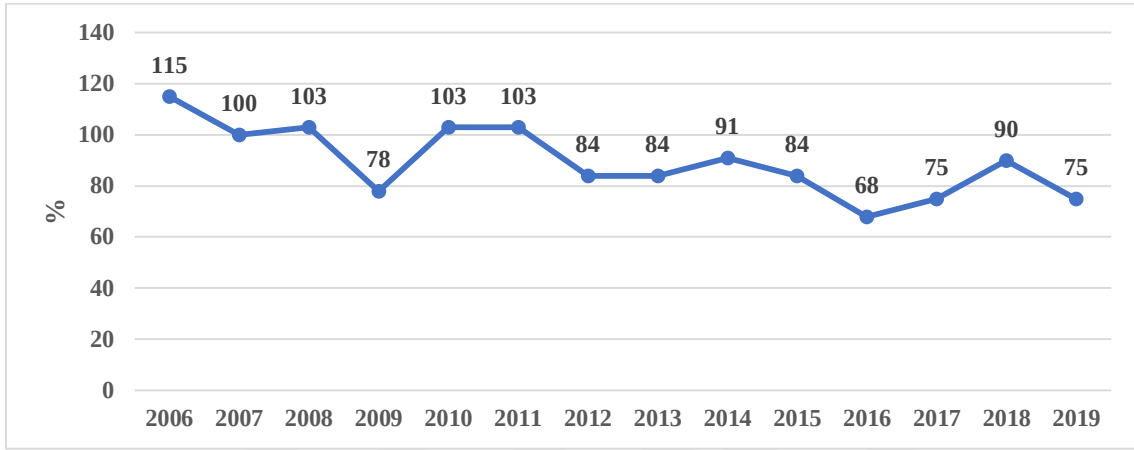


Grafik 98: 2006-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Rafine Bor Ürünleri Üretim Kapasiteleri ve Üretimleri

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a.

Türkiye'nin rafine bor ürünlerine dayalı kapasite kullanım oranlarına bakıldığında ise, yine dalgalı seyirler meydana gelmiştir. Türkiye'de rafine bor ürünlerinin üretimleri 2006-2011 arası dönemde 2009 yılı hariç mevcut üretim kapasitelerinin üzerinde seyirler izlerken, 2012-2019 arası dönemde mevcut üretim kapasitelerinin altında seyirler izlemiştir. Buna göre Türkiye'nin rafine bor ürünlerinin kapasite kullanım oranları 2009 yılı hariç 2006-2011 arası dönemde ortalama %105 oranında gerçekleşmiştir. Bu dönem

içerisinde en yüksek kapasite kullanım oranı %115 ile 2006 senesinde meydana gelmişken en düşük kapasite kullanım oranı ise %78 ile 2009 yılında gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 2012-2019 arası dönemde ise, Türkiye'nin rafine bor ürünleri kapasite kullanım oranı ortalama %81 olmuştur. Bu dönem içerisinde en yüksek kapasite kullanım oranı %90 ile 2019 yılında, en düşük kapasite kullanım oranı da %68 ile 2016 yılında gerçekleşmiştir (Grafik 99).

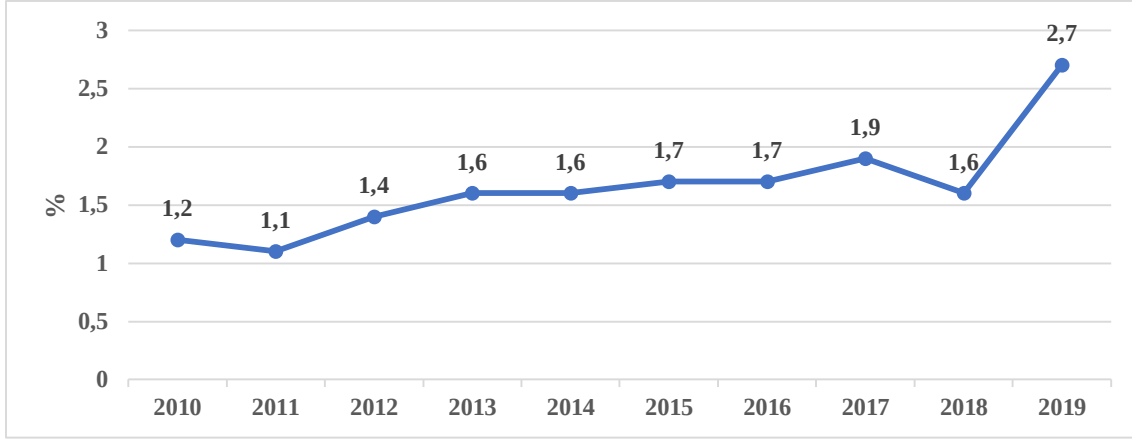


Grafik 99: Yıllar İtibariyle Türkiye'nin Rafine Bor Ürünlerinin Üretimlerindeki Kapasite Kullanım Oranları

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

4.9. Türkiye'nin Bor Tüketimi ve Dış Ticareti

Türkiye, üretmiş olduğu bor'un (ham bor ve bor ürünleri) büyük bir bölümünü ihraç eden bir ülkedir. Bundan dolayı küresel bor tüketimi içerisindeki payı oldukça küçüktür. Grafik 100'de Türkiye'nin yıllar itibariyle tükettiği bor ve bor ürünlerinin küresel bor piyasası içerisindeki görünümü verilmektedir. Buna göre Türkiye, 2019 yılında küresel bor piyasasında tüketilmiş olan toplam bor ve bor ürünlerinin yaklaşık %3'ünü tüketmiştir. 2010-2019 arası dönemde ise Türkiye, yine küresel bor piyasasında tüketilmiş olan toplam bor ve bor ürünlerinin ortalama %1,6'sını tüketmiştir (Grafik 100).



Grafik 100: Türkiye'nin Yıllar İtibariyle Küresel Bor Piyasındaki Bor Tüketim Oranları

Kaynak: Eti Maden, 10 Ekim 2020; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; 2020a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Bor ve bor ürünlerinin bölgesel bazda en yoğun olarak tüketildiği yer Asya'dır. Asya, 2019 yılı itibariyle küresel çapta tüketilen bor ve bor ürünlerini toplamda %51'nin tüketmiştir. Bu bölgede Çin, önemli bor tüketicilerindendir. Asya'dan sonra K. Amerika, küresel bor ve bor ürünlerinin en yoğun olarak tüketildiği bir diğer bölgedir. K. Amerika'da tüketilen toplam bor ve bor ürünleri küresel çapta tüketilen bor ürünlerinin %21'ini oluşturmuştur. Bu bölgede ise ABD en önemli bor tüketicisidir. Bunların dışında küresel bor ve bor ürünleri tüketimlerinin Avrupa %19'unu, G. Amerika %7'sini, Orta Doğu ve Afrika ise %1'ini oluşturmuştur (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a).

Türkiye'nin mevcut bor ve bor ürünlerinin iç piyasadaki tüketimlerine ve dış piyasadaki ihracatlarına (toplam arz) bakıldığında 2019 yılı itibariye piyasalara arz edilen toplam 2,1 milyon bor ve bor ürünlerinin 101 milyon tonu iç piyasalar tarafından tüketilmişken 2 milyon tonu da dış piyasalara ihraç edilmiştir. Bunların karşılığında ise yurt içi piyasalardan toplamda 40 milyon \$, dış piyasalardan ise toplamda 780 milyon \$'lık döviz gelir elde edilmiştir. 2010-2019 arası dönemde ise Türkiye'deki iç piyasalar tarafından tüketilen bor ve bor ürünleri toplamda %110, dış piyasaya ihraç edilen bor ve bor ürünleri de toplamda %28 oranında artış göstermiştir. Buna karşılık elde gelirlerde ise iç piyasalardaki gelirlerde toplamda %122, dış piyasalardan sağlanan ihraç kaynaklı gelirlerde ise %24 oranında artış gerçekleşmiştir. Türkiye, 2010-2019 arası dönemde bor ve bor ürünlerine dayalı en fazla getiriye 2018 yılında elde etmiştir. 2018 yılında elde

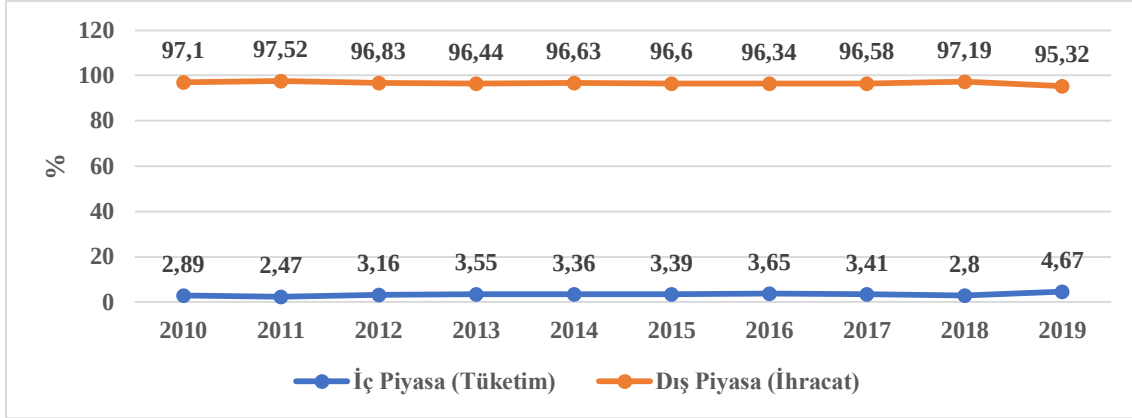
edilen toplam 1 milyar \$'lık gelirin 990 milyon \$'ı yurt dışından, 23 milyon \$'ı da yurt içinden sağlanmıştır. 2018 yılında yurt dışı piyasalardan elde edilmiş olan toplam 990 milyon \$'lık toplam bor geliri aynı zamanda 2010-2019 arası dönemde yurt dışı piyasalardan elde edilmiş olan en yüksek bor geliri olmuştur. İç Piyasalardan elde edilen bor gelirlerinde ise en yüksek getiri 2019 yılında gerçekleşmiştir (Tablo 83).

Tablo 83: 2010-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Ham Bor ve Rafine Bor Ürünlerinin Tüketim ve İhracat Göstergeleri

Yıllar	İç Piyasa (Tüketim)		Dış Piyasa (İhracat)		Toplam	
	Satış (Ton)	Satış (\$)	Satış (Ton)	Satış (\$)	Satış (Ton)	Satış (\$)
2010	48.000	18.000.000	1.612.000	629.000.000	1.660.000	647.000.000
2011	51.000	22.000.000	2.008.000	831.000.000	2.059.000	853.000.000
2012	58.000	25.000.000	1.772.000	797.000.000	1.830.000	822.000.000
2013	68.000	25.000.000	1.847.000	801.000.000	1.915.000	826.000.000
2014	72.000	28.000.000	2.068.000	871.000.000	2.140.000	899.000.000
2015	66.000	23.000.000	1.877.000	787.000.000	1.943.000	810.000.000
2016	65.000	22.000.000	1.711.000	689.000.000	1.776.000	711.000.000
2017	75.000	25.000.000	2.123.000	854.000.000	2.198.000	879.000.000
2018	71.000	23.000.000	2.461.000	990.000.000	2.532.000	1.013.000.000
2019	101.000	40.000.000	2.060.000	780.000.000	2.161.000	820.000.000

Kaynak: Eti Maden, 10 Ekim 2020; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; 2020a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Elde edilen bu gelirlerde yurt dışı piyasalara sunulan bor ve bor ürünlerinin etkisi büyük olmuştur. Türkiye'de bor ve bor ürünlerinin arzı daha önceden de belirtildiği üzere ihracat odaklı olmuştur. Bu sebepten dolayı da iç piyasalardaki tüketimleri oldukça sınırlı kalmıştır. Buna göre 2019 yılı itibariyle piyasalara arz edilen toplam bor ve bor ürünlerinin %95'i dış piyasalar tarafından ihraç edilmişken yalnızca %5'i iç piyasalar tarafından tüketilmiştir. 2010-2019 arası dönemde ise Türkiye'de arz edilen toplam bor ve bor ürünlerini ortalama %97'si yurt dışı piyasalara ihraç edilmişken ortalama sadece %3'ü iç piyasalar tarafından tüketilmiştir (Grafik 101).

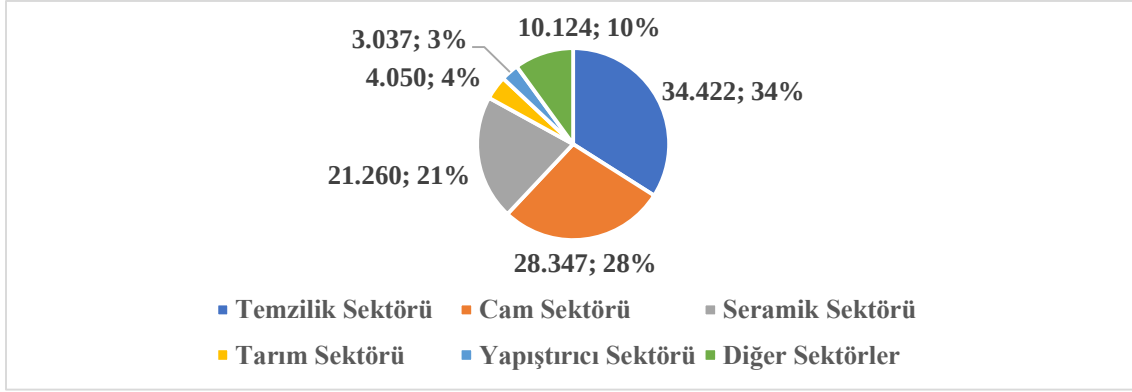


Grafik 101: 2010-2019 Arası Dönemde Türkiye'nin Ham Bor ve Rafine Bor Ürünlerinin Tüketim ve İhracat Oranları

Kaynak: Eti Maden, 10 Ekim 2020; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; 2020a'Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Türkiye'de iç piyasalar tarafından tüketilen bor ürünleri ise ağırlıklı olarak temizlik ve cam sektörleri tarafından tüketilmektedir. Buna göre 2019 yılı itibariyle iç piyasaya sürülen arz edilen toplam bor ürünlerinin %62'si (%34'ü temizlik ve %28'i cam sektörü) bu sektörler tarafından tüketilmiştir (Grafik 102). Bu bor ürünlerinden temizlik sektöründe ağartıcı olarak sodyum perborat tetrahidrat ve monohidrat, kişisel bakım ve sabun üretiminde de boraks dekahidrat ve boraks pentahidrat yoğun olarak kullanılmaktadır (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a).

Cam sektöründe, sertlik ve dayanıklılığı arttırmak üzere bor oksit, borosilikat cam, cam elyafları (tekstil tipi ve izolasyon tipi), LCD ekranlar, araba farları, sinyal camları vb. yerlerde yüksek oranda tercih edilmektedir. Bunların haricinde kolemanit ve bor oksit, seramik sektöründe görünüm iyileştirici, ısı izolasyonunu ayarlayıcı, güç ve direnç sağlayıcı olarak %21 oranında kullanılmaktadır (Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 12 Ekim 2020). Bunların haricinde bor ürünleri diğer sektörlerden tarım sektöründe %4, yapıstırcı sektöründe %3 ve diğer sektörlerde (metalurji, çimento vb.) de %10 oranında kullanılmaktadır (Grafik 102).

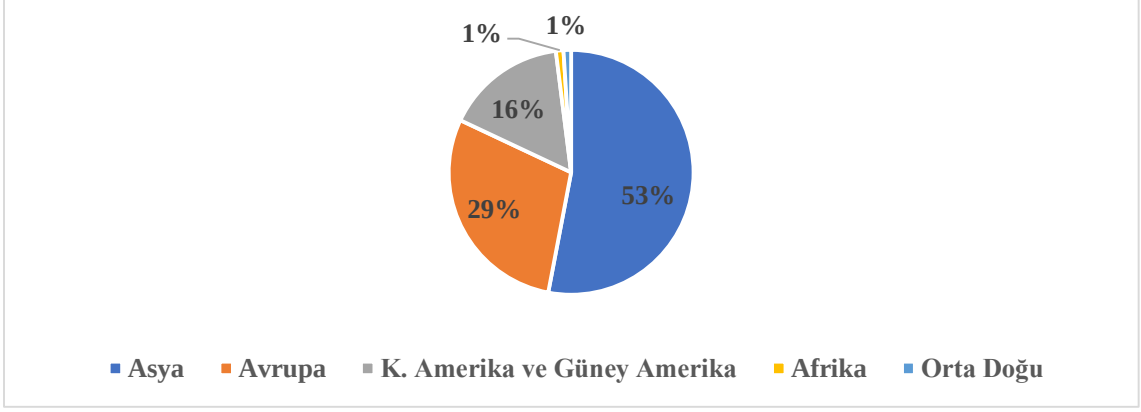


Grafik 102: 2019 Yılı İtibariyle Türkiye’de Tüketilen Bor Ürünlerinin Sektörel Dağılımları

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a’Dan Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Dış piyasalara yönelik bor ve bor ürünlerini ihracatında ise, Türkiye’nin dış piyasalara yapmış olduğu bor ve bor ürünleri ihracatında en yüksek payı Asya almıştır. Asya, Türkiye tarafından 2019 yılında küresel piyasalara ihraç edilmiş olan bor ürünlerinin %53’ünü (1 milyon ton) oluşturmuştur. Türkiye’nin Asya’dan sonraki en büyük pazar payı Avrupa bölgesidir. Yine 2019 yılında Türkiye’nin yurt dışına ihraç etmiş olduğu toplam bor ve bor ürünlerinin %29’u (597 bin ton) bu bölgeye ihraç edilmiştir. Avrupa’dan sonraki üçüncü en büyük ihracat bölgesi Kuzey ve Güney Amerika olmuştur. Yine ihraç edilen toplam bor ve bor ürünlerinin %16’sı (330 bin ton) bu bölgeler tarafından sağlanmıştır (Grafik 103).

Bu bölgelerden Kuzey Amerika, bu ihracatın büyük bir bölümünü oluşturmuştur. 2019 yılında Kuzey Amerika’da ABD, küresel piyasalardan rafine boraks, borik asit, üleksit ve kolemanit olmak üzere toplamda ithal etmiş olduğu 275 bin ton bor ve bor ürünlerinin %80’inini (220 bin ton) Türkiye’den ithal etmiştir (USGS, 2020). Bu da 2019 yılında Türkiye tarafından Kuzey ve Güney Amerika’ya ihraç edilmiş olan toplam 330 bin ton’luk bor ve bor ürünlerinin %67’sini oluşturmuştur. Bunların dışında diğer bölgelerden olan Afrika ve Orta Doğu’ya 21 bin’er ton bor ve bor ürünleri ihracatı gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelere ihraç edilen bor ve bor ürünleri, küresel piyasalara ihraç edilmiş olan bor ve bor ürünlerinin %1’ini oluşturmuştur (Grafik 103).



Grafik 103: 2019 Yılı İtibariyle Türkiye'nin İhraç Etmiş Olduğu Ham Bor Ve Bor Ürünlerini Bölgesel Dağılımları

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2020a.

BÖLÜM 5: TÜRKİYE’DE BORUN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Literatür İncelemesi

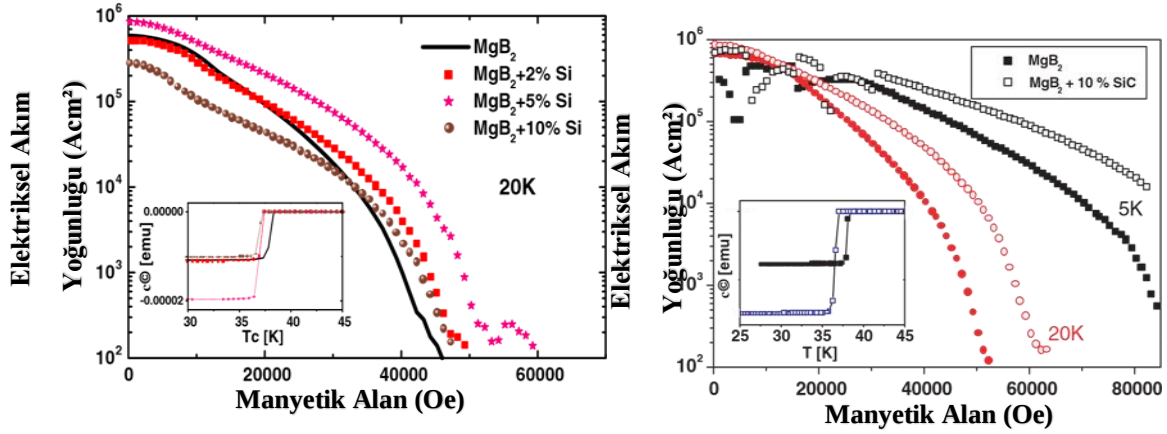
Literatürde, Türkiye’nin mevcut enerji görünümü doğrultusunda borun alternatif enerji kaynağı olarak; süperiletkenliği, yakıt bazlı doğrudan ve katkı maddesi olarak kullanımı ve nükleer füzyon üretimine ilişkin dünyada ve Türkiye’de yapılmış olan bir dizi çalışmalar ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar, tezin analiz kısmına referans oluşturmuştur.

5.1.1. Dünya Geneline Yapılan Belli Başlı Çalışmalar

5.1.1.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborite (MgB₂) Yönelik Yapılan Çalışmalar

Magnezyum diboritin (MgB₂) olduğu haliyle kullanılması yani herhangi bir elementle bileşik oluşturmadan saf halide kullanılması yalnızca orta büyüklüğe sahip manyetik alanlarda süperiletkenlik konusunda iyi bir performans gösterebilmektedir. Oysaki magnezyum diboritin süperiletken bir malzeme olarak keşfinden sonra çeşitli elementlerle bileşik oluşturularak süperiletkenlik özelliğinin daha da arttırılabileceği tespit edilmiştir.

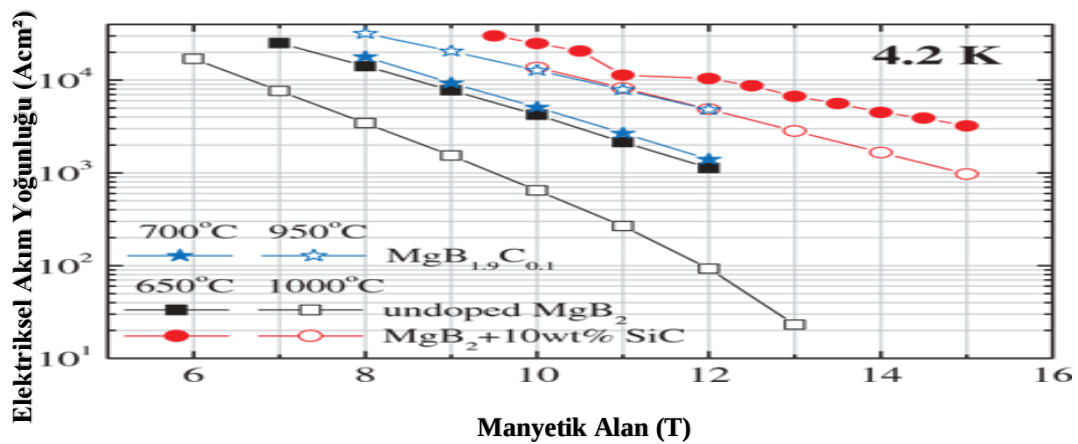
Bu çalışmalardan biri olan Wang vd. (2004), nano-silisyum karbür (SiC), silisyum (Si) ve karbon (C) katkılı magnezyum diboritin (MgB₂) kritik akım yoğunluklarını incelemiştir. Bunun için ağırlıkça %2, %5 ve %10 silisyum (Si), ağırlıkça %10 silisyum karbür (SiC) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numunelerini oluşturmuştur. Yapılan analizler sonucunda 0 T alanda %2 silisyum (Si) ve %10 nano-silisyum karbon (SiC) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numunelerinin hem katkısız-saf haldeki magnezyum diborit (MgB₂) numunesine hemde diğer katkılı magnezyum diborit numunelerine kıyasla daha yüksek elektriksel akım yoğunluklarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Grafik 104).



Grafik 104: Katkılı Magnezyum Borhidrit (MgB_2) Numunelerinin 5 K ve 20 K'de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları

Kaynak: Wang vd., 2004.

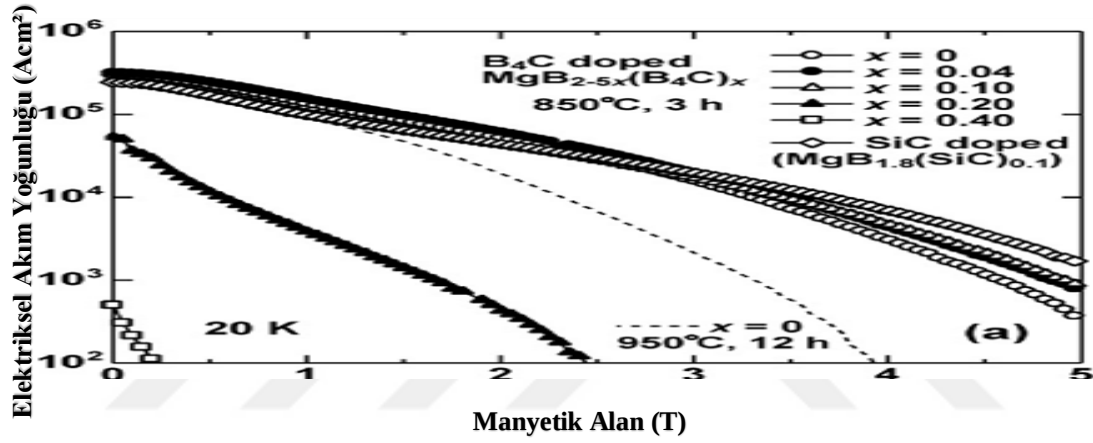
Silisyum karbür (SiC) katkılı bir diğer çalışma da Dou vd. (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dou vd. (2007), nano yapılı silisyum karbür (SiC) katkılı magnezyum diborit numunelerinin 4,2 K'de ($-268^\circ C$) elektromanyetik özelliklerini incelemiştir. Bunun için farklı pişirme sıcaklıkları altında saf magnezyum borhidrit (MgB_2), ağırlıkça %10 silisyum karbür katkılı magnezyum borhidrit ($MgB_2 + \%10 \text{ SiC}$) ve 0,1 g karbon (C) ve 1,9 g bor (B) katkılı magnezyum borhidrit ($MgB_{1,9}C_{0,1}$) numuneleri oluşturulmuştur. Bu numuneler içerisinde ağırlıkça %10 silisyum karbür katkılı magnezyum borhidrit ($MgB_2 + \%10 \text{ SiC}$) numesinin 4,2 K kritik değerde diğerlerine göre daha yüksek elektriksel akım yoğunluğuna sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Grafik 105).



Grafik 105: Saf, Silisyum Karbür (SiC) ve Karbon (C) Katkılı Magnezyum Borhidrit Numunelerinin 4,2 K'de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları

Kaynak: Dou vd., 2007.

Yamamoto vd. (2005), bor karbür (B₄C) ve silisyum karbür (SiC) katkısının magnezyum diborit (MgB₂) süperiletkeni üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada 0,04 g, 0,10 g, 0,20 g, 0,30 g ve 0,40 g'lık bor karbür (B₄C) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numuneleri 850°C'de 3 saat, silisyum karbür (SiC) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numunelerinin ise 950°C'de 12 saat pişirilerek oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda 20 K değerinde 850°C'de pişirilmiş olan numunelerden 0,04g silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B₄C) katkılı numunelerin diğer magnezyum diborit (MgB₂) numunelerine göre daha güçlü elektriksel akım yoğunlukları göstermiştir (Grafik 106).

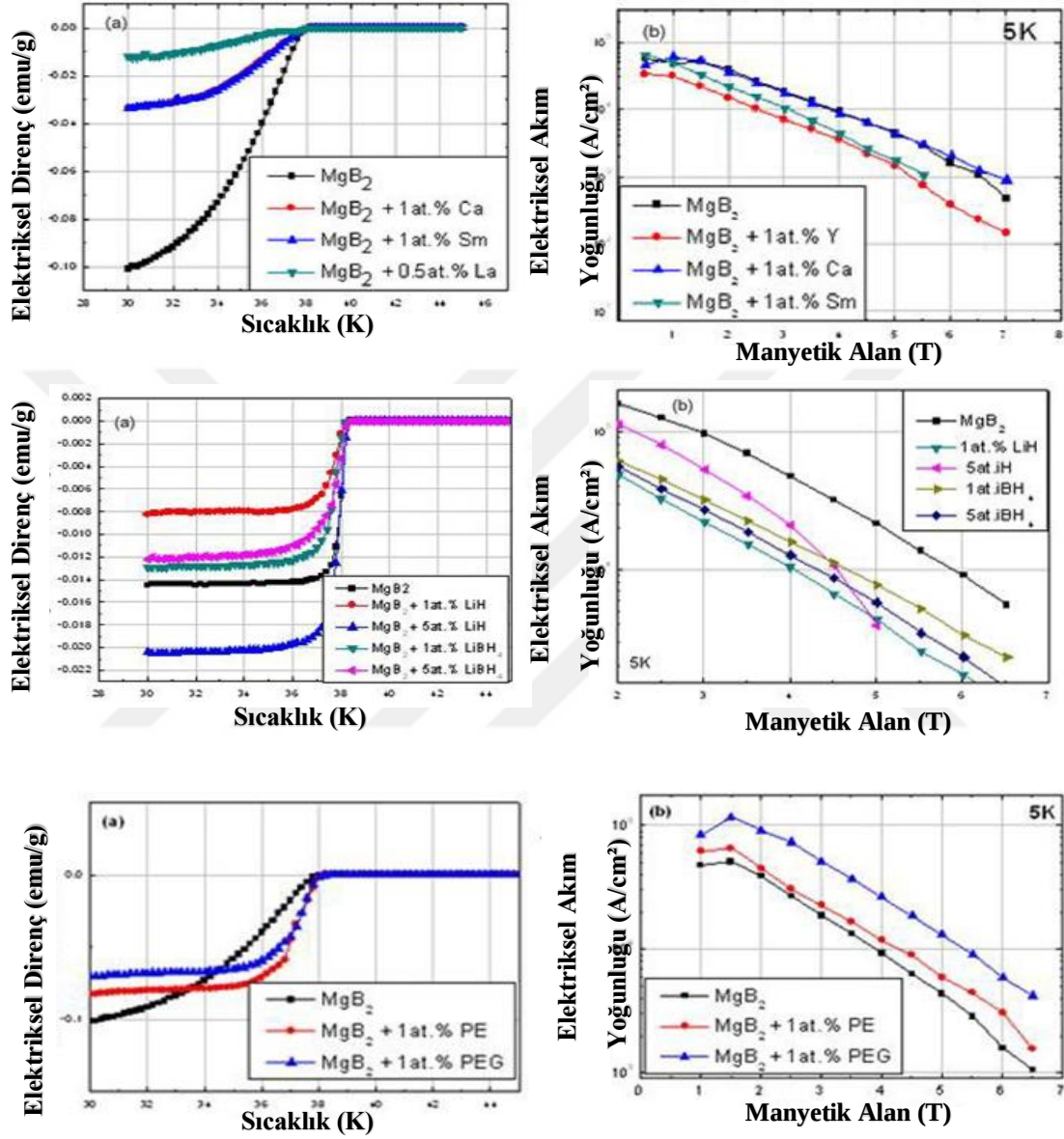


Grafik 106: Bor Karbür Katkılı (B₄C) Magnezyum Diboritin (MgB₂) 20 K'de Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları

Kaynak: Yamamoto vd., 2005.

Bunların haricinde Jang – Ahn (2013) itriyum (Y), samaryum (Sm), kalsiyum (Ca), lityum hidrür (LiH), lityum borhidrid (LiBH₄), polietilen (C₂H₄) ve polietilen glikol (C₂N₄n+2O_n+1) gibi birtakım elementlerle magnezyum diborit numuneleri oluşturularak bu numunelerin süperiletkenlik özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışmada magnezyum diborit hem saf olarak ele alınmış hem de içerisinde ağırlıkça %1 oranlarında itriyum, samaryum, kalsiyum, polietilen, polietilen glikol ve %1 ila %5 arası oranlarda lityum hidrür ve lityum borhidrit ilaveleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda 39 K kritik sıcaklık değerlerinde 0 T alanda tüm magnezyum diborit katkılı numuneler süperiletkenlik özelliği (elektriksel direncin sıfır olma durumu) gösterirken, elektriksel akım yoğunluklarının ise, 5 K kritik değerinde %1 kalsiyum katkılı magnezyum diborit numunesi saf magnezyum diborit numunesi ile aynı elektriksel akım yoğunluğuna

sahipken magnezyum diborit polietilen ve magnezyum diborit polietilen glkol numunelerinin saf magnezyum diborite kıyasla elektriksel akım yoğunluklarının arttığı görülmüştür (Grafik 107).

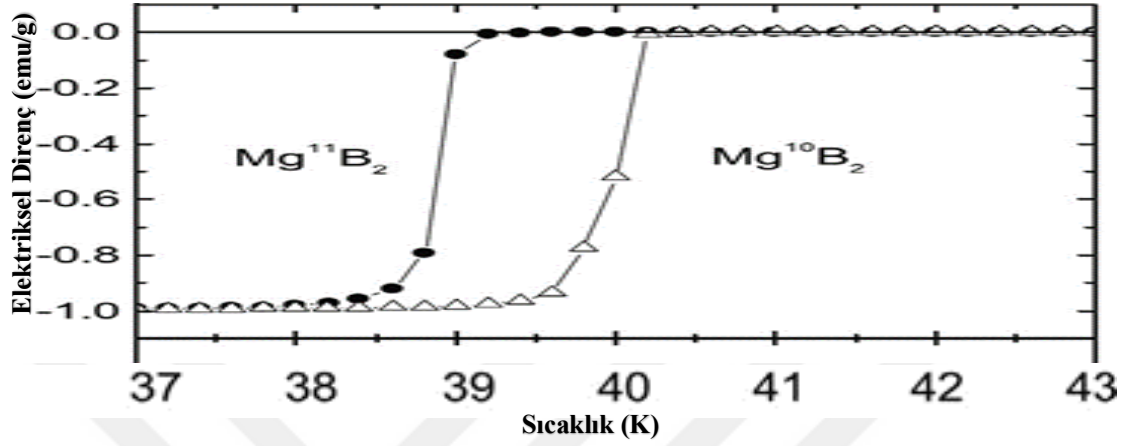


Grafik 107: Farklı Yoğunlardaki Manezyum Diborit (MgB₂) Numuneleerinin 0 T Alandaki Elektromanyetik Özellikleri

Kaynak: Jang – Ahn, 2013.

Bud'ko – Canfield (2015) ise, magnezyum diboridin süperiletkenlik özelliklerini incelemek amacıyla magnezyum diboridin içerisinde bulunan bor-11 izotoplarını bor-10 izotopları ile yer değiştirmiştir. Çalışma sonucunda bor-11 izotoplarına sahip magnezyum

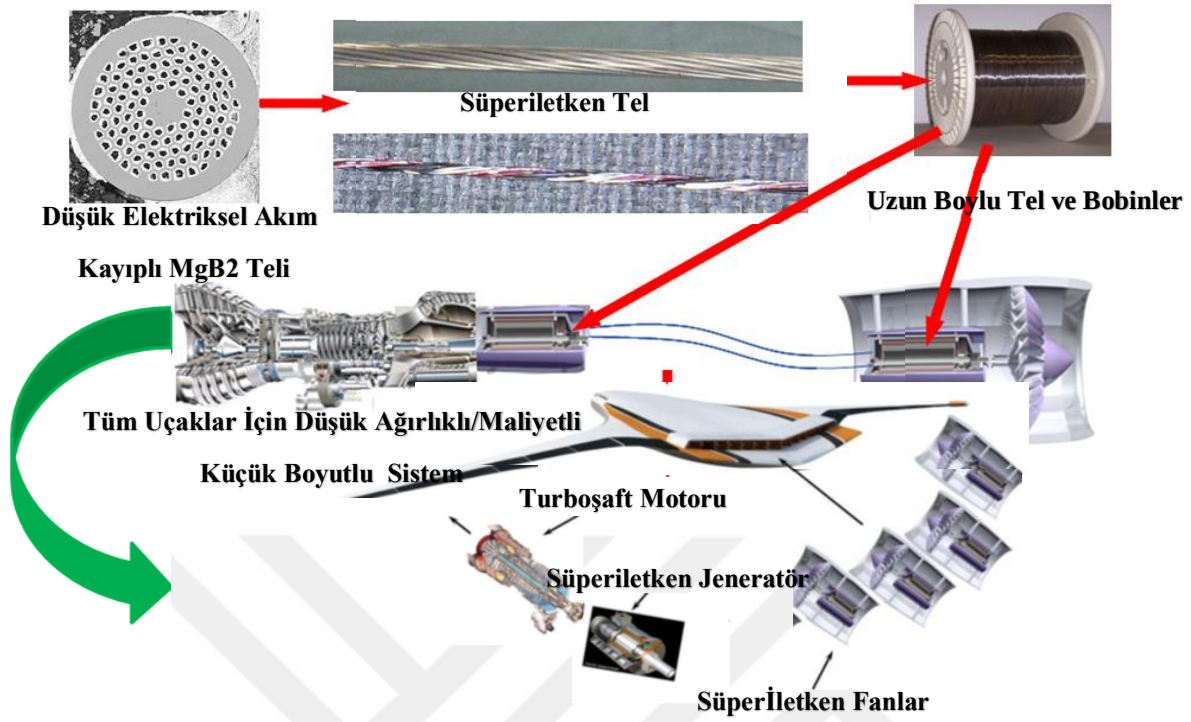
diboridlerin 0 T alanda 39 K sıcaklığında elektriksel akım dirençleri kaybolurken yer değiştirme sonucunda bor-10 izotoplu magnezyum diborit numunesinin 40 K sıcaklığında elektriksel akım dirençleri kaybolarak süperiletkenlik özelliği göstermiştir (Grafik 108).



Grafik 108: Bor-10 ve Bor-11 Katkılı Magnezyum Borhidrit (MgB₂) Numunelerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Dirençleri

Kaynak: Bud'ko – Canfield, 2015.

Magnezyum borhidritin (MgB₂) süperiletkenliği konusunda teorik anlamda dünya genelinde yapılan çalışmaların bir bölümü bu şekilde olmakla birlikte ticari anlamda ABD'li Hyper Technology firması tarafından 2017 yılında uçakların tahrik sistemlerindeki elektriksel kaybın önlenmesi amacıyla süperiletken özellik gösteren malik asit (C₄H₆O₅) katkıli magnezyum diborit (MgB₂) teller üretilmiştir. 60 m uzunluğunda üretilmiş olan bu teller uçakların tahrik sistemlerine 10 KW/g elektromanyetik güç sağlamıştır. Bunu yanında kullanılan bu süperiletken teller sayesinde uçaklardaki elektriksel güç kayıpları 1 W/cm³ düzeylerine kadar indirilebilmiştir (Tech Port, 9 Aralık 2020).



Şekil 28: Hyper Technology Firması Tarafından Uçaklarda Kullanılmak Üzere Geliştirilen Magnezyum Borhidritli (MgB2) Süperiletken Telleri

Kaynak: Tech Port, 9 Aralık 2020.

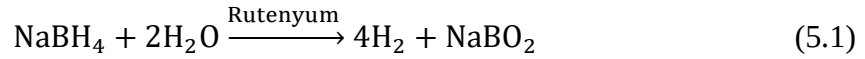
5.1.1.2. Yakıt ve Enerji Katkı Maddesi Olarak Bor Kullanımına Yönelik Yapılan Çalışmalar

New Jersey Genesis Projesi

New Jersey Genesis projesi, ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından mevcut enerji kaynaklarına alternatif oluşturabilmesi açısından geliştirilmiş ve yakıt olarak bir bor ürünü olan sodyum borhidritin (NaBH_4) hidrojene dönüştürülmesi ve bunun araç teknolojilerinde kullanımını içeren bir projedir. Bu proje, ilk olarak 1970'li yıllarda ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) başlattığı çalışmalar neticesinde 1998 yılında oluşturulan New Jersey Genesis Project kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projede, alternatif enerji kaynağı olarak karbon emisyonuna neden olmayan, temiz ve çevre dostu enerji üretimi esas alınmıştır. Bu amaçla ABD'de New Jersey'de kurulan Millennium Cell firması tarafından 2001 yılında Hydrogen on Demand (talep halinde hidrojen) sistemi kurularak hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan sistemle, bir bor ürünü olan sodyum borhidritten (NaBH_4) hidrojen üretimi gerçekleşmiş oluşturulan hidrojen de yakıt pili

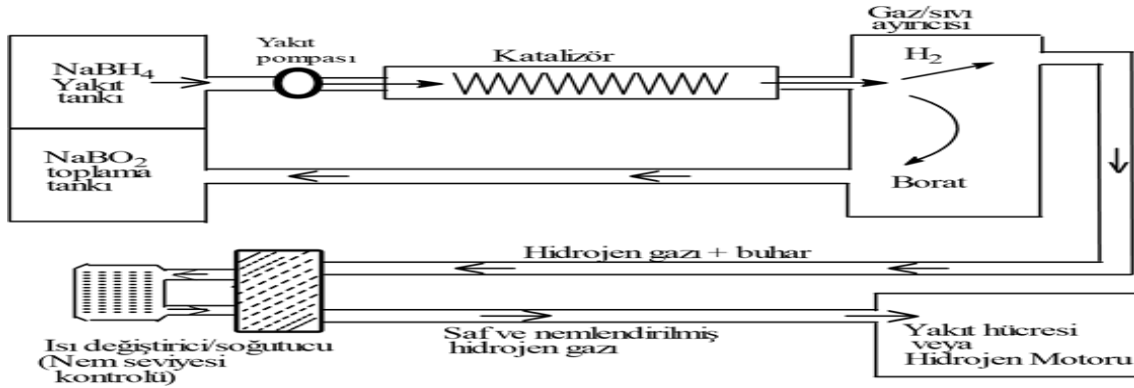
aracılıyla elektrik enerjisine çevrilerek aracın hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede, yani sodyum borhidritin (NaBH₄) yakıt pili teknolojilerinde kullanımı hidrojenin depolanması ve taşınması problemlerini de ortadan kaldırmıştır (Acaroğlu, 2003).

Hydrogen on Demand sisteminin kimyasal reaksiyonu (5.1) de verilmektedir.



Reaksiyonda %20 (1000 g) sodyum borhidrit (NaBH₄), %1 sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi, %79 (950 g) saf su (H₂O) ve rutenyum (Ru) katalizör kullanılmış, reaksiyon neticesinde 213, 5 g H₂ üretimi gerçekleştirilmiştir (Eraslan – Karakoç, 2002a; Sazry – Maher, 2001).

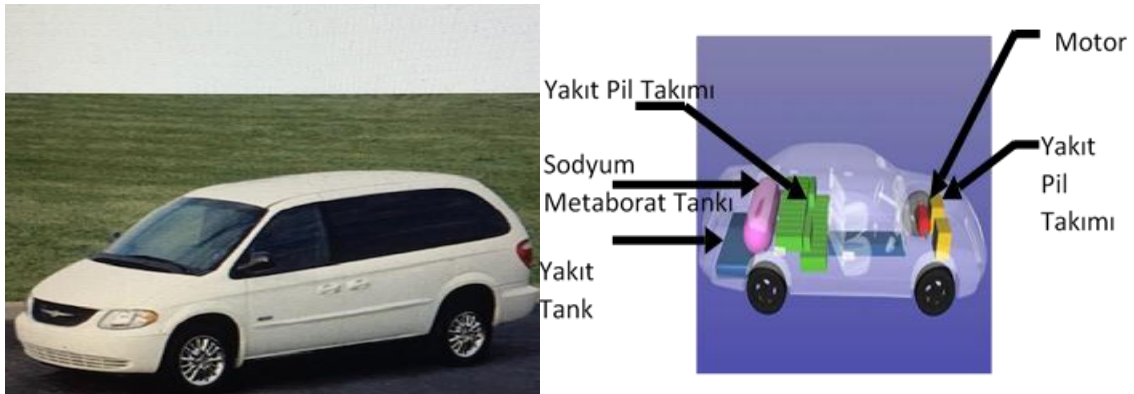
Sistemin çalışma prensibi ise; yakıt tankında bulunan çözelti halindeki sodyum borhidrit (NaBH₄), öncelikli olarak bir yakıt pompası aracılığıyla emilmek suretiyle katalizör işleminin gerçekleşeceği odaya gönderilmektedir. Reaksiyon odasına gelen sodyum borhidrit (NaBH₄) çözeltisi burada bulunan rutenyum (Ru) katalizörü aracılığıyla hidroliz işlemine tabii tutulmaktadır. İşlem neticesinde hidrojen gazı (H₂) ve yan ürün olarak sodyum metaborat (NaBO₂), su (H₂O) ve bir miktar ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ürünlerden sodyum metaborat (NaBO₂), bir ayırma tankında hidrojen gazından ayrıştırılarak yeniden hidrojene (H₂) dönüştürülmek üzere sodyum metaborat (NaBO₂) tankına geri gönderilmektedir. Gaz halindeki hidrojenin (H₂) ise, ısı sonucunda buharlaşan su ile birlikte saflaştırılması ve nem içeriğinin ayarlanmasından sonra yakıt piline ya da içten yanmalı motora gönderilmektedir. Yakıt piline gönderilen yakıt, elektrik enerjisine dönüştürülerek aracın hareket etmesini sağlayan gücü oluşturmaktadır (Sazry – Maher, 2001).



Şekil 29: Hydrogen on Demand Sisteminin Çalışma Prensibi

Kaynak: Millennium Cell, 2003.

Bu sistem, Millennium Cell firmasının Daimler Chrysler ile ortaklaşa geliştirdikleri Town & Country Natrium aracında kullanılmıştır. Sistemde kullanılan yakıt pili Daimler Chrysler firmasının ortaklarından biri olan Ballard/XCELLSİS tarafından üretilmiştir. Araç, 2001 yılında Detroit otomobil fuarında sergilenmiştir. Firma yetkilileri tarafından yapılan açıklamalarda; geliştirilen bu aracın diğer içten yanmalı ve yakıt pili kullanan araç sistemlerine kıyasla performans açısından üstün özellikte olduğunu, bunu sağlayan temel etkenin araçta yakıt olarak kullanılan bir bor türevi olan sodyum borhidrit (NaBH_4) olduğu, yakıt olarak kullanılan sodyum borhidritin (NaBH_4) aynı zamanda kuru olarak da kullanılabileceğini, bu yakıtın diğer yakıtlara göre herhangi bir olumsuz tarafının bulunmadığını hatta üstün olduğunu, yakıtın üretilmesinin zahmetsiz olduğu ve yanma sonrasında atık olarak açığa çıkan sodyum metaboratın (NaBO_2) tekrardan geri dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir (Çınk, 2002). Aracın görünümü ve içerisindeki yakıt pili düzeneği Şekil 30'da verilmektedir.



Şekil 30: Natrium Aracı ve Yakıt Pili Düzeneği

Kaynak: Sazry – Maher, 2001.

Hydrogen on Demand sistemi ile üretilen aracın başlangıçta yakıt pillerinin aksamaları (çubuklar ve uçlar) paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir. Bununla birlikte araçta toplamda 4,2 KW enerji üretebilen 1 adet yakıt pili, 12 adet depolama tankı bulunmakta ve aracın maksimum menzili (1 depo yakıtla alabileceği yol mesafesi) 300 mil (482 km) idi (Sazry – Maher, 2001). Daha sonrasında Hydrogen on Demand sisteminin geliştirilmesiyle aracın yakıt pili aksamalarında çelik yerine titanyum malzemelerin ve 12 yerine tek depolama tankının kullanılmasıyla yakıt pillerinin hem ağırlıkları hem de boyutları azaltılarak kullanılabilirliği arttırılmıştır. Bununla birlikte aracın menzili 300 mil'den 450 mil'e (724 km) kadar yükseltilmiştir. Hydrogen on Demand sistemiyle üretilen aracın geliştirilmiş özellikleri daha ayrıntılı bir şekilde Tablo 84'te verilmektedir.

Tablo 84: Hydrogen on Demand Sistemi İle Üretilen Aracın Geliştirilmiş Özellikleri

Parametreler	Değerler
Gövde ve Çerçeve	Alüminyum Mercury Sable
Motor ve Şanzıman	Solectria 78 kw 105 hp Motor ve Solectria Şanzıman
Yakıt Pili Malzemesi	Titanyum Çubuklar ve Uç Plakalar
Yakıt Pili	Herbiri 5.85 KW Olmak Üzere Toplam 2 Adet (11 KW) H-Power yakıt Pili, 120 V-130 V ve 90 AMPS.
Yakıt Pili Net Gücü (KW)	9,6
Voltaj Dönüştürücü	Herbiri 7.5 KW Gücünde 2 Adet Advanced Power Associates Dönüştürücü
Hidrojen Kaynağı	Sodyum Borhidrit
Hidrojen Üretimi (g)	213,5
Yakıt Tüketimi (l/dk.)	138,8
Yakıt Pilinin Toplam Çalışma Süresi (Saat)	7,5
Hidrojen Depolama -%20 NaBH₄ Çözeltisinden (l)	121,1
Vantilatör (Adet)	1

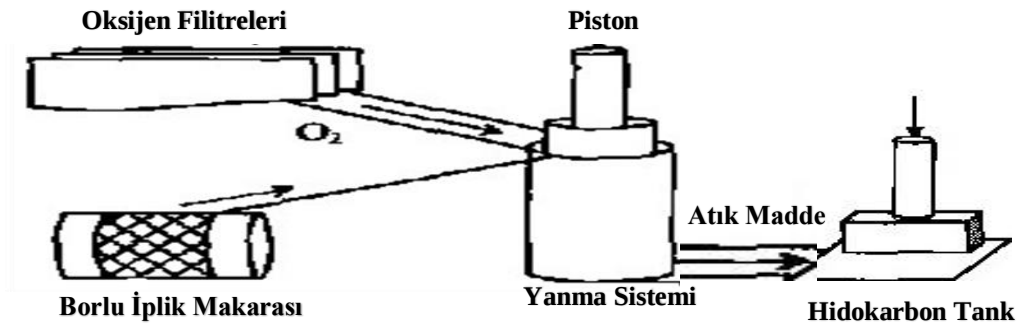
Menzil (Mesafe) (mil)	450

Kaynak: Sazry – Maher, 2001.

Millennium Cell firması, sodyum borhidritin ve buna bağlı teknolojilerinin kullanılmasını yaygınlaştırmak amacıyla Daimler Chrysler ve Ballard/XCELLSİS firmaları dışında başta Rohm & Hass, Avantium ve ABD'nin en önemli borat üreticisi olan U.S. Borax olmak üzere Nissan, Toyota, Honda, General Motors, Wolkswagen, Mitsubishi Motors, Ford, Peugeot ve Citroen gibi ulusal ve uluslararası pek çok kuruluşla stratejik ortaklıklara gitmiştir (Acaroğlu, 2003).

Borun Doğrudan Motorlarda Kullanımı

Bor, bir enerji yakıtı olarak hidrojene dönüşümü suretiyle kullanılabildiği gibi direkt olarak motor sistemleri içerisinde de kullanılabilmektedir. Borun direkt olarak motor sistemleri içerisinde kullanımına yönelik Cowan (10 Aralık 2020), tarafından yapılan çalışmalarda motorlarda borun doğrudan kullanımının mevcut içten yanmalı benzinli motorlara ve alternatif hidrojen yakıtlı motorlara kıyasla karbon emisyonu, yakıt tüketimi, enerjinin taşınması ve saklanması açısından üstün olduğu tespit edilmiştir. Borun yakıt olarak doğrudan kullanıldığı yakıt sistemi Şekil 31'de verilmektedir.



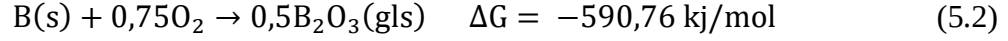
Şekil 31: Borun Doğrudan Kullanıldığı Yakıt Sistemi

Kaynak: Eraslan – Karakoç, 2002b.

Sistemde bor, saf bir biçimde ve ipliklere (filament) sarılı halde makaralar üzerinde bulunmaktadır. Burada saf halde bulunan bor, oksijen filitrelerinden geçmiş saf oksijenle birleşerek yanma sistemi içerisine alınmaktadır. Daha sonrasında saf bor ve oksijen

burada bulunan piston yardımıyla 100 bar basınç altında sıkıştırılmakta ve her sıkıştırma esnasında meydana gelen patlamalarla enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan enerji ise, hareket işlemini başlatmaktadır (Cowan, 10 Aralık 2020).

Sistemin temel kimyasal reaksiyonu (5.2) de verilmektedir.



Reaksiyonda 1 mol saf bor 0,75 mol saf oksijenle 25°C ve 100 atm basınç altında reaksiyona girmekte, reaksiyon esnasında alev sıcaklıkları 4.370°C'ye kadar çıkabilmektedir. Reaksiyon sonucunda ise, açığa çıkan enerjinin yanında yan ürün (atık) olarak bor oksit (B₂O₃) açığa çıkmaktadır (Cowan, 10 Aralık 2020).

Sistemde saf bor, güneş enerji santrallerinde bor oksitin (B₂O₃) parçalanması ya da bor üretim santrallerinde saflaştırma yoluyla elde edilebilmektedir. Saf oksijen ise, aracın ön bölümüne yerleştirecek olan filitrelerin aracın hareketi esnasında havada bulunan oksijeni filtre etmesi suretiyle temin edilebilmektedir. Yanma sonucunda yan ürün (atık) olarak açığa çıkan bor oksit(B₂O₃) hidrokarbon tankta soğutulmak suretiyle biriktirilebileceği gibi bor santrallerinde geri dönüştürülmek suretiyle kullanılabilir (Eraslan – Karakoç, 2002b). Cowan (10 Aralık 2020), borun yakıt olarak doğrudan motor sistemleri içerisinde yaptığı çalışmaların sonucunda aşağıdaki sonuçları elde etmiştir.

Buna göre Tablo 85'te 125 km sabit bir hızla 1000 km'lik bir yolu gidebilmek için gereksinim duyulan yakıtlar mukayese edildiğinde bor yakıtı, diğer yakıtlara göre daha avantajlıdır. Bor yakıtı, hacimsel olarak diğer yakıtlara göre min. %180 düzeyde daha avantajlı gözükmemektedir. Kütleli bazda ise, bor yakıtının hidrojene karşı bir dezavantajı bulursa da oktan ve metanole göre daha avantajlı konumdadır. Açığa çıkan yan ürünlerde (kül miktarı) ise, borun yanması sonucunda herhangi bir emisyonu neden olmayan bir bor ürünü olan bor oksit(B₂O₃) açığa çıkabilmektedir. Oysaki diğer yakıtlardan oktan ve metanolde yan ürün olarak karbon salınımı oluşabilmektedir (Tablo 85). Ayrıca bor oksit (B₂O₃) tekrardan geri dönüştürülerek yanma olayı için tekrardan kimyasal reaksiyona sokulabilmektedir.

Tablo 85: Saatte 125 Km Hızla 1000 Km (621 Mil) Yol Gidebilmek İçin İhtiyaç Yakıt ve Açığa Çıkan Kül Miktarları

Yakıtlar - Küller		Hacim (l)	Kütle (kg)
Bor	Yakıt: Bor (B)	32,3	54,9
	Kül: Bor Oksit (B2O3)	97,6	176,8
Oktan	Yakıt: Oktan (H3C.C(C2H5)3)	90,3	65,7
	Kül: Karbonik Asit (8 CO2 + 9 H2O)	102,5	295,7 (202,5 CO2)
Metanol	Yakıt: Metanol (CH3 OH)	177,3	140,3
	Kül: Metan (2H2 O + CO 2)	97,5	350,4 (192,7 CO2)
Hidrojen	Yakıt: Hidrojen (H2)	373,8	26,5
	Kül: Oksijen (O2)	237,1	236,4

Kaynak: Cowan, 10 Aralık 2020.

1 GJ enerji eldesinde sonucunda açığa çıkan kül oluşumunda ise, miktar bakımından bor, berilyumdan sonra lityumla beraber en düşük kül oluşumuna, hacimsel olarak ise, alüminyum ve berilyumdan sonra magnezyumla birlikte en az kül oluşumuna izin veren yakıttır (Tablo 86).

Tablo 86: 1 GJ Enerji Eldesinde Açığa Çıkan Kül Miktarları ve Hacimleri

Yakıtlar	Kül Miktarı (ke)	Kül Hacmi (l)
Hidrojen	78,8	79
Lityum	53,1	26,4
Berilyum	43,1	14,3
Magnezyum	70,8	19,7
Çinko	253,9	44,7
Bor	58,9	23,1
Alüminyum	64,4	16,1
Karbon	111,5	158,1
Silikon	70,1	26,4
Fosfor	104,2	43,6

Kaynak: Cowan, 10 Aralık 2020.

Yine 1 GJ enerji elde edebilmek için oksitlenmesi gerek yakıt hacimlerine bakıldığında bor, diğer yakıtlara göre daha düşük hacimlidir. Bu durum oldukça avantajlıdır. Çünkü daha önce de belirtildiği üzere yakıtların, araçların hafifliği ve bu sayede de daha iyi enerji performansı gösterebilmeleri açısından araç içerisinde az yer kaplaması istenmektedir. (Tablo 87). Bu durum boru diğer enerji yakıtlarına göre avantajlı kılmaktadır.

Tablo 87: 1 GJ Enerji Elde Edebilmek İçin Oksitlenmesi Gereken Yakıt Miktarları ve Hacimleri

Yakıtlar	Hacim (l)	Kütle (kg)
Hidrojen	124,5	8,8
Lityum	46,1	24,7
Berilyum	8,4	15,5
Magnezyum	24,5	42,7
Çinko	28,6	204
Bor	7,8	18,3
Alüminyum	12,6	34,1
Karbon	13,4	30,4
Silikon	14	32,7
Fosfor	19,4	45,4

Kaynak: Cowan, 10 Aralık 2020.

Bunların dışında tank hacimlerinde, yine bor yakıtının diğer yakıtlara göre bir üstünlüğü söz konusudur. Tablo 88’de 3 GJ enerji elde edebilmek için gereksinim duyulan tank hacimlerine bakıldığında bor yakıtı, karbon yakıtından sonra en az yer kaplama özelliğine sahip yakıttır.

Tablo 88: 3 GJ Enerji Elde Edebilmek İçin İhtiyaç Duyulan Yakıt Tankı Hacimleri

Yakıtlar	Hacim (l)
Hidrojen	373,8
Lityum	321,9
Sodyum	510
Berilyum	106
Magnezyum	199,7
Çinko	340,3
Bor	139,9
Alüminyum	132,4
Metanol	177,3
Karbon	55,53
Silikon	189,6
Amonyak	256,4

Kaynak: Cowan, 10 Aralık 2020.

Bunların yanında borlu yakıtlar iplik halinde makaralara sarılı halde olduklarında örneğin denizlerde yaşanması muhtemel kazalarda denizin yüzeyine yayılarak canlı yaşamını tehlikeye sokmamaktadır. Bor yakıtı, denizlerde meydana gelebilecek herhangi bir kaza durumunda deniz dibine çökerek burada çözünerek suya karışabilmektedir. Bu durum denizler için herhangi bir olumsuz durum teşkil etmemektedir. Zaten denizler halihazırda

bor mineralleri içermektedir. Ayrıca bor yakıtı uçucu özellikte olmadığından yakıt tankı içerisinde sıcaklık kaynaklı herhangi bir buharlaşma olmamaktadır. Oysa sıvı haldeki hidrojenin sıcaklıktan dolayı belli bir süre sonra bir miktarı buharlaşabilmektedir. Son olarak bor yakıtı, patlayıcı özellikte olmadığı için yaşanabilecek kaza durumlarında da patlama riskini ortadan kaldırabilmektedir (Cowan, 10 Aralık 2020).

Zip Yakıtları Projesi

Zip yakıtları projesi, ABD hükümeti tarafından 1950’li yılların ortalarından itibaren Deniz ve Hava Kuvvetlerinde kullanılan araçların uçuş performanslarını arttırılabilmek amacıyla bor katkılı yakıtların kullanımına dayanan bir projedir. Projede kapsamında, 1960’lı yıllarda ABD Deniz ve Hava Kuvvetleri tarafından XB-70 Valkyrie Bor Bombardıman uçaklarında ve SR-71 Blackbird Süpersonik Stratejik Bombardıman uçaklarında kullanılan jet yakıtlarında katkı maddesi olarak pentaboranlar ve etil boranlar kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddeli bor yakıtları sayesinde bu uçakların hem uçuş mesafeşleri hem de hızları önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Yine 1980’li yıllarda ABD tarafından F-117 Stealth Figher Meteor uçaklarında ve radara yakalanmayan BCM-109 ve UGM-109 Tomahawk füzelerinde bor mineralleri katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bunun yanında Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından, Avrupa Patent Ofisi’ne (EPO) tescil ettirilen bor mineralli yakıtlar ESA’nın uzaya fırlattığı Ariane roketlerinde kullanılmaktadır (TMMOB, 2003).

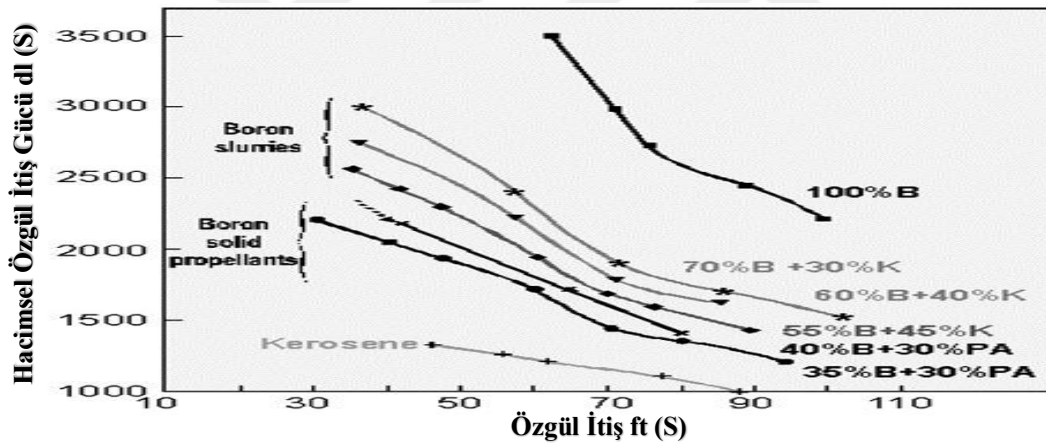
ABD Denizcilik Yönetimi (MARAD) Projesi

Bu proje sodyum borhidritli yakıt kullanan Hydrogen on Demand sisteminin, 2002 yılında ABD Denizcilik Yönetimi (MARAD) çerçevesinde Millennium Cell ve Seaworthy Systems arasında Amerikan gemilerinde ve limanlarında kullanılmak üzere (Çınk, 2002) ve yine 2014 yılında ABD Denizcilik Yönetimi (MARAD) ve ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından denizcilik uygulamalarında kullanılmak üzere hidrojen enerji sistemlerinin tasarlanmasına, test edilmesine, standartlarının ve düzenlemelerinin geliştirilmesi üzerine yürütülen bir projedir. Bu proje ile denizcilik bünyesinde bugünde geliştirilecek olan yakıt pili sistemleriyle gelecekteki teknolojik ve yatırım risklerinin minimuma indirilebileceği, yakıt pili teknolojilerinin dizel sistemle yer değiştirilmesiyle birlikte yılda 100 ila 600 bin \$ arasında yakıt tasarrufunun sağlanacağı ve karbon

emisyollarında da yılda CO₂'de 650.000 kg, NO_x'de 3.300 kg, CO'da 2.700 kg, HC'de 190 kg ve SO_x'de 14 kg olmak üzere azaltılabileceğı belirtilmiştir (Pratt – Chan, 2017).

Fransız Havacılık ve Uzay Labaratuvarı (ONERA) Programı

Bu program, borun bir katkı maddesi olarak ONERA tarafından geliştirilen hipersonik ramjet tahrikli füzelerde deneysel olarak kullanımını içermektedir. Bu amaçla yapılan deneylerde füze yakıtı olarak kullanılan bor bulamaçlarının (boron slurries) ve katı bor yakıtlarının (boron solid propellants) kerosene kıyasla tahrikli füzeler üzerindeki itiş gücünün etkileri araştırılmıştır. Bor bulamaçlarından %55 B + %45 K içerikli bulamacın saf kerosene kıyasla %50 ila %100 daha fazla itiş gücü sergilediğı gözlemlenmiştir (Lorrey, 2020). Katı borlu yakıtlarda bu avantaj %50 ila %80 arasında olmuştur. Bunların dışında saf bor ve %70 B + %30 K bulamacının saf kerosene kıyasla sırasıyla %125 ila %180 ve %50 ila %80 arasında avantajının olduğı tespit edilmiştir (Grafik 109).



Grafik 109: Bor Katkılı Yakıtların Tahrikli Füzelerin İtiş Gücü Üzerindeki Etkileri

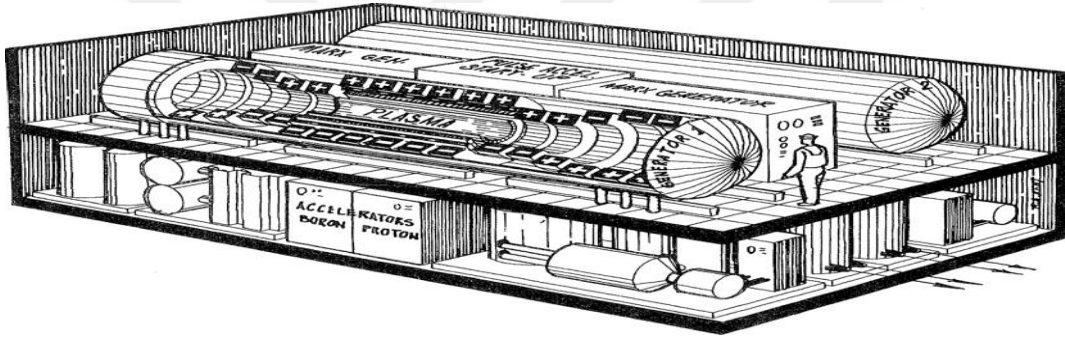
Kaynak: Lorrey, 2020.

5.1.1.3. P-B-11 Füzyonuna Dayalı Tersine Çevrilmiş Konfigürasyon Tekniğı (Field Other Publications Reversed Configuration) Çalışması

Tersine Çevrilmiş Konfigürasyon Tekniğı (Field Other Publications Reversed Configuration), Norman Rostoker, Michl W. Binderbauer ve. Hendrik J. Monkhorst tarafından 1997 yılında bir bor izotopu olan bor-11'in nükleer füzyon enerjisinde kullanımını içermektedir. Bu teknik, hem füzyon olayının kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesine hem de üretilen termal enerjinin %90'ın üzerinde elektrik enerjisine

dönüştürülmesine olanak sağlamaktadır (Rostoker vd., 1997). Diğer füzyon olaylarında ise daha önceden de belirtildiği üzere termal çıktının elektriksel çıktıya dönüşüm oranı yalnızca %30'dur.

Tersine Çevirilmiş Konfigürasyon tekniğinde plazma iyonları ve elektronlar, reaktörün içerisindeki manyetik alanlar tarafından hapsedilmekte/sınırlanmaktadır. Reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji ise, yeterli yoğunluk ve sıcaklık değerlerine sahip iyonların ve elektronların çarpışmaları esnasında nükleer kuvvetler tarafından kaynaştırılması suretiyle meydana gelmektedir (Rostoker – Monkhorst, 2003). Yapılan açıklamalarda reaktörden günlük 200 g bor ile 100 MW'lık elektrik enerjisinin üretilebileceği belirtilmiştir (Rostoker vd., 1997). Tasarlanan füzyon reaktörü Şekil 32'de gösterilmektedir.



Şekil 32: Tersine Çevirilmiş Konfigürasyon Tekniğinin Kullanıldığı P-B-11 Yakıtı İçeren Nükleer Füzyon Reaktörü

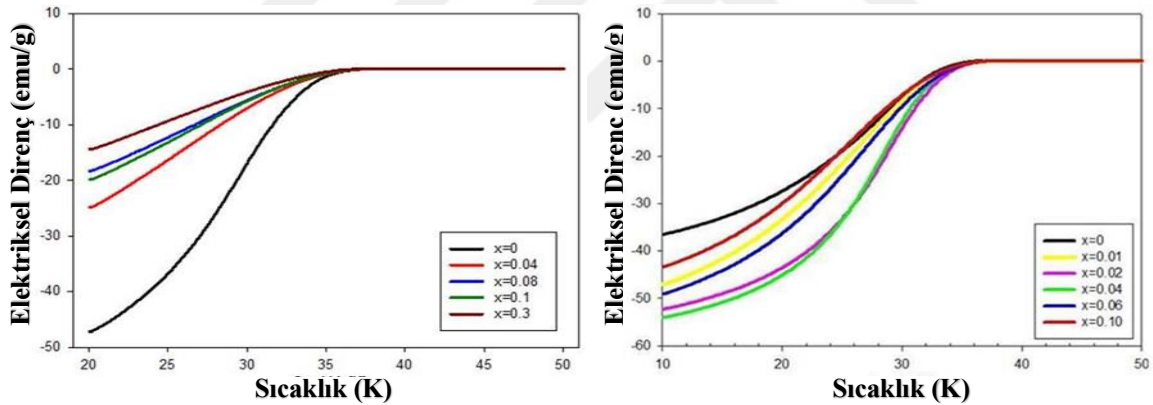
Kaynak: Rostoker vd., 1997.

Bu reaktörlerin önemli bir avantajı, reaktivite üretmediklerinden dolayı şehir merkezleri içerisinde rahatlıkla kurulabilmeleridir. Bu sayede enerji nakil hatlarından kaynaklı elektrik iletim ve dağıtım kayıpları ve enerji nakil hatlarına yapılan yatırım harcamaları ortadan kalkabilmektedir. Bu durum, enerji kaynaklarının üretim alanlarından tüketim alanlarına doğrudan aktarılabilmesi ve dolayısıyla enerji verimliliği açısından oldukça önemlidir.

5.1.2. Türkiye’de Yapılan Belli Başlı Çalışmalar

5.1.2.1. Süperiletkenlik Malzemesi Olarak Magnezyum Diborite (MgB₂) Yönelik Çalışmalar

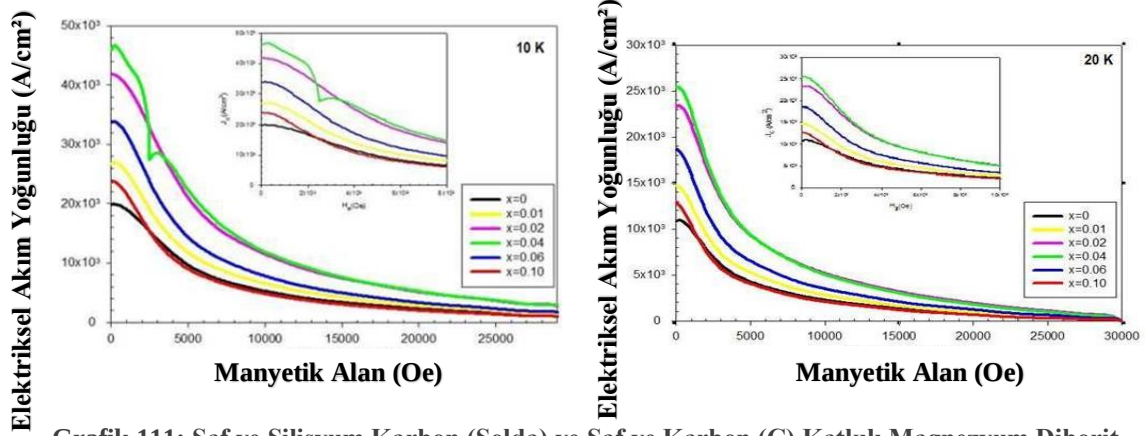
Bir süperiletken malzemesi olarak magnezyum diborite (MgB₂) yönelik Türkiye’de yapılan çalışmalara bakıldığında bu çalışmalardan biri olan Gencer (2012), saf, karbon (C) ve silisyum karbon (SiC) katkılı magnezyum borhidrit (MgB₂) bileşiklerinin süperiletkenlik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada saf magnezyum borhidrit (MgB₂) ve 0,4 g, 0,8 g, 1g ve 3 g’lık karbon (C) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) ve 0,1g, 0,2g, 0,4 g, 0,6 g ve 0,10 g’lık silisyum karbon (SiC) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numuneleri oluşturulmuştur. Elektriksel direnç (süperiletkenlik) bakımından 0,1 T alanda silisyum katkılı (SiC) magnezyum diborit (MgB₂) numunelerinin karbon (C) katkılı magnezyum diborit (MgB₂) numunelerine kıyasla daha yüksek sıcaklık değerlerinde elektriksel direncin kaybolduğu görülmüştür. Bu durum, Grafik 110’da gösterilmiştir.



Grafik 110: Saf ve Karbon Katkılı (Solda) ve Saf ve Silisyum Karbon Katkılı Magnezyum Diborit Numunelerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Dirençleri

Kaynak: Gencer vd., 2012.

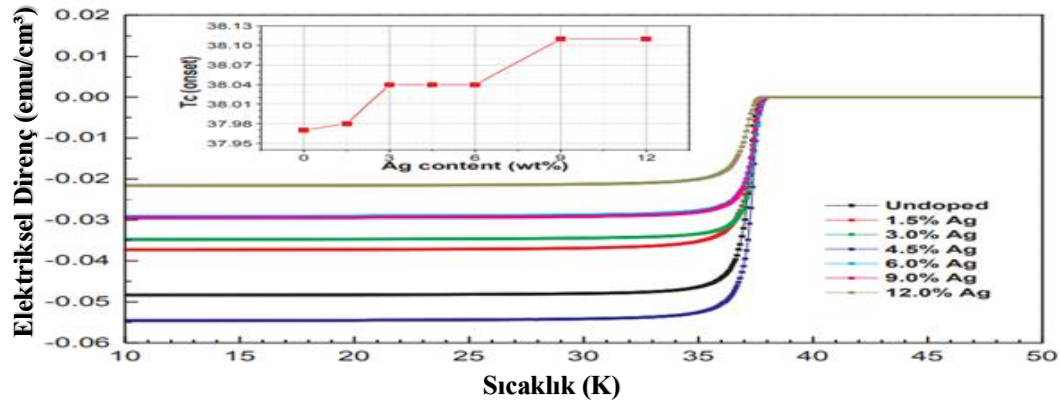
Elektriksel akım yoğunluklarında ise, yine aynı numunelerle 10 K ve 20 K sıcaklık değerlerinde yaptığı deneyler sonucunda katkılı magnezyum borhidrit (MgB₂ +) numunelerinin saf magnezyum diborit (MgB₂) numunelerine kıyasla 0 T alanda daha yüksek akım yoğunluklarına ulaşıldığı sonucunda varılmıştır. Bu durumda Grafik 111’de gösterilmektedir.



Grafik 111: Saf ve Silisyum Karbon (Solda) ve Saf ve Karbon (C) Katkılı Magnezyum Diborit Numunelerinin Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları

Kaynak: Gencer vd., 2012.

Magnezyum diboritin (MgB_2) süperiletkenliği konusunda Türkiye’de gerçekleştirilen diğer bir çalışma ise, Güner (2020) tarafından magnezyum diborite (MgB_2) çeşitli oranlarda gümüş (Ag) ilavesi meydana gelmiştir. Güner (2020) çalışmasında magnezyum diborite (MgB_2) sırasıyla ağırlıkça %1,5 %3, %4,5, %6, %9 ve %12 oranlarında gümüş (Ag) elementi ilave etmiştir. Oluşturulan numunelerin hemen hemen hepsi 0 T alanda 38 K’de elektriksel dirençleri ortan kalkmıştır. Bu durum Grafik 112’de gösterilmiştir.

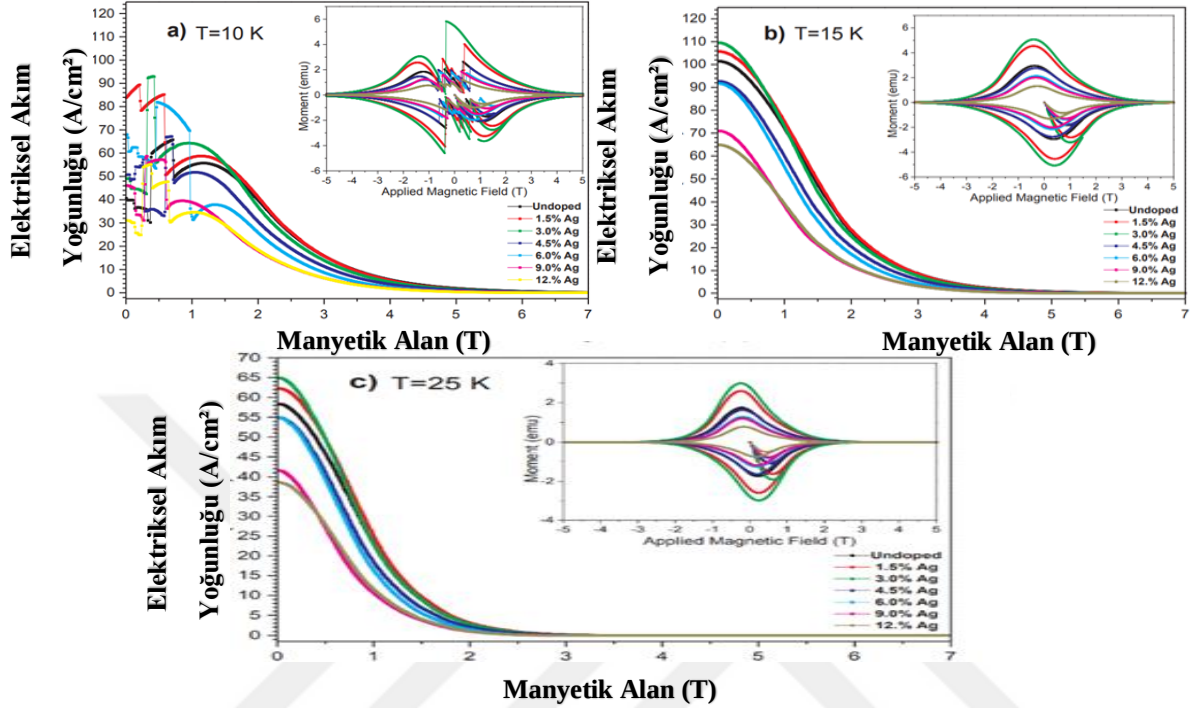


Grafik 112: Saf ve Gümüş Katkılı Magnezyum Diborit Numunelerinin 0 T Alanda Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Dirençleri

Kaynak: Güner, 2020.

Yine aynı numunelerin sırasıyla 10, 15 ve 25 K altındaki elektriksel akım yoğunluklarında ise, %1,5 ve %3 gümüş (Ag) katkılı numunelerin saf magnezyum diborit (MgB_2)

numunesine göre yine 0 T alanda daha yüksek elektriksel akım yoğunlukları göstermiştir. Bu durum Grafik 113'te anlatılmaya çalışılmıştır.



Grafik 113: Farklı Sıcaklık Değerleri Altındaki Saf ve Gümüş İlaveli Magnezyum Diborit Numunelerinin Manyetik Alana Bağlı Elektriksel Akım Yoğunlukları

Kaynak: Güner, 2020.

5.1.2.2. Doğrudan Sodyum Borhidrit Kullanan Yakıt Piliin Üretimi ve Entegrasi Çalışması

Çalışma, 2004-2007 yılları arasında TÜBİTAK–MAM ve Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü işbirliğinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, yakıt pili sistemlerinin ve bileşenlerinin altyapı, bilgi ve teknolojilerinin kazanılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda prototip olarak askeri ve sivil alanlarda kullanılmak üzere 100 KW gücünde sodyum borhidrit içeren yakıt pili üretilmiştir (Karadağ vd., 2016).

5.1.2.3. Sodyum Borhidritli Yakıt Piliin Geliştirilmesi Projesi

Bu proje, 2008-2010 yılları arasında yine TÜBİTAK–MAM ve Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü işbirliğiyle geliştirilmiş olup “Doğrudan Sodyum Borhidrit Kullanan Yakıt Piliin Üretilmesi ve Entegre Edilmesi Projesi” nin devamı niteliğindedir. Projede, sodyum borhidritli yakıt pili sisteminin sabit uygulamalarda kullanımı

amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda prototip olarak 1 KW gücünde sodyum borhidritli yakıt pili tasarlanmıştır (Karadağ vd., 2016).

5.1.2.4. Yakıt Pili Araç Projesi

Bu proje, 2009 ila 2011 yılları arasında TÜBİTAK-MAM ve Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü işbirliğiyle prototip olarak geliştirilmiştir. Projede yakıt olarak sodyum borhidrit, yakıt pili olarak proton değişimli membran (PEM) kullanılmıştır ve proje %95 yerli üretimle gerçekleştirilmiştir. Araçtaki 3 kw gücünde yakıt pili kullanılmıştır. Araç, bir depo sodyum borhidrit ile 150 km yol alabilmiş ve saatte 80 km hıza ulaşabilmiştir (TÜBİTAK-MAM, 18 Kasım 2020).

5.1.2.5. İnsansız Hava Araçlarında (İHA) Kullanılmak Üzere Bor Kaynaklı Hidrojen Yakıtlarının ve Yakıt Pili Sistemlerinin Geliştirilmesi Projesi

Projede, İHA'lara monte edilmek üzere sodyum borhidritli PEM yakıt pili kullanılmış ve bu yakıt pilinin de 220 W güç oluşturmaya amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 2,5 m genişliğinde karbon fiber yapı kanata, 20 km'ye kadar uzanan haberleşme alanına, 60x15x15 cm'lik gövdeye, 2000 m'ye kadar irtifaya ve saatte 40 km hıza ulaşabilen toplam 8 kg ağırlığında İHA üretilmiştir. Bir batarya sistemine sahip olan İHA havada maksimum 3 saat kalabilirken yakıt pili sisteminin entegrasyonu İHA'nın havada kalabilme süresi 5 saatte çıkarılmıştır (Karadağ vd., 2016).

5.2. Türkiye'de Borun Enerji Kaynağı Olarak Uygulanabilirliğinin ve Sürdürülebilir Şekilde Kullanımının Analiz Edilmesi

5.2.1. Borun Araç Yakıt Olarak Türkiye Piyasasındaki Rekabetçilik Düzeyi

Bor minerallerine (sodyum borhidrit) dayalı üretim teknolojilerinin günümüzde yeteri kadar ticarileşmemesindeki en büyük etken yakıt pillerinin ve sodyum borhidrit maliyetleri olarak gösterilmektedir. Ancak 2050 yılına kadar yakıt pili maliyetlerinin küresel ölçekte önemli derecede düşecek olması ve bu sayede de yakıt pili teknolojilerinin dünya genelinde yakıt tüketim maliyetleri açısından diğer yakıtlara göre avantajlı duruma gelecek olması hiç şüphesiz ki bu teknolojilerinin küresel ölçekte daha da yaygınlaşmasına neden olacaktır (bk. Grafik 86; Grafik 87).

Sodyum borhidritin küresel ölçekte toz halindeki formu 46.500 \$/t, çözelti halindeki formu 38.200 \$/t'dur (Kalafatoğlu – Örs, 2003). Geliştirilen Hydrogen on Demand sistemine göre yakıt olarak 1000 g çözelti halindeki sodyum borhidrit ile 724 km yol alınabilmektedir (bk. Tablo 84). Dolayısıyla yakıt olarak sodyum borhidriti kullanan bir aracın 724 km yol mesafesindeki yakıt maliyeti 38,2 \$ olabilmektedir. Bu yakıt maliyeti, aynı mesafe için diğer benzinli ve dizel otomobillerdeki yakıt maliyetleri ile mukayese edildiğinde özellikle Türkiye açısından oldukça rekabetçi olabilmektedir. Şöyle ki; Otomobil segmentindeki araçların mevcut yakıt depolama hacimleri 40 ila 80 litre arasında değişiklik göstermektedir (Yenişafak, 17 Kasım 2020). 45 litre yakıt depolama hacmine sahip benzinli araçlar dolu bir depo ile toplamda 620 km yol alabilirken aynı hacme sahip dizel yakıtlı araçlar toplamda 920 km yol alabilmektedir (Sabah, 17 Kasım 2020). Bu verilerden hareketle 80 litre kapasiteye sahip benzinli araçlar dolu depoyla toplamda 1.102 km, dizel araçlar ise dolu depoyla toplamda 1.635 km yol alabilmektedir. Litre başına ise, benzinli araçlar dolu bir depoyla toplamda 13,77 km yol alabilirken dizel araçlar da toplamda 20,43 km yol alabilmektedir.

Türkiye'de 17 Kasım 2020 itibariyle;

Benzinin litre satış fiyatı= 6,73-6,77 TL

Dizelin (Motorin) litre satış fiyatı=6,27-6,33 TL'dir (Shell, 17 Kasım 2020). Yine aynı tarihte dolar kuru ise, 7,68 \$/TL'dir (Bloomberght, 17 Kasım 2020). Buna göre;

45 litre yakıt hacmi bulunan benzinli bir aracın toplamda 724 km yol alabilmesi için $724/13,77= 52,57$ litre yani $52,77/45=1,16$ depo benzine, 80 litre yakıt hacmi bulunan benzinli bir araçta ise $52,57/80=0,65$ depo benzine ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt maliyetleri ise benzinin litre satış fiyatının ortalaması alındığında $(6,73+6,77/2=6,75 \text{ TL})$ $52,77*6,75=356,19 \text{ TL}$ bu da dolar kuruna çevrildiğinde 46 \$ olabilmektedir. Yani 45 ve 80 litre yakıt hacmine sahip benzinli bir aracın Türkiye şartlarında 724 km yol alabilmesinin maliyeti 46 \$'dır.

45 litre yakıt hacmi bulunan dizel bir aracın toplamda 724 km yol alabilmesi için $724/20,43=35,43$ litre yani $35,43/45=0,78$ depo benzine, 80 litre yakıt hacmi bulunan

dizel bir araçta ise $35,43/80=0,44$ depo dizel yakıtı ihtiyacı duyulmaktadır. Yakıt maliyetleri de dizel yakıtın litre satış fiyatlarının ortalaması alındığında ($6,27+6,33/2=6,3$ TL) $35,43*6,3=223,20$ TL aynı şekilde dolar kuruna çevrildiğinde 29 \$ olabilmektedir. Yani dizel ve benzinli bir araçla 724 km yol alabilmenin Türkiye şartlarındaki maliyetleri 29 ila 46 \$ arasında değişim gösterebilmektedir. Bu da yakıt maliyetleri açısından sodyum borhidritin Türkiye piyasasında rekabetçi olabileceğinin bir göstergesidir.

5.2.2. Nükleer Füzyona Dayalı Elektrik Üretimi

Nükleer füzyon reaktörlerinin dünya genelinde yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere gelecek vadedmesi özellikle de Türkiye’de kurulabilecek bir nükleer füzyon tesisinin Türkiye’nin yerli kaynaklarla elektrik üretimine katkı sağlayacaktır. Bu durumu, Türkiye’de gelecek dönemlerde faaliyete geçecek olan Akkuyu Nükleer Fisyon Santrali ile küresel iş birliği neticesinde gerçekleştirilecek olan ITER’den hareketle anlatacak olursak;

Akkuyu Nükleer Fisyon Santrali, daha önceden de belirtildiği üzere her biri 1.200 MW kapasiteye sahip 4 adet reaktör olmak üzere toplamda 4.800 MW enerji kapasitesine sahip olarak inşa edilecek ve faaliyete geçtiğinde ise yıllık bazda toplam 36.000 GWh değerinde elektrik enerjisi üretmesi beklenmektedir (bk. Bölüm 1). Nükleer fisyon reaktörlerinin küresel ölçekte %90 kapasite kullanımı oranı ile çalıştığı varsayıldığında (kapasite kullanım oranları %75 ila %90 arasında değişmekte);

$$C_n = C_g * C_{r_u} \quad (5.3)$$

C_n = Net Kapasite (MW)

C_g = Brüt Kapasite (MW)

C_{r_u} = Kapasite Kullanım Oranı (%)

$$C_n = 4.800 * 0,90 = 4.320 \text{ MW}$$

net üretim kapasitesine ulaşılmaktadır. Bu net üretim kapasitesiyle ($C_n = 4.320 \text{ MW}$) yıllık bazda 36.000 GWh değerinde bir enerji çıktısının üretebilmesi için reaktörün günlük bazda çalışması gereken saat;

$$W_h = (E_{oA}/C_n) / 365 \quad (5.4)$$

W_h = Günlük Çalışma Saati (saat)

E_{oA} = Akkuyu'daki Net Enerji Çıktısı (GWh)

4.320 MW, GW'a dönüştürüldüğünde 4,32 GW olabilmektedir. Buradan da;

$$W_h = (36.000/4,32) / 365$$

$W_h = 22,83 \sim 23$ saat olabilmektedir.

ITER'e bakıldığında ise, D-T füzyon reaksiyonunda 7 ila 10 dakika boyunca minimum düzeyde 500 MW değerinde termal enerji çıktısı elde edilebilmektedir (bk. Bölüm 1). Bu cihaz, Akkuyu Nükleer Fisyon Santralinde olduğu gibi günde 23 saat çalıştırıldığı ve ortalama 9 dakikada bir 500 MW.m değerinde termal enerji çıktısı ele edilebileceği düşünüldüğünde saate;

9 dakikada 500 MW.m

60 dakikada (1 saatte) x

X= 3.333 MW.h, günde ise 23 saat çalıştırıldığında yıllık termal enerji çıktısı;

$$E_{oIt(1)} = (X * W_h) * 365 \quad (5.5)$$

$E_{oIt(1)}$ = Günde 23 Saat Çalıştırılması Durumunda ITER'den Yıllık Bazda Elde Edilecek Potansiyel Termal Enerji Çıktısı (MW.h)

X= ITER'Den Günlük Bazda Elde Edilecek Potansiyel Termal Enerji Çıktısı (MW.h)

ifade edilmektedir. Buradan da;

$$Eo_{It(1)} = (3.333 * 23) * 365$$

den $Eo_{It(1)} = 27.980.535$ MW.h değerinde potansiyel termal enerji çıktısı elde edilmektedir. Daha önceden de belirtildiği üzere bir D-T reaksiyonunu sonucunda açığa çıkan termal enerjinin elektriksel enerjiye dönüşüm oranı %30'dur. Buradan hareketle yıllık olarak elde edilebilecek potansiyel elektriksel çıktı ise;

$$Eo_{Ie(1)} = Eo_{It} * 0,30 \quad (5.6)$$

$Eo_{Ie(1)}$ = ITER'den Yıllık Bazda Elde Edilecek Potansiyel Elektriksel Enerji Çıktısı (MW.h)

$$Eo_{Ie(1)} = 27.980.535 * 0,30$$

dan $Eo_{Ie(1)} = 8.394.161$ MW.h olmaktadır.

Proton-bor-11 reaksiyonunda ise durum, bu reaksiyonda bir D-T reaksiyonuna göre füzyon başına 17.59 Mev/8.68 Mev'den 2.02 kat daha düşük enerji açığa çıkmaktadır. Türkiye'de bu yönde bir füzyon reaktörünün kurulması ve yakıt olarak da tersine çevirilmiş konfigürasyon tekniği ile D-T yerine P-B-11 yakıtı kullanılması durumunda yıllık bazda elde edilmesi mümkün termal ve elektriksel çıktı D-T reaksiyonun 2.02 kat daha azı olarak;

$$Eo_{It(2)} = Eo_{It(1)} / 2.02 \quad (5.7)$$

$Eo_{It(2)}$ = ITER'de D-T yerine P-B11 Yakıtı Kullanılması Durumunda Açığa Çıkması Muhtemel Potansiyel Termal Enerji (MW.h)

$$Eo_{It(2)} = 27.980.535 / 2.02$$

den $Eo_{It(2)} = 13.851.750$ MW.h, elektriksel enerji ise %90 verimle;

$$Eo_{Ie(2)} = Eo_{It(2)} * 0,90 \quad (5.8)$$

$Eo_{Ie(2)}$ = ITER’de D-T yerine P-B11 Yakıtı Kullanılması Durumunda Açığa Çıkması
Muhtemel Potansiyel elektrik Enerjisi (MW.h)

$$Eo_{Ie(2)} = 13.851.750 * 0,90$$

dan $Eo_{Ie(2)}$ = 12.466.575 MW.h olarak bulunmaktadır.

Bu değer 2019 yılı itibariyle Türkiye’de tüketilen toplam elektrik enerjisinin %4,08’ine eşittir. Ancak nükleer füzyon enerjisine dayalı reaktör sistemlerinin küresel ölçekte ilerleyen dönemlerde daha da geliştirileceği düşünüldüğünde üretilebilecek olan elektriksel çıktının daha yüksek seviyelerde gerçekleşebilme durumu da bulunmaktadır.

5.2.3. Elektriksel İletim ve Dağıtım Kayıplarında Azalma

Son olarak ise, bor teknolojilerine geçilmesi ve süperiletken bir malzeme olan magnezyum diboritin de elektriksel iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılmasına yönelik olarak enerji sektöründe kullanılması durumunda bu yönde kaynaklanan kayıpların büyük bir bölümünün önüne geçilmesi mümkündür. Daha önceden de belirtildiği üzere süperiletken özelliğe sahip yapılar, iletken olmayan yapılara kıyasla 2 ila 10 kat daha yüksek enerji taşıyabilir durumda olduğundan Türkiye’nin yıllık olarak ortalama 30 TWh dolaylarında olan iletim ve dağıtım kayıplarını 3 TWh’e kadar düşürme potansiyeli bulunmaktadır. Bu sayede üretilmiş olan elektriğin nihai kullanım alanlarına daha verimli bir şekilde aktarımı da mümkün hale gelecektir.

5.3. Analize İlişkin Öncüller ve Olası Faydalar

5.3.1. Öncüller

5.3.1.1. İç Piyasaya Yönelik Bor Üretimi ve Kapasitesi

Türkiye’nin, bor ekonomisine geçebilmesi yani sahibi olduğu bor minerallerini kendisine alternatif bir enerji kaynağı olarak sürdürülebilir bir şekilde kullanabilmesi için öncelikle iç piyasaya yönelik mevcut bor üretim kapasitesini ve bor üretim miktarını arttırması

gerekmektedir. Şöyle ki bor ürünlerinden biri olan sodyum borhidritin (NaBH_4) otomobil teknolojilerinde kullanılabilirliğinin öncüsü olan Millennium Cell firmasının 2002 yılında yaptığı açıklamada yıllık olarak dünya genelinde sodyum borhidrit yakıt pili teknolojisine sahip 50 milyon adet aracın üretilmesi için 20 milyon ton sodyum borhidrit'e ihtiyaç duyulabileceğini, yakıtın yanması sonucunda yan ürün olarak açığa çıkan sodyum metaboratın tekrar geri kazanılması durumunda ise ihtiyaç duyulacak olan bor miktarının 20 milyon tonun da üzerine çıkabileceğini belirtmiştir (Çınk, 2002).

Buna göre TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verilerine göre Türkiye'de Kasım 2018 itibariyle trafiğe kayıtlı toplam 22.850.238 adet, Ekim 2019 itibariyle de toplamda 23.153.556 adet araç bulunmaktadır. Bu araçların hem 2018 hem de 2019 yılında %54'ü otomobil, %16'sı kamyonet, %14'ü motorsiklet, %8'i traktör, %4'ü kamyon, %2'si minibüs, %0,9'u otobüs ve %0,3'ü de özel amaçlı taşıtlardan oluşmuştur (TÜİK, Aralık 2019; TÜİK, Ocak 2019).

Yakıt olarak sodyum borhidriti kullanan yakıt pilli araçların Türkiye'de öncelikle araç sayısının büyük bir bölümünü oluşturan otomotiv sektöründe uygulanması durumunda Millennium Cell firmasının ve Türkiye'deki otomobil sayısı verilerinden hareketle 2018 yılı için teorik olarak üretilmesi gereken bor miktarı;

$$Tb_{q-2018} = \frac{To_{q-2018} * Mb_q}{Mv_q} \quad (5.9)$$

formülasyonundan burada;

Tb_{q-2018} = Türkiye'nin 2018 yılı verileriyle ihtiyaç duyacağı bor üretim miktarı (ton)

To_{q-2018} = 2018 yılı itibariyle Türkiye'deki toplam otomobil miktarı (adet)

Mv_q = Millennium Cell firması tarafından belirtilen teorik araç miktarı (adet)

Mb_q = Millennium Cell firması tarafından belirtilen teorik bor miktarı (ton)

temsil edilmektedir. Türkiye'de 2018 yılındaki toplam otomobil miktarı ise, Türkiye'deki toplam araç miktarının %54'ü olduğundan;

$$To_{q-2018} = Tv_{q-2018} * 0,54 \quad (5.10)$$

burada;

Tv_{q-2018} =2018 yılında Türkiye’deki toplam araç miktarını

temsil etmektedir. Buna göre Türkiye’de 2018 yılındaki toplam otomobil miktarı;

$$To_{q-2018} = 22.850.238 * 0,54 = 12.339.129 \text{ adet olmaktadır.}$$

Buradaki değer ve diğer parametre değerleri denklem (5.9)’da yerine konulduğunda teorik bazda 2018 yılı verileri ile üretilmesi gereken bor miktarı;

$$Tb_{q-2018} = \frac{12.339.129 * 20.000.000}{50.000.000}$$

$Tb_{q-2018} = 4.959.652$ ton olabilmektedir.

2019 yılı için teorik açıdan üretilmesi gereken bor miktarı ise;

$$Tb_{q-2019} = \frac{To_{q-2019} * Mb_q}{Mv_q} \quad (5.11)$$

formülasyonundan burada;

Tb_{q-2019} = Türkiye’nin 2019 yılı verileriyle ihtiyaç duyacağı bor üretim miktarı (ton)

To_{q-2019} =2019 yılı itibariyle Türkiye’deki toplam otomobil miktarı (adet)

Mv_q = Millennium Cell firması tarafından belirtilen teorik araç miktarı (adet)

Mb_q = Millennium Cell firması tarafından belirtilen teorik bor miktarı (ton)

temsil edilmektedir. Türkiye’de 2019 yılındaki toplam otomobil miktarı ise, Türkiye’deki toplam araç miktarının yine %54’ü olduğundan;

$$To_{q-2019} = Tv_{q-2019} * 0,54 \quad (5.12)$$

burada;

Tv_{q-2019} =2019 yılında Türkiye’deki toplam araç miktarını

ifade etmektedir. Buna göre Türkiye’de 2019 yılındaki toplam otomobil miktarı;

$$To_{q-2019} = 23.153.556 * 0,54 = 12.502.920 \text{ adet olmaktadır.}$$

Buradaki değer ve diğer parametre değerleri denklem (5.11)’de yerine konulduğunda teorik bazda 2018 yılı verileri ile üretilmesi gereken bor miktarı;

$$Tb_{q-2019} = \frac{12.502.920 * 20.000.000}{50.000.000}$$

Tb_{q-2019} =5.001.168 ton olmaktadır.

Bu durumda Türkiye’nin bor üretim kapasitesinin de, 2018 yılı verileri ile;

$$Tb_{c-2018} = \frac{Tb_{q-2018}}{Tr_{cu}} \quad (5.13)$$

burada;

Tb_{c-2018} = 2018 yılı verileriyle Türkiye’nin bor ürünleri kapasitesi (ton)

Tr_{cu} = Türkiye’nin ortalama bor ürünleri kapasite kullanım oranını (%)

ifade etmektedir. Türkiye’nin bor ürünlerinin kapasite kullanım oranı ortalama %89,5 ~ %90 alındığında (bk. Grafik 99) ve bulunan değerler yerlerine koyulduğunda;

$$Tb_{c-2018} = \frac{4.959.652}{0,90}$$

dan $Tb_{c-2018} = 5.510.724$ ton olmaktadır.

2019 yılı verilerinden hareketle gereksinim duyulan bor ürünleri kapasitesi ise;

$$Tb_{c-2019} = \frac{Tb_{q-2019}}{Tr_{cu}} \quad (5.14)$$

burada;

Tb_{c-2019} = 2019 yılı verileriyle Türkiye'nin bor ürünleri kapasitesi (ton)

Tr_{cu} = Türkiye'nin bor ürünleri kapasite kullanım oranını (%)

ifade etmektedir. Daha önceden bulunmuş olan değerler denklem (5.14)'te yerine konulduğunda

$$Tb_{c-2019} = \frac{5.001.168}{0,90}$$

dan $Tb_{c-2019} = 5.556.853$ ton olmaktadır.

Bu durumda Türkiye'de mevcut bor ürünleri üretimlerinin yıllık bazda 2018 yılı verileri baz alındığında toplamda 1,8 kat (%104), 2019 yılı verileri baz alındığında ise toplamda 2,4 kat (%145) arttırılması gerekmektedir. Bu artışın da yıllık üretilecek olan otomobil sayısı oranında güncellenmesi gerekmektedir. Mevcut bor ürünleri kapasitelerinin de yine yıllık bazda 2018 yılı verileri baz alındığında 2,03 kat (%104), 2019 verileri baz alındığında ise yine 2,03 kat (%103) arttırılması gerekmektedir. Yani Türkiye'nin bor minerallerini alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanabilmesi için mevcut üretim miktarlarını ve kapasitelerini ortalama 2 kat arttırması gerekmektedir. Yine bor üretim kapasitelerinin de yıllık bazda otomobil sayılarındaki artışla güncellenmesi gerekmektedir. Tabi bu durum ilk etap için geçerlidir. Yani bor minerallerinin (sodyum borhidrit) yalnızca otomobil endüstrisindeki kullanımı için geçerlidir. Bu yapının Türkiye'deki tüm araçları kapsayacak şekilde genişletilmesi, bor-11 izotopunun nükleer enerjide kullanılması, sodyum metaboratın ($NaBO_2$)-bor oksitin (B_2O_3) geri kazanılması

durumunda ve magnezyum diboritin (MgB₂) bir süperiletkenlik malzemesi olarak kullanılması durumunda hiç kuşkusuz ki daha fazla bor üretim kapasitelerine ve bor üretimlerine ihtiyaç duyulacaktır.

5.3.1.2. Toplam Bor Arz Yapısı

Türkiye’de bor minerallerinin alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanımında iç piyasaya yönelik mevcut üretim ve kapasite miktarlarının ayarlanmasından sonra üzerinde durulması gereken diğer bir konuda mevcut bor arz yapısıdır. Türkiye’nin daha önce de belirtildiği üzere bor ürünlerinin büyük bir bölümünü yurt dışına arz etmektedir. Bu yapı, ortalama %3’ü yurt içi (tüketim), %97’si de yurt dışı (ihracat) şeklindedir (bk. Bölüm 4). Türkiye’nin bor enerjisini sürdürülebilir, katma değer yaratacak şekilde hayata geçirebilmesi için yine ilk etapta mevcut arz yapısının ihracat odaklı olmaktan ziyade iç piyasaya yönelik olması gerekmektedir. Şöyle ki sodyum borhidritli araç sistemlerinin Türkiye’de faaliyete geçebilmesi için 2018 yılı verileriyle iç piyasada tüketilmesi gereken teorik bor miktarı $Tb_{q-2018} = 4.959.652$ ton olarak bulunmuştu.

Yani iç piyasada %3 oranında 4,9 milyon ton bor üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’nin bor ürünlerine yönelik halihazırdaki arz yapısının %3’ü yurt içi (tüketim) ve %97’si de yurt dışı (ihracat) olduğu düşünüldüğünde toplam arz için gerekli olacak bor miktarı;

$$\begin{array}{rcl} 4.959.652 \text{ ton bor} & \%3 \text{ (iç piyasa)} & \\ \times & \%97 \text{ (dış piyasa)} & \\ \hline X = 160.362.081 \text{ ton bor, toplam arz miktarı ise } 160.362.081 \text{ ton} + 4.959.652 \text{ ton'dan} & & \\ 165.321.733 \text{ ton bor'dur.} & & \end{array}$$

2019 yılı için hesaplanan $Tb_{q-2019} = 5.001.168$ ton verilerine göre ise,

$$\begin{array}{rcl} 5.001.168 \text{ ton bor} & \%3 \text{ (iç piyasa)} & \\ \times & \%97 \text{ (dış piyasa)} & \\ \hline X = 161.704.432 \text{ ton bor, toplamda arz miktarı ise } 161.704.432 \text{ ton} + 5.001.168 \text{ ton'dan} & & \\ 166.705.600 \text{ ton bor olmaktadır.} & & \end{array}$$

Türkiye'nin bu arz miktarlarını kısa ve orta vadede yakalayabilmesi oldukça güçtür. Çünkü bu arz miktarlarının elde edilebilmesi için 2018 yılı verileriyle mevcut arz miktarlarının 65 kat, 2019 yılı itibariyle ise tam 77 kat artırılması gerekmektedir ve Türkiye'nin 2006-2019 arası dönemdeki bor üretimi ise toplamda sadece 2 kat (1 milyon ton'dan 2 milyon ton'a) artmıştır. Yani Türkiye'deki toplam bor arz miktarlarının aynı üretim hızında 65 ila 77 kat arttırılabilmesi için 422 ila 500 yıla ihtiyaç duyulacaktır. Bu, 2018 ve 2019 yılında Türkiye'deki araç verileri doğrultusundaki rakamdır. Fakat Türkiye'deki araç sayıları her geçen yıl artmaktadır ve 422-500 yıl sonrasında toplam arz miktarlarının 65-77 kattan daha fazla olması gerekecektir.

Ancak Türkiye'nin bor ürünlerine yönelik arz yapısının ilk etapta %50 yurt içi (tüketim) ve %50 yurt dışı (ihracat) olarak dönüştürüldüğü varsayıldığında ihtiyaç duyulacak toplam bor miktarının 2018 yılındaki verilerden hareketle;

$$\begin{array}{rcl} 4.959.652 \text{ ton bor} & & \%50 \text{ (iç piyasa)} \\ x & & \%50 \text{ (dış piyasa)} \\ \hline \end{array}$$

$$X=4.959.652 \text{ ton bor'dan toplamda } 4.959.652 \text{ ton} + 4.959.652 \text{ ton'dan } 9.919.304 \text{ ton bor,}$$

2019 yılı verilerinden hareketle ise;

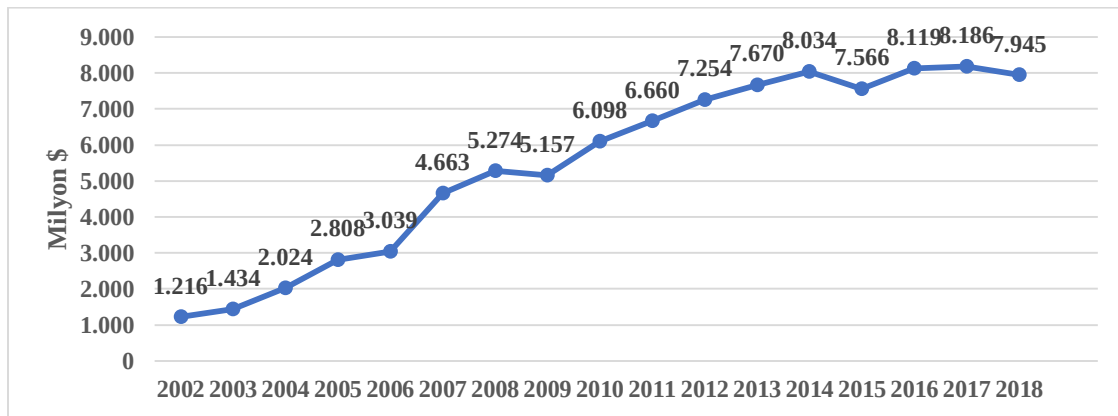
$$\begin{array}{rcl} 5.001.168 \text{ ton bor} & & \%50 \text{ (iç piyasa)} \\ x & & \%50 \text{ (dış piyasa)} \\ \hline \end{array}$$

$X= 5.001.168 \text{ ton bor'dan toplamda } 5.001.168 \text{ ton} + 5.001.168 \text{ ton'dan } 10.002.336 \text{ ton}$ bor olacaktır. Bu durum orta vadede daha makul düzeydedir. Çünkü mevcut arz miktarlarının 2018 yılı verileriyle yaklaşık 4 kat, 2019 yılı verileriyle de yaklaşık 5 kat artırılması gerekmektedir. Bu da mevcut üretim hızında 26-32 yıla denk gelmektedir. Mevcut arz yapısının iç piyasaya lehine daha da genişletilmesi durumunda ihtiyaç duyulacak toplam arz miktarına daha kısa sürede ulaşabilmek mümkün olacaktır.

5.3.1.3. Ar-Ge Yapısı

Türkiye’de bor minerallerinin enerji kaynağı olarak geliştirilmelerine yönelik yürütülen çalışmalar oldukça sınırlıdır (sadece TÜBİTAK ve bununla işbirliği bazı kuruluşlarla yapılan protatip çalışmalar mevcuttur). Türkiye’de bor minerallerinin alternatif bir enerji kaynağı olarak sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi için buna yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin de oldukça gelişmiş olması gerekmektedir. Türkiye’nin, bor enerji teknolojilerini de kapsayacak şekilde gelişmiş bir Ar-Ge yapısına sahip olması hiçkuşkusuz ki bu yönde atılan adımların daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesine ortam hazırlayacaktır.

Buna göre Türkiye’nin Ar-Ge yapısının genel görünümüne bakıldığında 2002-2018 arası süreçte 2002 yılına kıyasla genel itibariyle bir artış gözükse de 2014 yılından sonra durağan bir yapıya kavuşmuştuğu görülmüştür. Bu dönem içerisinde Türkiye’nin Ar-Ge harcamaları toplamda 6,5 kat (%553) artarak 7,9 milyar \$’a ulaşmıştır. Bu artışın önemli bir bölümü ise 2002-2014 arası dönemde gerçekleşmiştir. 2002-2014 arası dönemde Türkiye’nin toplam Ar-Ge’ye yaptığı harcamalar 1,2 milyar \$’dan 8,03 milyar \$ seviyesine yükselmiştir. 2014 yılından sonra ise 2018 yılına kadar süreçte Türkiye’nin Ar-Ge harcamaları toplamda %1,1 oranında azalmıştır (Grafik 114).

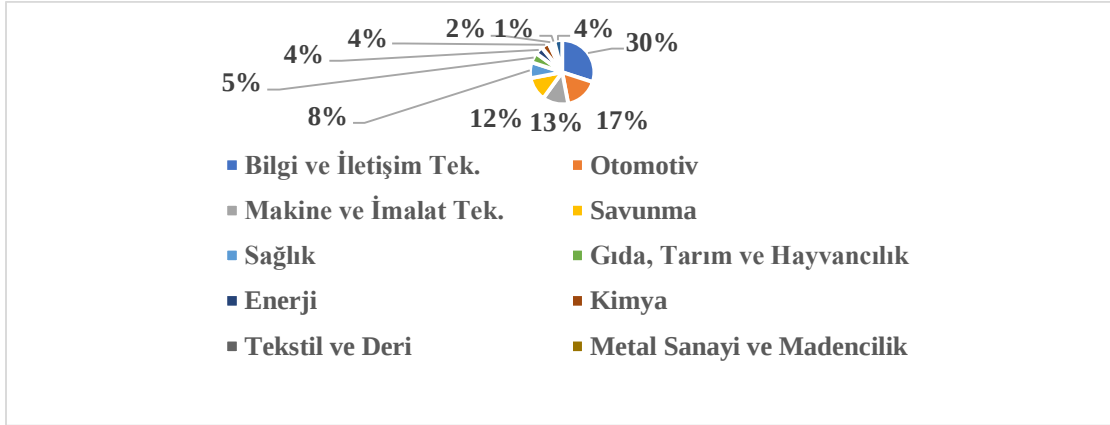


Grafik 114: Türkiye’nin Yıllar İtibariyle Toplam Ar-Ge Harcamaları

Kaynak: TÜİK, 23 Ekim 2020; World Bank, Kasım 2020’Den Elde Edilen Verilerden Oluşturulmuştur.

Yine bu dönem içerisinde yapılmış olan toplam Ar-Ge harcamalarının sektörel dağılımlarına bakıldığında, Türkiye’de bor enerji teknolojilerinin gelişimine olanak sağlayacak olan enerji, kimya ve madencilik sektörlerinin toplam Ar-Ge harcamalarının

içerisindeki paylarının son derece düşük kaldığı görülmüştür. 2002-2018 arası süreçte bu sektörlerden enerji ve kimya sektörleri, Türkiye’deki toplam Ar-Ge harcamalarda %4’er pay alırken madencilik sektörü ise sadece %1 pay almıştır. Bu dönemdeki en yüksek payı, bilgi ve iletişim teknolojileri ve otomotiv sanayisi almıştır. Bu iki sektöre yapılan Ar-Ge harcamaları, yapılan toplam Ar-Ge harcamalarının yaklaşık %50’sini (%30 bilişim-iletişim teknolojileri ve %17 otomotiv sektörü) oluşturmuştur (Grafik 115).



Grafik 115: Türkiye’nin 2002-2018 Arası Dönemde Yapmış Olduğu Toplam Ar-Ge Harcamalarının Sektörel Dağılımları

Kaynak: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019.

Türkiye’nin bor enerji teknolojilerine yönelik yüksek katma değerli bir yapıya kavuşabilmesi için bu sektörler (enerji, kimya, madencilik) yönelik Ar-Ge yapısının ciddi oranda geliştirilmesi gerekmektedir.

5.3.2. Olası Faydalar

5.3.2.1. Petrol İthalatında Azalma ve Yüksek Katma Değer Sağlama

Türkiye’nin 2018 yılı itibarıyla petrol ithalatına ödediği döviz toplamda 13.462.000.000 \$’dır (bk. Tablo 34). İthal edilen 13.462.000.000 \$ değerindeki toplam petrolün ise %77’si (10.366.000.000 \$) ulaşım sektöründe kullanılmıştır (bk. Grafik 45). Daha önceden de belirtildiği üzere Türkiye’deki toplam araç miktarının %54’ü otomobillerden oluşmaktadır. Yani bu da demek oluyor ki Türkiye’nin 2018 yılı itibarıyla ithal etmiş olduğu toplam 13.462.000.000 \$’lık petrolün $10.366.000.000 \times 0,54$ ’den 5.597.640.000 \$’lık bir kısmı otomobiller tarafından tüketilmiştir.

Buna göre, Türkiye'nin bor enerji teknolojilerine geçmesi ve bu bağlamda ilk etapta sodyum borhidritli araç teknolojilerinin Türkiye'de araç sektörünün yoğun olduğu otomotiv sektöründe uygulanması durumunda mevcut petrol ithalatında 5.597.640.000 \$'lık bir tasarrufun sağlanması muhtemeldir. Bu değer, Türkiye'de en çok bor ihracat gelirinin elde edildiği 2018 yılındaki değerden 5,5 kat daha fazladır.

Ayrıca elde edilecek 5,5 milyar \$'lık potansiyel gelir, Türkiye'nin toplam petrol ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payını da düşürecektir. Türkiye'nin 2018 yılında petrol ithalatına ödediği 13,4 milyar \$'lık döviz, Türkiye'nin 2018 yılı itibarıyla toplam enerji ithalatının %67'sini oluşturmaktadır. Buna göre Türkiye'de sodyum borhidrite dayalı enerji teknolojilerinin kullanılması durumunda elde edilecek olan 5,5 milyar \$'lık potansiyel gelir ile Türkiye'nin petrole dayalı enerji ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payının

$$\begin{array}{rcl} 13.462.000.000 \$ & & \%67 \\ 5.597.640.000 \$ & & x \end{array}$$

X= %28'inin önlenebilmesi mümkündür. Bu durum petrole dayalı enerji ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payında da $[(\%28 / \%67) * 100]$ 'den %42'lik bir tasarrufun oluşmasına zemin hazırlayacaktır.

Sodyum borhidrit kullanıma dayalı yakıt pili teknolojisinin Türkiye'de kademeli olarak diğer araç teknolojilerini de kapsayacak şekilde genişletilmesi durumunda tasarruf oranının;

$$\begin{array}{rcl} 13.462.000.000 \$ & & \%67 \\ 10.366.000.000 \$ & & x \end{array}$$

X= %52'den $[(\%52 / \%67) * 100]$ 'den %78'e çıkma potansiyeli bulunmaktadır. Yani Türkiye'nin bor enerji teknolojilerine entegre olması, buna yönelik olarak kapasite ve üretim yapılarını arttırması, arz yapısını iç piyasa lehine olacak şekilde ve sektörel yapının da enerji üretiminin yoğun olacağı enerji sektörünü kapsayacak şekilde genişletilmesi durumunda daha yüksek bir katma değer sağlayabilme potansiyeli bulunmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya genelinde birincil derecede kullanımda olan fosil enerji kaynaklarının gerek mevcut rezerv ömürleri gerekse de karbon emisyonlarına sebebiyet vermeleri dolayısıyla gittikçe önemini kaybetmeye başladıkları görülmektedir. Özellikle fosil enerji kaynaklarına yönelik 2000-2040 arası dönemdeki bölgesel talep yapıları incelendiğinde bu durum açıkça anlaşılmaktadır. Bu dönem içerisindeki bölgesel fosil enerji talepleri 2000-2018 ve 2018-2040 arası dönemler ayrı ayrı incelendiğinde 2000-2018 arası döneme kıyasla 2018-2040 arası dönemde bölgesel bazdaki fosil enerji taleplerinin artış hızları yavaşlarken talep azalışlarının da daha da derinleşeceği, bunların neticesinde de küresel fosil enerji talebinin küresel birincil enerji talebi içerisinde 2018 yılında %85 olan payının 2040 yılına kadar %74'ler seviyesine kadar düşeceği öngörülmektedir.

Küresel fosil enerji kaynaklarında ilerleyen dönemlerde meydana gelmesi beklenen bu denli değişimler karşısında dünya devletleri ihtiyacı olan enerjiyi alternatif kaynaklardan temin etme çabası içerisinde girmiş, yapılan araştırmalar ve çalışmalar neticesinde de çok sayıda alternatif enerji kaynakları tespit edilmiştir. Bunların başlıcaları; yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen, nükleer füzyon enerjisi ve bor olarak ön plana çıkmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları ve buna bağlı enerji teknolojileri, gerek kaynağının kıt olmayışı gerekse de karbon emisyonu üretmemesi nedeniyle temiz bir enerji kaynağı olarak dünya gelinde gelişim içerisinde olan bir enerji kaynağı olma hüviyetindedir. Özellikle bu enerji kaynakları içerisinde güneş pili ve rüzgar türbini teknolojilerine küresel ölçekte önemli derecede yatırımlar yapılabilmekte ve bu sayede kullanımı her geçen gün yaygınlaşabilmektedir. Fosil enerji kaynaklarında olduğu gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının da 2000-2040 arası dönemdeki bölgesel talep yapıları incelendiğinde küresel ölçekte öneminin artmaya başladığı daha net bir şekilde görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik bölgesel talep yapıları incelendiğinde 2000-2018 arası döneme kıyasla 2018-2040 arası dönemde hiçbir bölgede talep azalışı gözlenmezken talep artış hızlarının da genel olarak sürekli artmakta olduğu gözlenmiştir. Bunların neticesinde de yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel birincil enerji talebi içerisinde 2000 yılında %8 ve 2018 yılında %11 olan paylarının 2040 yılına kadar %20 seviyelerine kadar yükseleceği öngörülmüştür.

Ancak yenilenebilir enerji kaynakları ve buna bağılı enerji teknolojileri küresel ölçekte gelişim içerisinde olmasına karşın bu kaynaklara yönelik iki türden tehlike mevcuttur. Bunların ilki, kapasite kullanım oranların düşüklüğü ikincisi ise, kaynaklarının meteorolojik kökenli oluşudur. Kapasite kullanım oranlarının düşüklüğü, birim enerji eldesinde diğeri enerji kaynaklarına göre daha fazla enerji girdisi gerektirirken meteorolojik kökenli oluşu, enerji üretimlerinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Ayrıca gelecek yıllarda küresel ısınmanın dünya genelinde ciddi boyutlara ulaşması durumunda enerji üretim verimliliklerini de negatif yönde etkileme potansiyeli bulunmaktadır.

Küresel ölçekte yenilenebilir enerji kaynakları haricinde diğeri gelişim içerisinde olan enerji ve teknolojileri ise hidrojen, nükleer füzyon ve bor'dur. Hidrojen enerjisi, yakıt pilleri aracılığıyla elektriksel güç oluşturarak otomobillerde yakıt ve konutlarda da ısınmada amaçlı olarak kullanılabilir. Özellikle yakıt olarak kullanımı konusunda günümüzdeki mevcut yakıtlara kıyasla enerji değeri, oktan sayısı, hava fazlalık katsayısı vb. değerler bakımından üstündür. Bununla birlikte gerek motor performansının yüksek oluşu ve karbon emisyonu yaratmaması hidrojen yakıtının diğeri üstün özellikleridir. Hidrojenin bu üstün özellikleri küresel otomobil üreticilerinde de dikkatini çekerek yakıt olarak hidrojeni kullanan araçların piyasaya çıkmasına zemin oluşturmuştur. Günümüzde Toyota'nın Mirai, Mercedes-Benz'in GLC ve Hyundai'nin Nexo marka otomobilleri hidrojen enerji teknolojisiyle çalışmaktadır.

Ancak bu otomobiller günümüzde sınırlı sayıdadır. Bunun nedeni, küresel ölçekteki yakıt maliyetlerinin yüksek oluşudur. Fakat 2020 yılında küresel ölçekte KW başına 60 \$ olan yakıt pili maliyetlerinin 2050 yılına kadar KW başına 30 \$ seviyelerine kadar düşeceğinin beklenmesi km başına yakıt tüketim maliyetlerini de önemli ölçüde düşürerek (2050 yılına kadar hidrojen yakıtlı araçlar, içten yanmalı ve elektrikli araçlara kıyasla km başına en ucuz yakıt tüketimine sahip olacaklar) hidrojen yakıtlı araçların küresel ölçekte kullanımlarını da arttıracaktır. Bu doğrultuda 2018 yılında dünya genelinde 376 adet olan hidrojen yakıt ikmal istasyonu sayısının 2040 yılına kadar 8.476 adete, hidrojen yakıtlı araç sayısında 12.952 adetten 22,4 milyon adete çıkması beklenmektedir.

Nükleer füzyon, nükleer enerjiye dayalı yeni nesil elektrik üretim yöntemlerinden biridir. Ancak dünya genelinde şuan için deneme aşamasında olan teknolojidir. Fakat ilerleyen yıllar için oldukça umut vericidir. Nükleer füzyona dayalı elektrik üretimi, uranyum, toryum vb. yakıt kullanan nükleer fisyonun aksine radyoaktivite salınımını oldukça düşürmektedir hatta bazı reaksiyonları (D-He3 ve P-B11) hiç radyoaktivite üretmemektedir. Bu durum, füzyon teknolojilerinin şehir merkezlerinde kurulabilmelerine olanak sağlayarak elektriğin üretim alanlarından nihai tüketim alanlarına doğru taşınması sırasında meydana gelen elektriksel iletim-dağıtım kayıplarının önüne geçerek enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte birim çıktı başına enerji üretim verimlilikleri de yine nükleer fisyonla kıyasla oldukça yüksektir. Nükleer füzyon, yakıt olarak hidrojen ve bor izotoplarını yakmaktadır.

Bor ise, enerji kaynağı olarak tek başlarına kullanılabildiği gibi geleceğin enerji kaynakları arasında gösterilen hidrojen ve nükleer füzyon üretimine de olanak tanımaktadır. Hidrojen üretim yönteminde bir bor ürünü olarak kullanılan sodyum borhidrit (NaBH_4) molar bazda diğer hidrojen üretim yöntemlerine göre oldukça avantajlıdır. Sodyum borhidrit hidrojen üretim reaksiyonunda girdi olarak kullanılan 1 mol değerinde sodyum borhidrite karşılık çıktı olarak 4 mol değerinde hidrojen üretimi gerçekleşirken bu değer diğer hidrojen üretim yöntemlerine göre minimum düzeyde 1,30 kat daha fazla olabilmektedir. Ayrıca reaksiyon sonucunda yan ürün olarak açığa çıkan sodyum metaborat (NaBO_2) tekrardan geri dönüştürüldüğünde hidrojen üretim verimliliği daha fazla artabilmektedir. Bunun yanında sodyum borhidrit, ağırlıkça %10,94 oranında hidrojeni depolayabilmektedir. Bu da yakıt olarak hidrojeni kullanan araç teknolojileri için oldukça yeterli düzeydedir (Toyota Mirai ağırlıkça %5,7 oranında hidrojeni depolayabilmektedir).

Nükleer füzyon reaksiyonunda bor yakıtı olarak bor-11 izotopu kullanılmaktadır. Yakıt olarak bor-11'i kullanan nükleer füzyon reaksiyonu diğer füzyon reaksiyonlarına (D-D(1), D-D(2) ve D-T) kıyasla herhangi bir radyasyona sebebiyet vermemektedir. Bununla

birlikte reaksiyon sonucunda birim başına açığa çıkan enerji diğer füzyon reaksiyonlarına (D-He3 hariç) göre minimum düzeyde 2,46 kat daha yüksektir.

Dünya enerji kaynaklarının genel itibariyle değerlendirmesi bu şekilde olmakla birlikte Türkiye'nin mevcut enerji görünümüne bakıldığında Türkiye, birincil derecede kullandığı fosil enerji kaynaklarına yüksek derecede bağımlı bir ülkedir. Bu enerji kaynaklarından 2018 yılı itibariyle petrole %95, doğal gaza %99,5 ve kömüre de %60 oranında bağımlıdır. Türkiye'nin fosil enerji kaynaklarına olan bu denli bağımlılığı beraberinde enerji açığına o da dış açığın artmasına sebebiyet vermektedir. Türkiye'nin 2018 yılı itibariyle mevcut enerji açığı toplam ürün ticareti açığının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. 2000-2018 arası dönemde de bu oran ortalama %24'ler seviyesindedir. Enerji açığının büyük bir bölümü ise petrol ithalatından kaynaklanmaktadır. Buna göre 2018 yılı itibariyle Türkiye'nin toplam petrol ithalatı toplam enerji ithalatının %67'sini oluşturmuştur. Bu petrol ithalatının ise, %77'si taşımacılık sektöründe kullanılmıştır.

Bunların yanında Türkiye, mevcut elektrik üretimlerinin de önemli bir bölümünü ithal enerji kaynaklarından elde etmektedir. Yine 2018 yılı itibariyle ithal kaynakların Türkiye'nin elektrik üretimindeki payı %51 olarak gerçekleşmiştir. 2000-2018 arası dönemde ise bu durum ortalama %55 ithal %45 yerli kaynaklar şeklinde oluşmuştur. Ayrıca bu kaynaklardan üretilen elektriğin yine önemli bir kısmı iletim-dağıtım kayıpları nedeniyle yok olmuştur. Bu şekilde 2018 yılına üretilmiş olan 305 TWh değerindeki toplam elektriğin %12'si yok olmuştur. Bu konudaki daha dikkat çekici bir nokta 2018 yılından geriye dönük 10 yıl içerisindeki Türkiye'deki toplam iletim-dağıtım kayıplarının 2018 yılındaki toplam elektrik üretim değerine ulaşmış olmasıdır.

Türkiye'nin bu mevcut enerji görünümü doğrultusunda bor mineralleri, Türkiye'nin ihtiyacı olduğu enerji temininde önemli bir potansiyel teşkil etmektedir. Türkiye, küresel bor rezervlerinin %73'ünün elinde bulundurmaktadır ve mevcut bor rezervlerinin rezerv/üretim ilişkisiyle 389 yıl ömrü bulunmaktadır. Bu bakımdan bor kaynağı Türkiye'nin karşısında enerji temininde önemli bir fırsat olarak durmaktadır.

Bu çalışmada, tüm bu değerlendirmeler ışığında bor minerallerinin Türkiye açısından alternatif bir enerji kaynağı olarak uygulanabilirliği ve sürdürülebilir bir kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda çalışma, literatürdeki bilgilerden de beslenmek suretiyle literatürden farklı olarak derinlemesine analizi içermektedir. Bu analize ilişkin çalışmada, 2002-2019 arası dönemde Millennium Cell firmasına, ITER'e, Akkuyu Nükleer Güç Santrali'ne ve Türkiye'deki araç sayılarına ve yakıt maliyetlerine, bor üretim, tüketim ve ihracatlarına, elektrik üretim ve iletim-dağıtım, enerji ithalatına ilişkin verileri kullanılmıştır. Bu veriler ışığında öncelikle Türkiye'de sodyum borhidritin otomobillerde yakıt olarak kullanılabilirliğine ilişkin diğer yakıtlara kıyasla rekabetçi olma durumu analiz edilmiştir. Yapılan analiz neticesinde çözelti halinde kullanılacak olan sodyum borhidrit yakıtının Türkiye piyasası açısından diğer yakıtlarla rekabetçi bir yapıda olduğu sonucunda ulaşılmıştır. Nükleer füzyona dayalı elektrik üretimine yönelik analizde ise, Türkiye'nin yakıt olarak bor-11 izopunun kullanıldığı nükleer füzyona dayalı elektrik üretim teknolojisine geçmesi durumunda 2019 elektrik üretim verileriyle %4'ünü karşılayabilme potansiyeli bulunmaktadır. Bunun yanında elektrik iletim-dağıtım kayıplarını, nükleer füzyon reaktörlerinin kullanımında sıfırlama magnezyum diborite bağlı süperiletken tellerin kullanılması durumunda ise ortalama 30 TWh olan kayıpların 3 TWh dolaylarına kadar düşürülmesi mümkün görülmektedir.

Bu türden durumların gerçekleşebilmesi için Türkiye açısından öncelikli olarak 3 türden öncülün yerine getirilmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki, Türkiye'nin mevcut bor üretim kapasitesinin ve bor üretimlerinin iç piyasaya yönelik arttırılması gerekmektedir. Türkiye'de sodyum borhidritin öncelikli olarak enerjinin büyük bir kısmını tüketen otomobil sektörlerinde kullanılması durumunda Türkiye'nin mevcut bor üretim kapasitesinin Türkiye'deki 2018 ve 2019 yılına ait araç verilerinden hareketle toplamda 2,03 kat arttırılması, bor üretimlerinin de yine 2018 yılına ait araç verilerinden hareketle toplamda 1,8 kat, 2019 yılı araç verilerinden hareketle toplamda 2,4 kat arttırılması ve bunun da sürdürülebilir bir şekilde devam ettirilebilmesi için de yıllık araç sayılarında meydana gelecek artış oranında güncellenmesi gerekmektedir. Tabi bu durum sodyum borhidritin yalnızca otomobillerde kullanımı için geçerli olabilecek kapasite ve üretim verileridir. Sodyum borhidrit kullanımının diğer araçları kapsayacak genişletilmesi, bor-

11'in nükleer füzyon ve magnezyum diboritin süperiletken olarak kullanılması durumunda bu verilerin çok daha üstünde bor kapasiteleri ve üretimleri gerekecektir.

İkinci olarak, Türkiye'nin halihazırdaki bor arz yapısı (tüketim+İhracat) borun Türkiye açısından enerji teknolojilerinde kullanımı için uygun değildir. Türkiye'deki mevcut bor ürünlerinin ortalama %3'ü iç piyasa tarafından tüketilirken %97'si de ihraç edilmektedir. Türkiye, bor ürünlerine yönelik arz yapısını bu şekilde sürdürmesi durumunda 2018 yılı verileriyle hesaplanmış olan toplam bor arzının 165 milyon ton ve 2019 yılı verileriyle de 167 milyon ton olması gerekmektedir. Bu durumda Türkiye'de toplam arz miktarını 2018 yılı toplam arz verileriyle 65 kat, 2019 yılı toplam arz verileriyle de 77 kat arttırılması gerekmektedir. Bu artış miktarlarının yakalanabilmesi Türkiye açısından orta ve uzun vadede mümkün gözükmemektedir. Çünkü Türkiye'nin 2006-2019 arası dönemde bor ürünleri üretimleri toplamda sadece 2 kat artmıştır. Buna göre bu artış miktarlarının yakalanabilmesi için bu üretim hızında 422 ila 500 yıla gereksinim duyulmaktadır. Oysaki Türkiye'nin bora yönelik toplam arz yapısının %50 - %50 olarak iç piyasa lehine genişletilmesi durumunda ihtiyaç duyulacak toplam bor arz miktarı 2018 yılı verileriyle 9,9 milyon ton bor ve 2019 yılı verileriyle 10 milyon ton bordur. Bu toplam arz yapısı, bir önceki toplam arz yapısına (%3 - %97) göre orta ve uzun vadede daha ulaşılabilir düzeydedir. Çünkü bu şekilde toplam arz miktarının 2018 yılı verileriyle 4 kat, 2019 yılı verileriyle de 5 kat arttırılması gerekecektir. Bu da, Türkiye'nin mevcut bor üretim hızında 26 ila 32 yıllık bir süreye tekabül etmektedir.

Son olarak diğer bir analiz de Türkiye'nin mevcut AR-Ge yapısına yöneliktir. Türkiye'nin 2002-2018 yılları arasındaki toplam AR-Ge harcamalarına bakıldığında 2014 yılına kadar artan AR-Ge harcamalarının 2014 yılından sonra durağan bir yapıya kavuşmuş hatta 2018 yılında toplamda %1,1 oranında azalmıştır. Yine bu dönem içerisinde toplam AR-Ge harcamalarının sektörel dağılımlarına bakıldığında bor enerji teknolojilerinin gelişimine olanak sağlayabilecek olan madencilik, kimya ve enerji sektörlerinin, toplam AR-Ge harcamaları içerisindeki paylarının son derece düşük kaldığı görülmüştür. Türkiye'nin bor minerallerini ve buna bağlı enerji teknolojilerini yüksek katma değer yaratacak şekilde kullanabilmesi için hem bu sektörlerin hem de Türkiye'nin toplam AR-Ge harcamalarının arttırılması gerekmektedir.

Türkiye'nin bor enerjisine yönelik analizini yapmış olduğumuz bu öncülleri gerçekleştirmesi durumunda toplamda %67 olan petrol ithalatının toplam enerji ithalatı içerisindeki payının %58'lik kısmını karşılayabilme potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte petrol ikamesinden kaynaklanması muhtemel 5,5 milyar \$'lık tasarruf, Türkiye'nin küresel piyasalardan bor ürünleri ihracına dayalı en çok gelirin elde edildiği 2018 yılındaki değerden tam 5,5 kat daha fazladır. Bu açıdan bakıldığında borun dış piyasaya ihracından çok iç tüketimde kullanılması durumunda daha yüksek katma değer elde edilebilme şansı mümkün gözükmektedir.



KAYNAKÇA

- Abdullah, O.M. *Applied Energy in Intruduction*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. https://www.academia.edu/12336701/APPLIED_ENERGY_AN_INTRODUCTION
- Acarkan, N. “Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları”. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. K. Eraslan. 2/1-5. Kütahya: TMMOB Maden Mühendisler Odası, 2002. https://www.researchgate.net/publication/265895046_Bor_Urun_Cesitleri_ve_Kullanim_Alanlari_Boron_Products_and_Their_Uses
- Acaroğlu, M. *Alternatif Enerji Kaynakları*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2003.
- AFAD, Afet Acil Durum ve Yönetimi Başkanlığı. “Kimyasal Biyolojik Radyolojik Nükleer Tehditler (KBRN): Fukushima Daiichi Nükleer Santral Kazası”. Erişim 5 Ağustos 2020. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/fukushima-daiichi-nukleer-santral-kazasi>
- AFAD, Afet Acil Durum ve Yönetimi Başkanlığı. “Kimyasal Biyolojik Radyolojik Nükleer Tehditler (KBRN): Radyasyon Dozları ve Etkileri”. Erişim 6 Ağustos 2020. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-dozlari-ve-etkileri>
- Akar, E. vd. “Evsel Mikro Kojenerasyon Uygulamaları ile Enerji Verimliliğinin Arttırılması”. *2. Enerji Verimliliği Kongresi Bildiriler Kitabı*. 109-123. Ankara: TMMOB, 2009. https://enerji.mmo.org.tr/wpcontent/uploads/2018/05/2.Enerji_VerimliliğiBildKitabi_2009.compressed.pdf#page=102
- Akimitsu, J. vd. “Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride”. *Nature* 410 (2001), 63-64. DOI: [10.1038 / 35065039](https://doi.org/10.1038/35065039)
- Akkuyu NGS. “Proje Hakkında”. Erişim 15 Ekim 2020. <http://www.akkuyu.com/index.php>
- Amendola, S.C. vd. “An Ultrasafe Hydrogen Generator: Aqueous, Alkaline Borohydride Solutions and Ru Catalyst”. *Journal of Power Sources* 85/2 (2000), 186-189. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00301-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00301-8)
- Amendola, S.C. vd. *Processes for Synthesizing Borohydride Compounds*. Patent. United States Patent Office, No. US 6,670,444 B2, Tarih 30 Aralık 2003. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d7/fc/ad/9837cbb0ad16de/US6670444.pdf>
- Andersson, J. - Grönkvist, S. “Large-Scale Storage of Hydrogen”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 44/23 (2019), 11901-11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri. “Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri 8”. Erişim 20 Haziran 2020. <https://acikders.ankara.edu.tr/course/view.php?id=926>

- Ankara Üniversitesi Süperiletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi. “Düşük Sıcaklık (LTS) Malzemeler. Erişim 8 Aralık 2020. <http://cesur.ankara.edu.tr/superiletkenlik-hakkinda/superiletkenmalzemeler/dusuk-sicaklik-superiletken-lts-malzemeler/>
- Artkm, F. “The Renewable Energy Sources and Technologies of Potential in Turkey”. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)* 4 (2018), 285-295. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/598411>
- Ashby, E.C. – Foster, W.C. “A New and Convenient Route to the Amine-Boranes”. *Journal of the American Chemical Society*. 84/17 (1962), 3407-3408. <https://doi.org/10.1021/ja00876a040>
- Bayraç, H.N. “Uluslararası Doğalgaz Piyasasının Ekonomik Yapısı ve Uygulanan Politikalar”. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi* 13/3 (2018), 13-36. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/608664>
- Bayrak, D. vd. *Özelleştirmenin Odağındaki Bor Raporu*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2010. http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/f4065d8aeed6955_ek.pdf
- Bell, M.G. “The Tokamak Fusion Test”. *Reactor Magnetic Fusion Energy: From Experiments to Power Plants*. ed. George H. Neilson. 119-166. Oxford: Woodhead Publishing, 2016. <http://library.lol/main/DB7ACF7F8AFDB0E3B03732CD52FE25C6>
- Bergasse, E. vd. *Case Network Reports: The Relationship Between Energy and Economic and Social Development in the Southern Mediterranean*. CASE, 2013. https://case-research.eu/sites/default/files/publications/CNR_2013_112.pdf
- Berger, A. vd. “Comparison of the Efficiency of Superconducting and Conventional Transformers”. *Journal of Physics: Conference Series* 234 (2010), 1-8. DOI: [10.1088 / 1742-6596 / 234/3/032004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/234/3/032004)
- Bilginoğlu, M.A. “Gelişmekte Olan Ülkelerde Enerji Sorunu ve Alternatif Enerji Politikaları”. *Eskişehir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi* 9 (1991), 122-147. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/515908>
- Bilici, M.S.U. “Sodyum Borhidrür Üretim Yöntemleri”. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. Hüseyin Özdağ vd. 119-125. Ankara: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2004. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/5203ae86f2de266_ek.pdf
- Bioenergy Europe. *Statistical Report 2019: Report Biomass Supply*. Brussels, 2019. https://platformduurzamebiobrandstoffen.nl/wpcontent/uploads/2020/04/2019_Bioenergy-Europe_Biomass-Supply-2019_Statistical-Report.pdf
- Bloomberght, Erişim 17 Kasım 2020. <https://www.bloomberght.com/>
- Boren Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü. Erişim 12 Ekim 2020. <https://www.boren.gov.tr/>

- BOTAŞ, Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. “Doğal Gaz ve Petrol Boru Hatları Haritası”. Erişim 4 Ekim 2020. <https://www.botas.gov.tr/Sayfa/dogal-gaz-ve-petrol-boru-hatlari-haritasi/168>
- Boylu, F. - Karaağaçlıoğlu, İ.E. “Kömür Bileşenlerinin Kalorifik Değer Üzerindeki Etkisi Üzerine Değerlendirme”. *Yer Bilimleri* 38/3 (2018), 221-236. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/609430>
- BP, British Petroleum. *Statistical Review of World Energy 2019*. London: BP P.L.C., 2019. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- BP, British Petroleum. *Dünya Enerjisinin İstatistiksel İncelemesi: Genel Bakış Belgeleri* (25 Eylül 2020). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>
- Breeze, P. *Power Generation Technologies*. Oxford: Elsevier - Newnes. Publication, First Published, 2005. <http://library.lol/main/9655327F7C7C42C46D484A5062CB08E5>
- Bronaugh H. J. *Preparation Alkali-Metal Borohydrides*. Patent. United States Patent Office, No. 2,880,058, Tarih 31 Mart 1959.
- Brown, G.C. – Skipsey, E. (ed.). *Energy Sources: Geology, Supply and Demand*. Milton Keynes – Philadelphia: Open University Press, Birinci Basım, 1986.
- Browning, D. J. vd. “Studies into the Storage of Hydrogen in Carbon Nanofibers: Proposal of A Possible Reaction Mechanism”. *Nano Letters* 2/3 (2002), 201-205. <https://doi.org/10.1021/nl015576g>
- Bud’ko, S.L. – Canfield, P.C. “Superconductivity of Magnesium Diboride”. *Pyhsica C: Superconductivity and Its Applications*. ed. V.V. Moshchalkov vd. 514/142-151. Iowa: Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2015.02.024>
- Bulundu, H. – Say, S.S. (ed.). *Genel Doğal Gaz*. İstanbul: UGETAM Yayınları, 2016. https://www.ugetam.istanbul/wpcontent/uploads/2017/05/59genel_dogalgaz_maket_2016.pdf
- Bulut, C. vd. “Enerji Kullanımı ve Ekonomik Büyüme İlişkilerinin Teori ve Ekonomi Politikaları Açısından Değerlendirilmesi”. *III. International Scientific Conference of Young Researchers*. 1-11. Azerbaycan: Qafqaz University, 2015. https://www.researchgate.net/publication/262047631_ENERJI_KULLANIMI_VE_EKONOMIK_BUYUME_ILISKILERININ_TEORI_VE_EKONOMI_POLITIKALARI_ACISINDAN_DEGERLENDIRILMESI_ENERGY_CONSUM
- Buluttekin, M.B. “Bor Madeni Ekonomisi: Türkiye’nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri”. *2. Ulusal İktisat Kongresi*. ed. Recep Kök. 1-36. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, 2010. https://debis.deu.edu.tr/userweb/iibf_kongre/dosyalar/buluttekin.pdf

- Campos, M.D. "Formulation of Alternative Cement Matrix for Solidification/Stabilization of Nuclear Waste". *Generation-4 International Forum*. 2019. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/201906/alternativecementmatrixstabilizationnuclearwaste_final_2019may22.pdf
- CASHIPS, China Academy of Science Hefei Institutes of Physcial Science. "EAST-Experimental Advanced Superconducting Tokamak". Erişim 17 Ağustos 2020. http://english.hf.cas.cn/new/r/Programs/201605/t20160513_163028.html
- CASHIPS, China Academy of Science Hefei Institutes of Physcial Science. "EAST (HT-7U Super Conducting Tokamak)". Erişim 18 Ağustos 2020. <http://english.hf.cas.cn/ic/ip/east/>
- CASHIPS, China Academy of Science Hefei Institutes of Physcial Science. "How Hot is the Chinese Artificial Sun?". Erişim 19 Ağustos 2020. http://english.hf.cas.cn/new/news/r n/201811/t20181113_201186.html
- Cassa-Lillo, M. A. C. vd. "Hydrogen Storage in Activated Carbons and Activated Carbon Fibers". *Journal of Physical Chemistry B* 106/42 (2002), 10930-10934. <https://doi.org/10.1021/jp014543m>
- CCFE, Culham Center for Fusion Energy. "Image Galery". Erişim 12 Ağustos 2020. <https://ccfe.ukaea.uk/resources/#gallery>
- CCFE, Culham Center for Fusion Energy. "JET is the World's Largest and Most Advanced Tokamak". Erişim 15 Ağustos 2020. <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus/>
- Chahine, R. - Bose, T.K. "Low-Pressure Adsorption Storage of Hydrogen". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 19/2 (1994), 161-164. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90121-X](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90121-X)
- Chambers, A. vd. (1998). "Hydrogen Storage in Graphite Nanofibers". *Journal of Physical Chemistry B* 102/22 (1998), 4253-4256. <https://doi.org/10.1021/jp980114l>
- Chen, P. vd. "High H₂ Uptake by Alkali-Doped Carbon Nanotubes Under Ambient Pressure and Moderate Temperatures". *Science* 285/5424 (1999), 91-92. DOI: 10.1126 / science.285.5424.91
- CHINA.ORG.CN. "China's New Thermonuclear Fusion Reactor Test Successful". Erişim 16 Ağustos 2020. <http://www.china.org.cn/english/2006/Sep/182561.htm>
- Cooper, H.B.H. *Production of Akali Metal, Borohydrides*. Patent. United States Patent Office, No. 3,473,899, Tarih 21 Ekim 1969. <https://patentimages.storage.googleapis.com/97/18/85/190399b7511b81/US3473899.pdf>
- Cooper, H.B.H. *Electrolytic Process for the Production of Alkali Metal Borohydrides*. Patent. United States Patent Office, No. 3,734,842, Tarih 22 Mayıs 1973. <https://patentimages.storage.googleapis.com/cc/76/db/5e3b66171dcff4/US3734842.pdf>

- Cowan, G. “Boron: A better energy carrier than hydrogen?”. Erişim 10 Aralık 2020. http://www.eagle.ca/~gcowan/boron_blast.html#AV
- Çakar, M.C. vd. “Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Ulaşım Sistemlerinde Kullanım Uygulaması”. 5. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*. 237-242. Diyarbakır: EMO Yayınları, 2009. https://www.emo.org.tr/ekler/c85deffa0b8b7a7_ek.pdf
- Çalışkan, M. vd. “Ankara Anakent Belediyesi’ne Ait Toplu Taşıma Otobüslerinde Biyomotorin Kullanım İmkanlarının Araştırılması”. 5. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. ed. Zekai Şen vd. 2/575-586. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 2004.
- Çalışkan, M. *Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyeli ve Mevcut Yatırımlar*. TUCSA, 2011. <https://tucsa.org/images/yayinlar/sunumlar/MUSTAFA-CALISKAN.pdf>
- Çetinkaya, M. - Karaosmanoğlu, F. “Türkiye Enerji Profili ve Hidrojen”. 2. *Ulusal Hidrojen Kongresi*. ed. Filiz Karaosmanoğlu vd. 25-40. Ankara: Hidrojen Enerjisi Forumu Yayınları, 2003.
- Çetinkaya, M. - Karaosmanoğlu, F. “Biyogaz, Türkiye ve Seçenekler”. 5. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. ed. Zekai Şen vd. 2/627-644. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 2004.
- Çınkı, M. “Petrolden Bor’a”. *Metalürji Dergisi* 130 (2002), 25-35. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi130/d130_2534.pdf
- Daimler. “Mercedes-Benz GLC F-CELL. Special Hybrid with Fuel Cell”. Erişim 23 Temmuz 2020. <https://www.daimler.com/products/passenger-cars/mercedes-benz/glc-f-cell.html>
- Das, D. vd. “Recent Developments in Biological Hydrogen Production Processes”. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 14/2 (2008), 57-67. DOI: [10.2298 / CICEQ0802057D](https://doi.org/10.2298/CICEQ0802057D)
- Dayday, N. - Azaklıoğulları, M.Ü. “Nükleer Fisyon ve Füzyon Yöntemleri ile Hidrojen Üretimi”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 37-44. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Deviren, H. vd. “Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller ve Biyogazın Kullanım Alanları”. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi* 7/2/2 (2017), 79-89. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/390296>
- Dillon, A.C. “Storage of Hydrogen in Single-Walled Carbon Nanotubes”. *Nature* 386/6623 (1997), 377-379. <https://doi.org/10.1038/386377a0>
- Doğanay, H. *Ekonomik Coğrafya 2: Enerji Kaynakları*. Erzurum: Şafak Yayın Evi, 2. Basım, 1998.

- Doğanay, H. vd. *Coğrafya'ya Giriş 2: Genel Beşeri ve Ekonomik Coğrafya*. İstanbul: Aktif Yayın Evi, 2003.
- Dou, S.X. vd. "Mechanism of Enhancement in Electromagnetic Properties of MgB₂ by Nano SiC Doping". *Physical Review Letters* 98/9 (2007), 1-4. DOI: [10.1103 / PhysRevLett.98.097002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.097002)
- DPT, Devlet Planlama Teşkilatı. *Sekizinci Kalkınma Planı (2001-2005) Özel İhtisas Komisyonu Raporları: Madencilik Sanayi Hammaddeleri Kimya Bor Tuzları Trona*. Ankara: T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2001. https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2018/11/08_Madencilik_SanayiHammaddeleri_Kimya_BorTuzlar%C4%B1_Trona.pdf
- Dunn, S. "Hydrogen Futures: Toward A Sustainable Energy System". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 27/3 (2002), 235-264. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8)
- Ege, M. vd. "Hidrojen Enerjisiyle Çalışan Aracın Tasarımı ve İmalatı". 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 123-130. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Ehrlich, R. *Renewable Energy: A First Course*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. CRC Press. <http://library.lol/main/657F97FE7237199E3B89EDE9673175C4>
- EIA, U.S. Energy Information Administration. *Petroleum & Other Liquids Data* (Ekim 2020). <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>
- EİGM, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. "Güneş Enerji Potansiyel Atlası (GEPA)". Erişim: 10 Ekim 2020. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>
- EİGM, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. "Biyokütle Enerjisi Atlası (BEPA)". Erişim: 11 Ekim 2020. <https://bepa.enerji.gov.tr/>
- Elektrikport. "Dünya'nın En Büyük Kapasiteli 21 Barajı". Erişim 25 Haziran 2020. <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/dunyanin-en-buyuk-kapasiteli-21-baraji/21609#ad-image-0>
- Enerdata. "Global Energy Statistical Yearbook". Erişim 27 Haziran 2020. <https://yearbook.enerdata.net/>
- Enerji Atlası. *Rüzgardan Elektrik Üretim İstatistikleri* (11 Ekim 2020). <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/ruzgar>
- Enerji Atlası. "Jeotermal Enerji Santralleri". Erişim: 12 Ekim 2020. <https://www.enerjiatlası.com/jeotermal/>

- Enerji Atlası. “Hidroelektrik Santraller”. Erişim 13 Ekim 2020. <https://www.enerjiatlası.com/hidroelektrik/>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Petrol Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: EPDK, 2012. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Petrol Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: EPDK, 2013. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Petrol Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: EPDK, 2016. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Petrol Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: EPDK, 2017. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Doğalgaz Sektör Raporu 2018*. Ankara: EPDK, 2019a. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Petrol Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: EPDK, 2019b. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- Eraslan, K. – Karakoç, F. “Borlu Yakıt Sistemleri-1; Hidrojen Motorları ve Entegre Sistemleri”. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. K. Eraslan. 2/149-154. Kütahya: TMMOB Maden Mühendisler Odası, 2002a. https://d1wqt.xts1xzle7.cloudfront.net/48103314/Borlu_Yakit_Sistemleri1_Hidrojen_Motorl20160816-10072-1i1q0ju.pdf?1471390311=&response-contentdisposition=inline%3B+filename%3DBorlu_Yakit
- Eraslan, K. – Karakoç, F. “Borlu Yakıt Sistemleri-2; Bor Yakıtlı Motorlar”. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. K. Eraslan. 2/155-159. Kütahya: TMMOB Maden Mühendisler Odası, 2002b. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/0a32110ff0f26d_ek.pdf
- Eroğlu, F. - Özçelik, F. “Suyun Elektrolizinde Değişik Yöntemler Üzerine Çalışmalar ve Hidrojenin İtten Yanmalı Motorlarda Ek Yakıt Olarak Kullanılması”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 37-44. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Ersöz, Y. vd. “Development of an Active Platine-Based Catalyst for the Reaction of H₂ Production from NaBH₄”. *Chemical Engineering Journal* 134/1-3 (2007), 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.059>
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektör Raporu 2008*. Ankara: Eti Maden, 2009. <https://madencilikrehberi.files.wordpress.com/2012/03/bor-sektor-raporu-etimaden.pdf>

- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *2015-2019 Dönemi Stratejik Planı*. Ankara: Eti Maden, 2015. http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2018/05/Stratejik_plan_2015_2019.pdf
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektör Raporu 2016*. Ankara: Eti Maden, 2017. <http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2018/05/2016-Bor-Sektore%88r-Raporu.pdf>
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektör Raporu 2018*. Ankara: Eti Maden, 2019. http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2019/2018%20_Bor_Sektor_Raporu.pdf
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektör Raporu 2019*. Ankara: Eti Maden, 2020a. <http://www.etimaden.gov.tr/storage/2020/2019BORSEKTORRAPORU.pdf>
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Faaliyet Raporu 2019*. Ankara: Eti Maden, 2020b. <http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/sunumlar/2019-tr/index.html>
- Eti Maden. Erişim 10 Ekim 2020. <https://www.etimaden.gov.tr/>
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Mavi Kitap*. Ankara: ETKB Bağlı ve İlgili Kuruluşlar Dairesi Başkanlığı, 2016.
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. “Türkiye’nin Karadeniz’deki Keşfi 2020’de Denizlerdeki En Büyük Keşfi Oldu”. Erişim 3 Ekim 2020. <https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=697>
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. “Bilgi Merkezi”. Erişim: 10 Ekim 2020. <https://enerji.gov.tr/enerji>
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. “Sanayide Enerji Verimli Teknolojiler”. Erişim: 17 Ekim 2020. https://enerjiapi.etkb.gov.tr/Media/Dizin/EVCED/Belgeler/963109-sanayide_enerji_verimli_teknolojiler.pdf
- EUAŞ International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi. *Sinop Nükleer Güç Santrali Projesi ÇED Raporu*. Ankara: ASSYSTEM ENVY Enerji ve Çevre Yatırımları A.Ş., 2020. <http://eced.csb.gov.tr/ced/jsp/ek1/19811#>
- EUROfusion, European Fusion. *Fusion in Europe News and Views on the Progress of Fusion Research*. (2019). https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/Newsletters/EUROfusion%20Fusion%20in%20Europe/EUROfusion_Fusion_in_Europe_2019_Dec.pdf
- EUROfusion, European Fusion. “JET: EUROfusion's Flagship Device”. Erişim 15 Ağustos 2020. <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/>

- European Commission. *Hydrogen Energy And Fuel Cells: A Vision of Our Future*. Luxembourg: Official Publications of the European Communities, 2003. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/hlg_vision_report_en.pdf
- EUROSTAT, European Statistics Office. *Energy Statistics: Energy Imports Dependency* (26 Haziran 2020). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_50/default/table?lang=en
- EUROSTAT, European Statistics Office. *Energy Statistics: Finaly Energy Consumption By Sector* (10 Eylül 2020). <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00124&language=en>
- Fagan, A. *An Introduction to the Petroleum Industry*. Government of Newfoundland and Labrador Department of Mines and Energy, 1991. <https://www.gov.nl.ca/iet/files/publications-energy-intro.pdf>
- Finegold, M. - Trumper, R. “Categorizing Pupils' Explanatory Frameworks in Energy as A Means to the Development of A Teaching Approach”. *Research in Science Education* 19/1 (1989), 97-110. DOI:[10.1007 / BF02356850](https://doi.org/10.1007/BF02356850)
- Forsberg, C.W. “Hydrogen, Nuclear Energy, and the Advanced High-Temperature Reactor”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 28/10 (2003), 1073-1081. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00232-X](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00232-X)
- Fridleifsson, I. B. “Geothermal Energy For The Benefit of The People”. ed. Aoife M. Foley. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5/3 (2001), 299-312. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00002-8)
- Fusion for Energy. Erişim 23 Ağustos 2020. <https://fusionforenergy.europa.eu/>
- Garrett, D.E. *Borates: Handbook of Deposits, Proccessing, Properties and Use*. 1 Cilt. California: Academic Press, 1998. <http://library.lol/main/70F9946AE73D08CFF779A9D441F93CCE>
- Gencer, A. vd. *Çok Damarlı MgB2 Süperiletken Üretimi, Nano-boyutta Katkılama Yöntemi ile Özelliklerinin İyileştirilmesi ve Fiziksel Karakterizasyonu*. Ankara Üniversitesi, 2012. <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/41394>
- Ghali, H.K. - El- Sakka, M.I.T. “Energy Use and Output Growth in Canada: A Multivariate Cointegration Analysis”. *Energy Economics* 26/2 (2004), 225-238. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(03\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(03)00056-2)
- Gökçen, G. “Yerkürenin Bize Armağanı Jeotermal Enerji”. *Bilim ve Teknik Dergisi* 498 (2009), 46-49. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/edergi/yazi.pdf?DergiKodu=4&cilt=42&sayi=498&sayfa=46&yil=2009&ay=5&yaziid=27848>

- Green, R.K. - Glasson, N.D. "High-Pressure Hydrogen Injection For Internal Combustion Engines". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 17/11 (1992), 895-901. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(92\)90041-T](https://doi.org/10.1016/0360-3199(92)90041-T)
- Güner, S.B. "Effects of Silver Doping on Magnetic Levitation Performance of MgB₂ Superconductors". *Cryogenics* 108 (2020), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103061>
- Güyagüler, T. "Türkiye Bor Potansiyeli". 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. ed. Halil Köse vd. 18-27. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Yayınları, 2001. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/d34d468ac887633_ek.pdf
- Hansley V.L. vd. *Preparation of Sodium Borohydride*. Patent. United States Patent Office, No. 2,934,401, Tarih 26 Nisan 1960. <https://patentimages.storage.googleapis.com/2c/01/f1/ba41e1a0b457c2/US2934401.pdf>
- Hawryluk, R.J. vd. "Fusion Plasma Experiments on TFTR: A 20 Year Retrospective", *Physics of Plasmas*, 5/5 (1998), 1577-1589. <https://doi.org/10.1063/1.872825>
- Hayli, S. "Rüzgâr Enerjisinin Önemi, Dünya'da ve Türkiye'deki Durumu". *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 11/1 (2001), 1-26. https://www.researchgate.net/publication/321081958_RUZGAR_ENERJISININ_ONEMI_DUNYA'DA_VE_TURKIYE'DEKI_DURUMU_THE_IMPORTANCE_OF_WIND_ENERGY_THE_SITUATION_IN_THE_WORLD_ARND_TUKEY
- Helvacı, C. "Türkiye Borat Yataklarının Minerolojisi". *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 7/2 (1983), 37-54. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/285356>
- Helvacı, C. – Alonso, R.N. "Borate Deposits of Turkey and Argentina; A Summary and Geological Comparison". *Turkish Journal of Earth Sciences* 9 (2000), 1-27. https://www.researchgate.net/publication/326250824_Borate_Deposits_of_Turkey_and_Argentina_A_Summary_and_Geological_Comparison
- Helvacı, C. "Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası". 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. ed. Ali Akar – Abdullah Seyrankaya. 11-27. İzmir: TMMOB Maden Mühendisleri Odası/Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 2004. http://kisi.deu.edu.tr/cahit.Helvaci/Bo_r.pdf
- Helvacı, C. "Geological Features of Neogene Basins Hosting Borate Deposits: An Overview of Deposits and Future Forecast, Turkey". *Bulletin of The Mineral Research And Exploration* 151 (2015), 169-215. https://dergi.mta.gov.tr/dosyalar/images/mtadergi/makaleler/eng/20151218231716_167_84b4fba.pdf
- Helvacı, C. "Borate Deposits: An Overview and Future Forecast with Regard to Mineral Deposits". *Bor Dergisi* 2/2 (2017), 59-70. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/boron/issue/31236/302668>

- Hirscher, H. vd. "Hydrogen Storage in Carbon Nanostructures". *Journal of Alloys and Compounds* 330-332 (2002), 654-658. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01643-7](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01643-7)
- Hydrogen Council. *How Hydrogen Empowers The Energy Transition*, Belgium: Hydrogen Council, 2017a. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>
- Hydrogen Council. *Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway For The Global Energy Transition*. Brussels: Hydrogen Council, 2017b. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/HydrogenScalingup_HydrogenCouncil_2017_compressed.pdf
- Hydrogen Council. *Hydrogen Meets Digital: New Opportunities For The Energy and Mobility System*. Brussels: Hydrogen Council, 2018. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2018/10/Hydrogen-Council-Hydrogen-Meets-Digital2018.pdf>
- Hydrogen Council. *Path To Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective*. Brussels: Hydrogen Council, 2020. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- Hyundai. "Nexo". Erişim 27 Temmuz 2020. <https://www.hyundai.com/worldwide/en/europe/nexo/technology>
- IAEA, International Atomic Energy Agency. *Nuclear Power Reactors in the World*. Vienna: IAEA, 2019. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf
- IEA, International Energy Agency. *Global Trends And Outlook For Hydrogen*. Paris: IEA Publication, 2017. <https://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen-Dec2017-WEB.aspx>
- IEA. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2018*. France: IEA Publications, 2018. <https://webstore.iea.org/download/direct/2375>
- IEA, International Energy Agency. *Future of Hydrogen*. Paris: IEA Publication, 2019. <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>
- IEA, International Energy Agency, "Countries". Erişim 17 Haziran 2020. <https://www.iea.org/countries>
- IEA, International Energy Agency. "Fuels & Technologies". Erişim 22 Şubat 2020. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- Ikegami, M. vd. "A Study of Hydrogen Fuelled Compression Ignition Engines". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 7/4 (1982), 341-353. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90127-6](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90127-6)

- İlgar, R. “Ekolojik Bakışla Jeotermal Kaynaklara Dualist Yaklaşım”. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi* 4/13 (2005), 88-98. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/esosder/issue/6127/82183>
- IPP, Max Planck Institute for Plasma Physics. Erişim 19 Ağustos 2020. <https://www.ipp.mpg.de/>
- IRENA, International Renewable Energy Agency. *Hydrogen From Renewable Power: Technology Outlook For The Energy Transition*. Abu Dhabi, 2018. <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>
- IRENA, International Renewable Energy Agency. *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects*. Abu Dhabi, 2019a. <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>
- IRENA, International Renewable Energy Agency. *Future of Wind Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects*. Abu Dhabi, 2019b. <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>
- IRENA, “Statistic”. Erişim 2 Haziran 2020. <https://www.irena.org/statistics>
- IRENA, International Renewable Energy Agency. *Renewable Energy Statistic 2020*. Abu Dhabi, 2020. <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>
- ITER, International Termonuclear Experimental Reactor. Erişim 23 Ağustos 2020. <https://www.iter.org/>
- İlbaş, M. – Yılmaz, İ. “Farklı Isıl Güçlerdeki Kazanlarda Yanma ve Emisyon Davranışının Araştırılması”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 18/1-2 (2002), 17-22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesfen/issue/25604/270187>
- Jackson, C.B. *Production of Compounds Containing Boron and Hydrogen*. Patent. United States Patent Office, No. 2,744,810, Tarih 8 Mayıs 1956. <https://patentimages.storage.googleapis.com/82/1d/17/285f16dc430db8/US2744810.pdf>
- Jang, J.J. – Ahn, J.H. “Effect of Oxygen-Affinity Additives on the Superconducting Properties of Magnesium Diboride”. *Pyhsics Procedia: Proceedings of the 25th International Symposium on Superconductivity*. ed. Shin-Ichi Uchida - Keiichi Tanabe. 45/97-100. Tokyo: Elsevier, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.04.061>
- Jingding, L. vd. “Formation And Restraint of Toxic Emissions in Hydrogen-Gasoline Mixture Fueled Engines”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 23/10 (1998), 971-975. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00141-9)

- Jopek, A.G. vd. "Storage of Pure Hydrogen in Different States". *Hydrogen Storage Technologies: New Materials*. ed. Jopek, A.G. vd. 97-170. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. <http://library.lol/main/5E0982764E085DD9D85CC7DCEA057507>
- Joshi, A.S. vd. "Exergetic Assessment of Solar Hydrogen Production Methods". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 35/10 (2010), 4901-4908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.067>
- Juste, G. L. "Hydrogen Injection as Additional Fuel in Gasturbine Combustor. Evaluation of Effects". ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 31/14 (2006), 2112-2121. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.02.006>
- Kalafatoğlu, İ.E. – Örs, S.N. "21. Yüzyılda Bor Teknolojileri ve Uygulamaları". *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 5/1 (2003), 59-71. <http://fbed.balikesir.edu.tr/index.php/dergi/article/view/255/236>
- Karadağ, Ç. vd. "Boren - Tübitak Mam Bor ve Hidrojen Teknolojileri Yetkinlik Merkezi". 2. *Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi*. ed. İbrahim Dinçer vd. 1-4. İstanbul: Hidrojen Teknolojileri Derneği Yayınları, 2016. http://hidrojentechnoloji.org/UHTEK_2015_Tam_Metinler_Kitabi.pdf
- Kartal24. com. "Türkiye'nin İlk Hidrojen Dolum İstasyonu İstanbul'da Kuruldu". Erişim 15 Ekim 2020. <https://www.kartal24.com/2609-turkiyenin-ilk-hidrojen-yakit-dolum-istasyonu-istanbulda-kuruldu>
- Kaur, M. – Pal, K. "Review on Hydrogen Storage Materials and Methods from An Electrochemical Viewpoint". ed. Dirk Uwe Sauer. *Journal of Energy Storage* 23 (2019), 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.020>
- Kaya, M. – Devocioğlu, D. "Süperiletken Magnezyum Diborit (MgB₂) Üretim Teknolojileri ve Kullanım Alanları". 3. *Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. Tevfik Güyagüler vd. 419-426. Ankara: TMMOB – Eti Maden – BOREN, 2006. https://www.researchgate.net/publication/299630105_Super_Iletken_Magnezyum_Diborid_MgB2_Uretim_Teknolojileri_ve_Kullanim_Alanlari_Superconductor_Magnesium_Diboride_MgB2_Production_Technologies_and_Use_Areas
- Kembleton, R. "Nuclear fusion: What of the future?". *Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues*. ed. Trevor M. Letcher. 199-220. San Diego - Cambridge: Academic Press, 2019. <http://library.lol/main/0925FEB3B06CC3110C68D5DE6436EE94>
- Kembleton, R. "Nuclear Fusion". *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*. ed. Trevor M. Letcher. 543-560. Oxford: Elsevier, Third Edition, 2020. <http://library.lol/main/0718401F2BF8899A65A410A3B27E2C50>
- Kent, W.M. "The Definition of Energy". *Science* 43/1119 (1916), 820-821. DOI: 10.1126/science.43.1119.820

- Kistler, R.B. – Helvacı, C. “Boron and Borates”. *Industrial Minerals and Rocks* 6 (1994), 171-186. https://www.researchgate.net/profile/Cahit_Helva_ci/publication/283734522_BORON_AND_BORATES/links/56466a1008ae451880aa56bd.pdf
- Klinger, T. vd. “Performance and Properties of the First Plasmas of Wendelstein 7-X”. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 59/1 (2017), 1-8. DOI: [10.1088/0741-3335/59/1/014018](https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014018)
- Koç, E. – Kaya, K. “Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu”. *Mühendis ve Makine Dergisi* 56/668 (2015), 36-47. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/b0218b112f2e18b_ek.pdf
- Koç, S. *Linyitlerin Gazlaştırılmasına Mineral Madde İçeriğinin Etkisi*. Ankara: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006. <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12575/29020/3835.pdf?sequence=1>
- Kojima, Y. vd. “Hydrogen Generation Using Sodium Borohydride Solution and Metal Catalyst Coated on Metal Oxide”. *International Journal of Hydrogen Energy* 27/10 (2002), 1029-1034. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00014-9)
- Kojima, Y. – Haga, T. “Recycling process of sodium metaborate to sodium borohydride”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28/9 (2003), 989-993. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00173-8)
- Kozlu, M.D. vd. “Plazma Teknolojilerinin Hidrojen ve Yakıt Pilleri Üzerinde Uygulamaları”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 279-286. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Krane, K. S. *Modern Physics*. Canada: John Wiley & Sons Inc, Second Edition, 1996.
- Levin, D.B. vd. “Biohydrogen Production: Prospects and Limitations to Practical Application”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 29/2 (2004), 173-185. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00094-6)
- Li, Z.P. vd. “Preparation of Sodium Borohydride by the Reaction of MgH_2 with Dehydrated Borax Through Ball Milling at Room Temperature”. *Journal of Alloys and Compounds* 349/1-2 (2003a), 232-236. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00872-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00872-1)
- Li, Z.P. vd. “Protide Compounds in Hydrogen Storage Systems”. *Journal of Alloys and Compounds* 356-357 (2003b), 469-474. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01241-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01241-0)
- Lindal, B. “Industrial and Other Applications of Geothermal Energy”. *Geothermal Energy: Review Of Research and Development*. ed. H. Christopher - H. Armstead. Paris: UNESCO, First Publication, 1973.

- Lorrey, M. “High Density Fuels, Boron-Gel Fuels and Diboride Thermal Protection Systems”. Erişim 11 Aralık 2020. <http://www.islandone.org/Launch/boron-sharp-article.htm>
- Lund, J.W. – Freeston, D.H. “World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2000”. ed. Chris Bromley. *Geothermics* 30/1 (2001), 29-68. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00044-4)
- Lyday, P.A. *Boron Minerals Yearbook*. USGS, 2002. https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral_pubs/boron/boromyb02.pdf
- MAPEG, Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. *Petrol İstatistikleri* (Ekim 2020). http://www.mapeg.gov.tr/petrol_istatistik.aspx
- Mat, M. D. “Hidrojen Depolama Teknolojileri”. 2. *Ulusal Hidrojen Kongresi*. ed. Filiz Karaosmanoğlu vd. 123-153. Ankara: Hidrojen Enerjisi Formu Yayınları, 2003.
- Matsumoto, N. vd. “Room Temperature Hydrogen Storage in Modified Vertically-Aligned Carbon Nanotubes Forest Measured in Vacuum by A Langasite Microbalance”. ed. D. Clary vd. *Chemical Physics Letters* 751 (2020), 137530-137535. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137530>
- Meade, D.M. (1995). “Tokamak Fusion Test Reactor D-T results”. ed, Mohamed Abdou. *Fusion Engineering and Design* 30/1-2 (1995), 13-23. [https://doi.org/10.1016/0920-3796\(94\)00398-Q](https://doi.org/10.1016/0920-3796(94)00398-Q)
- Mercedes-Benz. “The New GLC F-Cell”. Erişim 23 Temmuz 2020. <https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/passenger-cars/glc/the-new-glc-f-cell/>
- MIT, Massachusetts Institute of Technology. *The Future of Coal: An Interdisciplinary Mit Study*. Massachusetts: MIT, 2007. https://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf
- Milch, I. “Wendelstein 7-X im Betrieb”. *Phys. Unserer Zeit* 50/1 (2019), 16-23. DOI: [10.1002 / piuz.201901524](https://doi.org/10.1002/piuz.201901524)
- Millennium Cell. *Millennium: Clean Energy to Power The World*. Millennium Cell, 2003.
- Mineralienatlas, “Search”. Erişim 15 Ekim 2020. <https://www.mineralatlas.eu/>
- Moseman, R.F. “Chemical Disposition of Boron in Animals and Humans”. *Environmental Health Perspectives* 102 (1994), 113-117. DOI: [10.1289/ehp.94102s7113](https://doi.org/10.1289/ehp.94102s7113)
- MTA, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. “Yeraltı Kaynakları”. Erişim 3 Mart 2020. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/muze/yeralti-kaynaklari>
- MTA, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. “Bilgi Merkezi”. Erişim Eylül 2020.

- MTA, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. “Kömür Arama Araştırmaları”. Erişim: 5 Ekim 2020. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>
- MTA, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. “Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları”. Erişim 12 Ekim 2020. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari>
- Muray, R.L. - Holbert, K.E. *Nükleer Enerji: Nükleer Süreçlerin Kavramları, Sistemleri ve Uygulamalarına Giriş*. çev. A. Hakan Yılmaz vd. Ankara: Nobel Yayınevi, 7. Basımdan Çeviri, 2015.
- Nacar Koçer K. vd. “Türkiye’de Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi”. *Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları* 4/2 (2006), 17-20. <http://web.firat.edu.tr/daum/default.asp?id=75>
- Nazir, H. vd. “Is the H2 Economy Realizable in the Foreseeable Future? Part I: H2 Production Methods”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 45/27 (2020), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.092>
- NEA, Nuclear Energy Agency vd. *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*. Boulogne-Billancourt: NEA, 2018. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7413-uranium-2018.pdf>
- Nikitin, A. vd. “Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes Through the Formation of Stable C–H Bonds”. *Nano Letters* 8/1 (2008), 162-167. <https://doi.org/10.1021/nl072325k>
- Nikolamotor. “Nikola Two”. Erişim 27 Temmuz 2020. <https://nikolamotor.com/two#motor-specs-bottom>
- Noyan, Ö.F. “Hidrojenin Özellikleri”. 2. *Ulusal Hidrojen Kongresi*. ed. Filiz Karaosmanoğlu vd. 41-53. Ankara: Hidrojen Enerjisi Forumu Yayınları, 2003.
- NÜKTE, Nükleer Teknoloji Bilgi Platformu. “Atom Enerjisi (Nükleer Enerji). Erişim 2 Ağustos 2020. <http://www.nukte.org/menu/191/atom-enerjisi-nukleer-enerji.html>
- Ogena, J. - Ogawa, Y. “Nuclear Fusion: Status Report and Future Prospects”. ed. Stephen P.A. Brown - Michael Jefferson. *Energy Policy* 96 (2016), 770-778. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.037>
- OGM, Orman Genel Müdürlüğü. *Ormancılık İstatistikleri 2018* (Ekim 2018). <https://www.ogm.gov.tr/ekutuphane/Sayfalar/Istatistikler.aspx?RootFolder=%2Fekutuphane%2FIstatistikler%2FOrmanc%2FC4%B1%2FC4%B1k%20%2FC4%B0statistikleri&FolderCTID=0x012000301D182F8CB9FC49963274E712A2DC00&View>
- Onovwiona, H.I. - Ugursal, V.I. “Residential Cogeneration Systems: Review of the Current Technology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10/5 (2006), 389-431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.07.005>

- OPEC, Organization of the Petroleum Exporting Countries. *Annual Statistical Bulletin*. Vienna: OPEC, 2014. https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2014.pdf
- OPEC, Organization of the Petroleum Exporting Countries. *Annual Statistical Bulletin*. Vienna: OPEC, 2019. https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB_2019.pdf
- Oral, E. – Çelik, V. “Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi”. *Mühendis ve Makine Dergisi* 540 (2005), 30-40. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/b16ebc056e61302_ek.pdf
- Oral, F. vd. “Hidroelektrik Santral Rezervuar Verilerinin Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi”. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 6/2 (2017), 29-38. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/391083>
- Öner, B.Ö. *Türkiye’nin Alternatif Enerji Kaynakları ve Bor Madeninin Endüstride Kullanım Alanlarının Araştırılması*. İstanbul: İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- Özdemir, Z.A. - Mutlubaş, H. “Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri”. *Bartın Üniversitesi Uluslararası Fen Bilimleri Dergisi*, 2/1 (2019), 16-34. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/771874>
- Özgener, B., “Nükleer Enerjinin Hidrojen Üretimindeki Yeri”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 175-180. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Özgener, H.A. “Dördüncü Nesil Nükleer Reaktörlerin Hidrojen Üretiminde Kullanımı”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 187-192. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Parenti, C. “Nuclear Power is Risky and Expensive”. *Alternative Energy*. ed. Peggy Daniels Becker. 50-55. Michigan: Greenhaven Press, 2010. <http://libgen.rs/search.php?req=Alternative+Energy&open=0&res=25&view=simple&phrase=1&column=def>
- Patel, N. vd. “Pd-C Powder and Thin Film Catalysts for Hydrogen Production by Hydrolysis of Sodium Borohydride” *International Journal of Hydrogen Energy* 33/1 (2008), 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.018>
- Pehlivan, Y. – Çetinkaya, M. “Bor ve Temiz Enerji” *Aydınlanma* 1923 49 (2014), 33-40. <http://aydinlanma1923.com/index.php/AYD23/issue/view/28>

- Pettersson, J. - Hjörtsberg, O. *Hydrogen Storage Alternatives– A Technological And Economic Assessment*. KFB, 1999. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20026501>
- Polat, C. – Kılınç, N. “Dünya’da ve Türkiye’de Yeni Bir Pazarın Doğuşu, Gelişimi ve Paylaşımı: “Hidrojen Enerjisi ve Hidrojen Teknolojisi Ürünleri” Pazarı”. *Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi* 4/2 (2007), 1-29. https://arastirmax.com/tr/system/files/dergiler/161047/makaleler/4/2/arastirmx_161047_4_pp_1-29.pdf
- Poslu, K. – Çebi, H. “Özel Bor Kimyasalları ve Bor Dünyasındaki Gelişmeler”. *Madencilik Bülteni* 062 (2001), 25-28. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/ef248c04979d6b3_ek.pdf
- Poudyal, R.S. vd. “Hydrogen Production Using Photobiological Methods”. *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Production and Purification*. ed. Velu Subramani vd. 1/289-317. Oxford: Woodhead Publishing, 2015. <http://library.iol/main/B1F91526E04A4B2EA0E4319C65D2C16A>
- PPPL, Princeton Plasma Physics Laboratory. *The TFTR Advanced Performance Project: A Proposal to Extend the DeuteriumTritium Phase of TFTR Operation*. Princeton: PPPL, 1995. <https://w3.pppl.gov/tftr/info/TFTR-AP.pdf>
- PPPL, Princeton Plasma Physics Laboratory. “Events”. Erişim 10 Ağustos 2020. <https://www.pppl.gov/events/colloquium-achieving-10mw-fusion-power-tftr-retrospective>
- PPPL, Princeton Plasma Physics Laboratory. “Tokamak Fusion Test Reactor”. Erişim 11 Ağustos 2020. <https://www.pppl.gov/Tokamak%20Fusion%20Test%20Reactor>
- Pratt, J.W. – Chan, S.H. *Maritime Fuel Cell Generator Project*. Sandia National Laboratories, 2017. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/07/f35/fcto_maritime_fc_generator_2017.pdf
- Raissi, A.T. vd. “Metal Hydride Storage Requirements for Transportation Applications”. *Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 4/2280-2285. California: IEEE, 1996. DOI:10.1109/IECEC.1996.561173
- Raja, A.K. vd. *Power Plant Engineering*. New Delhi: New Age International (P) Limited, 2006. https://www.academia.edu/8836636/Power_Plant_Engineering_By_A_K_Raja_Amit_Prakash_Srivastava_Manish_Dwivedi
- REN 21, Renewable Energy. *Renewables 2020: Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2020. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf
- Riis, T. vd. “Hydrogen Production R&D: Priorities And Gaps”, *International Energy Agency*, 2006. <https://webstore.iea.org/download/direct/992?fileName=hydrogen.pdf>

- Riversimple. “The Technology Behind the Rasa Car”. Erişim 24 Temmuz 2020. <https://www.riversimple.com/technology-behind-rasa-hydrogen-car/>
- Riversimple. “Batteries or Hydrogen ?”. Erişim 25 Temmuz 2020. <https://www.riversimple.com/batteries-hydrogen-wrong-question/>
- Robotik Sistem. “Güneş Pilleri”. Erişim 15 Mart 2020. http://www.robotiksistem.com/gunes_pilleri_nedir.html
- Rodriguez, N. M. “A Review of Catalytically Grown Carbon Nanofibers”. *Journal of Materials Research*, 8/12 (1993), 3233-3250. <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.3233>
- Rostoker, N. vd.” Colliding Beam Fusion Reactor”. *Science* 278/5342 (1997), 1419-1422. DOI: 10.1126 / science.278.5342.1419
- Rostoker, N. - Monkhorst, H.J. *Controlled Fusion in a Field Reversed Configuration and Direct Energy Conversion*. Patent. United States Patent, No. US 6,611,106 B2, Tarih 26 Ağustos 2003.
- Rustemli, S. vd. “Güneş Pilleri ile Sıcak Su Elde Etme ve Sokak Aydınlatması”. 5. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*. 42-49. Diyarbakır: EMO Yayınları, 2009. https://www.emo.org.tr/ekler/c85deffa0b8b7a7_ek.pdf
- Ryzhkov, S.V. - Chirkov, A.Y. (2019). *Alternative Fusion Fuels and Systems*. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group, 2019. <http://library.lol/main/63FE33370C09BD7E42608169A4617E5D>
- Sabah, “Dizel mi Daha Ekonomik, Benzinli mi?”. Erişim 17 Kasım 2020. https://www.sabah.com.tr/ekonomi/2011/01/12/dizel_mi_daha_ekonomik_benzinli_mi
- Saka, B. - Özaktaş, T. “Dünya ve Türkiye’de Doğal gaz ve LPG’li Taşıtların Gelişimi”. 5. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. ed. Zekai Şen vd. 2/645-655. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 2004.
- Samsun, R.C. vd. *Mobile Fuel Cell Application: Tracking Market Trends*. IEA Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme, 2020. https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2020_AFCTCP_Mobile_FC_Application_Tracking_Market_Trends_2020.pdf
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. 2023 *Sanayi ve Teknoloji Stratejisi*. Ankara: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019. https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/SanayiStratejiBelgesi_2023.pdf
- Schlager, N. - Weisblatt, J. (ed.). *Alternative Energy*. 3 Volume. Michigan: Thomson Gale, 2006. <http://library.lol/main/6F711D587B04CD977F1AF82DCCA2780C>
- Schlesinger, H.I. – Brown, H.C. *Methods of Preparing Alkali Metal Borohydrides*. Patent. United States Patent Office, No. 2,584,533, Tarih 19 Aralık 1950. <https://patentimages.storage.googleapis.com/56/97/43/eae92c0afa3e29/US2534533.pdf>

- Schlesinger, H.I. – Brown, H.C. “Uranium(IV) Borohydride”. *Journal of the American Chemical Society* 75/1 (1953), 219-221. <https://doi.org/10.1021/ja01097a058>
- Schlesinger, H.I. vd. “Reactions of Diborane with Alkali Metal Hydrides and Their Addition Compounds. New Syntheses of Borohydrides. Sodium and Potassium Borohydrides”. *Journal of the American Chemical Society* 75/1 (1953a), 199-204. <https://doi.org/10.1021/ja01097a053>
- Schlesinger, H.I. vd. “The Preparation of Sodium Borohydride by the High Temperature Reaction of Sodium Hydride with Borate Esters”. *Journal of the American Chemical Society* 75/1 (1953b), 205-209. <https://doi.org/10.1021/ja01097a054>
- Schmidt, O. vd. “Future Cost and Performance of Water Electrolysis: An Expert Elicitation Study”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 42/52 (2017), 30470-30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
- Schubert, D. “Boron Oxides, Boric Acid, and Borates”. *Encyclopedia of Chemical Technology* (5th Edition). ed. Raymond E. Kirk – Donald F. Othmer. 1-68. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2011. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0215181519130920.a01.Pu b3>
- Schubert, F. vd. *Method for Preparing Alkali-Metal Borohydrides*. Patent. United States Patent Office, No. 3,077,376, Tarih 12 Şubat 1963. <https://patentimages.storage.googleapis.com/dd/8b/a6/3bb7fe1a1835dd/US3077376.pdf>
- Sciencing. “What is the Importance of Nuclear Energy”. Erişim 30 Temmuz 2020. <https://sciencing.com/importance-nuclear-energy-5049613.html>
- Seçer, A. vd. “Comparison of Co-Gazification Efficiency of Coal, Lignocellulostic Biomass and Biomass Hydrolsate for High Yield Hydrogen Product”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 43/46 (2018), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.144>
- Sevim, C. “Küresel Enerji Politikası ve Enerji Güvenliği”. *Journal of Yasar University* 26/7 (2012), 4378-4391. https://journal.yasar.edu.tr/wp-content/uploads/2012/10/26_Sayi_1_makale_Cenk-Sevim.pdf
- Shell, “Akaryakıt Pompa Satış Fiyatları”. Erişim 17 Kasım 2020. <https://www.shell.com.tr/suruculer/shell-yakitlari/akaryakit-pompa-satis-fiyatlari.html>
- Siccinio, M. vd. “DEMO Physics Challenges Beyond ITER”. ed. Mohamed Abdou. *Fusion Engineering and Design* 156/111603 (2020), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111603>
- Sonel, N. *Petrol Jeolojisi*. Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, 1997. <https://www.ankara.edu.tr/?s=Petrol+Jeolojisi&submit=#gsc.tab=0&gsc.q=Petrol%20Jeolojisi&gsc.page=1>

- Soruşbay, C. “Hidrojeni Doğrudan Yakıt Olarak Kullanan Taşıt Uygulamaları”. 2. *Ulusal Hidrojen Kongresi*. ed. Filiz Karaosmanoğlu vd.169-185. Ankara: Hidrojen Enerjisi Forumu Yayınları, 2003.
- Steinberg, E.P. “The Stages of Fission”. *Britannica*. Erişim 1 Ağustos 2020. <https://www.britannica.com/science/nuclear-fission/The-stages-of-fission>
- Steinberg, M., - Cheng, H.C. “Modern And Prospective Technologies For Hydrogen Production From Fossil Fuels”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 14/11 (1989), 797-820. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(89\)90018-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(89)90018-9)
- Ströbel, R. vd. “Hydrogen Adsorption on Carbon Materials”. ed. K.M. Abraham. *Journal of Power Sources* 84/2 (1999), 221-224. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00320-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00320-1)
- Suri, A.K. “Material Development for India’s Nuclear Power Programme”. *Sadhana* 38/5 (2013), 859-895. DOI: [10.1007 / s12046-013-0169-6](https://doi.org/10.1007/s12046-013-0169-6)
- Sümer, G. “Bor Bileşikleri”. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*. ed. Hüseyin Özdağ vd. 153-164. Ankara: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2004. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/2ba9d6eee3f026b_ek.pdf
- Swain, M.R. vd. *The Effects of Hydrogen Addition on Natural Gas Engine Operation*. SAE International, 1993. <https://doi.org/10.4271/932775>
- Szary, P.J. – Maher, A. *New Jersey Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*. The State of New Jersey Department of Transportation, 2001. <https://hydrogenhouseproject.org/uploads/3/4/2/5/34257826/fhwa-nj-2001-001.pdf>
- Şahin, M. “Çiftli Yakıt Sistemlerinde Hidrojen Uygulamaları”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd.131-136. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. “Nükleer Enerjinin Temel Prensipleri”. Erişim 2 Ağustos 2020. <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/838-bolum-02-nukleer-enerjinin-temel-prensipleri.html>
- Taşcıoğlu, S. *Bor ve Silisyum Kimyası*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Yayınevi, 1992. http://katalog.marmara.edu.tr/muyayinevi/YN515_1.pdf
- Taylor, J. B. vd. “Technical and Economic Assessment of Methods for the Storage of Large Quantities of Hydrogen”. ed. T. Nejat Veziroğlu. *International Journal of Hydrogen Energy* 11/1 (1986), 5-22. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(86\)90104-7](https://doi.org/10.1016/0360-3199(86)90104-7)
- Tech Port, “Low AC-Loss Superconducting Cable Technology for Electric Aircraft Propulsion”. Erişim 9 Aralık 2020. <https://techport.nasa.gov/view/93606>

- TEİAŞ, Türkiye Elektrik İletim A.Ş.. *Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri* (12 Ekim 2020). <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Terzioğlu, R. – Çavuş, T.F. “Enerji Verimliliği ve Süperiletken Malzemeler”. 6. *Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Fuarı*. Kocaeli: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2015. https://www.emo.org.tr/ekler/ca89f0f987ae652_ek.pdf
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Genel Müdürlüğü. *Kömür Sektör Raporu (Linyit)*. Ankara: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, 2009. http://www.tki.gov.tr/depo/Komur_SektorRaporu2008.pdf
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2012. Ankara: TKİ, 2013. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2013. Ankara: TKİ, 2014. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2014. Ankara: TKİ, 2015. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2015. Ankara: TKİ, 2016. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2016. Ankara: TKİ, 2017. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2017. Ankara: TKİ, 2018. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TKİ, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. *Kömür Sektör Raporu [Linyit]* 2018. Ankara: TKİ, 2019. <http://www.tki.gov.tr/bilgi/yayinlar/sektor-raporu/290>
- TMMOB, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. *Bor Raporu*. Ankara: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 2003. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_1158.pdf
- TMMOB, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. *Enerji Raporu*. Ankara: Yağmur Ofset, 2006. https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/90f2aca5c640289_ek.pdf
- TMMOB, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. *Bor Raporu*. Ankara: Maden Mühendisleri Odası, 2008. http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=109&5&sube=0#
- TMMOB, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. *Bor Raporu*. Ankara: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2016. http://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/bor_0.pdf

- Tolay, M. vd. (2009), “Katı Yakıtların Gazlaştırılmasıyla Hidrojen Üretimi”. 4. *Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*. ed. M. Oktay Alınak vd. 7-16. Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 1. Basım, 2009. https://www.academia.edu/2525155/IV_Ulusal_Hidrojen_Enerjisi_Kongresi_UHK_2009_Bildiriler_Kitab%C4%B1_IV_National_Hydrogen_Congress_UHK_2009_October_15_16_2009
- Toyota. “Mirai Brochure”. Erişim 21 Temmuz 2020. https://www.toyota.com/mirai/assets/modules/carpagellfeatures/docs/MY20_Mirai_eBro_Lifestyle.pdf
- Toyota. “Full Specs”. Erişim 22 Temmuz. <https://www.toyota.com/mirai/fullspecs.html>
- TPAO, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı. 2018 Yılı *Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu*. Ankara: TPAO, 2019. <http://www.tpao.gov.tr/file/2003/sector-raporlari-2018-2735e5d18395d1ba.pdf>
- TTK, Türkiye Taş Kömürü Kurumu. 2019 Yılı *Taş Kömürü Sektör Raporu*. Ankara: TTK, 2020. <http://taskomuru.net/tr/whiseezu/2020/05/2019sektorraporu.pdf>
- Tutar, F. – Eren, M.V. “Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye”. *International Journal of Economic and Administrative Studies* 6 (2011), 1-26. <http://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/202004>
- TÜBİTAK – MAM, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – Marmara Araştırma Merkezi. “Enerji Enstitüsü”. Erişim 18 Kasım 2020. https://mam.tubitak.gov.tr/sites/images/mam---/ee_tr.pdf
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, *Araştırma-Geliştirme Faaliyet Araştırması* (23 Ekim 2020). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Arastirma-Gelistirme-Faaliyetleri-Arastirmasi-2019-33676>
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, *Motorlu Kara Taşıtları* (4 Aralık 2019). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ekim-2019-30639>
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, *Motorlu Kara Taşıtları* (4 Ocak 2019). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Kasim-2018-30628>
- TÜREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği. *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu*. Ankara: TÜREB, 2019. <https://tureb.com.tr/lib/uploads/1702068f660d1309.pdf>
- UNCTADSTAT, United Nations Conference on Trade and Development Statistic. (12 Şubat 2020). https://unctadstat.unctad.org/wds/Report_Folders/reportFolders.aspx
- UNEP, United Nations Environment Programme. *The Hydrogen Economy: A Non-Technical Review*. Paris: UNEP, 2006. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9024/-The%20Hydrogen%20Economy%20_%20A%20non-technical%20review-2006632.pdf?sequence=3&isAllowed=1

- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations Publication, 2011. https://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf
- Ural, Z. - Gençoğlu, M.T. “Yakıt Pillerinin Konutsal Uygulamalarda Kullanımı”. 5. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu. 149-154. Diyarbakır: EMO Yayınları, 2009. https://www.emo.org.tr/ekler/c85deffa0b8b7a7_ek.pdf
- USGS, United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2020*. Virginia: U.S. Geological Survey, 2020. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- Uysal, A. *Ham Petrol Fraksiyonlarının Biyolojik Bozunma Sonrası Fizikokimyasal Özelliklerinin Değişimi*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006. <http://tez.sdu.edu.tr/Tezler/TF00892.pdf>
- Ültanır, M.Ö. “Güneş Enerjisi”. *Bilim ve Teknik Dergisi* 340 (1996), 50-55. <https://servisces.tubitak.gov.tr/edergi/edergi/yazi.pdf?dergiKodu=4&cilt=29&sayi=340&sayfa=50&yil=1996&ay=3&yaziid=8844>
- Vellguth, G. “Performance of Vegetable Oils and Their Monoesters as Fuels for Diesel Engines”. *International Energy Journal* 7/1 (1985), 16-31. <http://www.Rericjournal.ait.ac.th/index.php/reric/article/view/1605/581>
- Veziroğlu, T. N. - Barbir, F. *Hydrogen Energy Technologies*. United Nations Industrial Development Organization, 1998.
- Viswanathan, B. *Energy Sources Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications*. Oxford: Elsevier, 2017. <http://library.lol/main/D5DEC3AC6997680E9FCE72BC283D1B20>
- Wade, R. “Catalyzed Reductions of Organofunctional Groups with Sodium Borohydride”. *Journal of Molecular Catalysis* 18/3 (1983), 273-297. [https://doi.org/10.1016/0304-5102\(83\)80110-2](https://doi.org/10.1016/0304-5102(83)80110-2)
- Wang, J. vd. (2014). “Chemically Activated Fungi-Based Porous Carbons for Hydrogen Storage”. *Carbon* 75 (2014), 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.016>
- Wang, X.L. vd. “Significant Enhancement of Critical Current Density and Flux Pinning In MgB₂ with Nano-SiC, Si, and C Doping”. *Physica C* 408-410 (2004), 63-67. DOI: [10.1016 / j.physc.2004.02.030](https://doi.org/10.1016/j.physc.2004.02.030)
- Wang, Y. vd. “Reversible Hydrogen Storage of Multi-Wall Carbon Nanotubes Doped with Atomically Dispersed Lithium”. *Journal of Materials Chemistry* 20/31 (2010), 6490-6494. <https://doi.org/10.1039/C0JM00609B>
- Watts, D. M. “Some Alternative Views for Energy”. *Physics Education* 18/5 (1983), 213-217. DOI: [10.1088 / 0031-9120 / 18/5/307](https://doi.org/10.1088/0031-9120/18/5/307)

- WCI, World Coal Institute. *The Coal Resource A Comprehensive Overview of Coal*. London: World Coal Institute, 2005. https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_resource_overview_of_coal_report.pdf
- Webmineral, “Kernite Mineral Data”. Erişim 15 Ekim 2020. <http://webmineral.com/data/Kernite.shtml#.X8bB5M0zZPZ>
- Wegener, L. “Status of Wendelstein 7-X construction”. *Fusion Engineering and Design* 84/2-6 (2009), 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.01.106>
- Wesson, J. *The Science of Jet*. Culham Publication Services, 1999. <https://scipub.euro-fusion.org/archives/jet-archive/the-science-of-jet>
- Wikipedia. Erişim 8 Ağustos 2020. <https://www.wikipedia.org/>
- Wolf, R.C. vd. “Major Results from the First Plasma Campaign of the Wendelstein 7-X Stellarator”. *Nuclear Fusion* 57/10 (2017), 1-21. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa770d>
- World Bank, *World Bank Data* (Kasım 2020). <https://data.worldbank.org/>
- World Coal Association. “Coal” Erişim 10 Mart 2020. <https://www.worldcoal.org/coal>
- World Nuclear Association. “Information Library”. Erişim 4 Ağustos 2020. <https://www.world-nuclear.org/information-library.aspx>
- Wu, Y. vd. “Review of Chemical Processes for the Synthesis of Sodium Borohydride”. *Millennium Cell Inc.* 2004. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/review_chemical_processes.pdf
- Yamamoto, A. vd. “Effects of B4C Doping on Critical Current Properties of MgB2 Superconductor”. *Superconductor Science and Technology* 18/10 (2005), 1323-1328. DOI: [10.1088/0953-2048/18/10/012](https://doi.org/10.1088/0953-2048/18/10/012)
- Yeni Akit. “Bu Rezerv Türkiye’ye Kaç Yıl Yeter?”. Erişim: 3 Ekim 2020. <https://www.yeniakit.com.tr/haber/karadenizde-dogal-gaz-bulundu-pek-bu-dogal-gaz-rezervi-turkiyeye-kac-yil-yeter-1366000.html>
- Yenienerji. com. “UNIDO-ICHET Hidrojen Enerjisi Projeleri”. Erişim 15 Ekim 2020. <https://www.yenienerji.com/unido-ichet-hidrojen-enerjisi-projeleri>
- Yenişafak, “Hangi Arabanın Deposu Kaça Doluyor?”. Erişim 17 Kasım 2020. <https://www.yenisafak.com/foto-galeri/ekonomi/hangi-arabanin-deposu-kaca-doluyor-2002915?page=1>
- Yenmez, N. “Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerin Türkiye İçin Önemi”. *Coğrafya Dergisi* 0/19 (2009), 59-94. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/231058>

- Yeşilbina. “Türkiye’nin İlk Hidrojen Adasında Enerji Üretimi Başladı”. *Sürdürülebilir Yapı Teknolojileri Dergisi* 2 (2011), 40-41. <http://www.yesilbinadergisi.com/eder gi/21/10/index.html>
- Yılmaz, A. “Her Derde Deva Hazinemiz Bor”. *Bilim ve Teknik Dergisi* 414 (Mayıs 2002), 38-48. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/edergi/yazi.pdf?dergiKodu=4&cilt=35&sayi=414&sayfa=38&yaziid=14330>
- Yiğitbaşoğlu, H. “Türkiye İçin Önemli Bir Maden: Bor”. *Coğrafi Bilimler Dergisi*. 2/2 (2004), 13-25. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000046
- Züttel, A. vd. “Hydrogen: The Future Energy Carrier”. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368 (2010), 3329–3342 DOI: [10.1098/rsta.2010.0113](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0113)



ÖZGEÇMİŞ

Samet TOKCAN, lisans eğitimlerini sırasıyla Kocaeli Üniversitesi İktisat (İngilizce) ve Anadolu Üniversitesi Kamu Yönetimi bölümlerinden mezun olarak tamamladı. Daha sonrasında tezli lisansüstü eğitimine Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim dalında başladı. Karasu Mermer’de dış ticaret elemanı olarak çalıştı. Şu anda Lore’s Perde de pazarlama elemanı olarak çalışmaktadır.

