

YENİLENEBİLİR METAN ÜRETİMİ VE KARBON NÖTR TOPLUMA GEÇİŞ

M. Zeki Yılmazoğlu

Arş. Gör., Gazi Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara
zekiyilmazoglu@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, yenilenebilir metan üretim süreci ele alınmıştır. Yenilenebilir metan üretimi karbon nötr toplumun temel taşıını oluşturacaktır. Çöllerden üretilen fazla elektriğin önce elektrolizde kullanımı, sonra da Sabatier reaktöründe metana dönüştürülmesi teorik olarak incelenmiştir. Kısaca belirtmek gerekirse dünya çöllerinin %4 ile şu anki dünya enerji talebi %17 verime sahip fotovoltaik (PV) sistemlerle karşılanabilmektedir. Eğer bu yaklaşım ve yatırım gerçekleşirse üretilen fazla elektrik metan halinde depolanabilecektir. Bu çalışmanın amacı, elektriğin metan halinde depolanması sistemine dikkat çekmek, mevcut potansiyeli belirtmek ve özellikle AB ülkelerinin enerji politikalarının ilerleme yönünün irdelenmesidir. Buradan elde edilecek çıkarımlar ile mikro ve endüstriyel boyutta reaktör tasarımı ve proses geliştirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir metan, sabatier reaksiyonu, fotovoltaik, Arap Baharı

Renewable Methane Production and Transition to Carbon Neutral Society

ABSTRACT

In this study, renewable methane production process was handled. Renewable methane production will be the cornerstone of carbon neutral society. Excessive electricity, generated from deserts, firstly utilized in electrolysis then conversion to the methane in Sabatier reactor was theoretically investigated. Briefly, 4% of world deserts able to cover the world energy demand with photovoltaic (PV) systems which have 17% conversion efficiency. If this approach and investment materialized, generated excessive electricity can be stored as methane form. The aim of this study, call attention to storage of electricity as methane form, indicate the current potential and especially examine the progress direction of energy policies of EU countries. By the deduction, reactor and process design in micro and industrial scale should be materialized.

Keywords: Renewable methane, sabatier reaction, photovoltaic, Arab Spring

Geliş tarihi : 26.03.2013

Kabul tarihi : 19.07.2013

Yılmazoğlu, M. Z. 2013. "Yenilenebilir Metan Üretimi ve Karbon Nötr Topluma Geçiş," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 643, s. 47-53.

1. GİRİŞ

Enerji günümüz dünyasının en önde gelen, uluslararası politikaları ve toplumun yaşam standardını belirleyen bir araçtır. Enerji talebi, üretimle ve insan nüfusuyla doğrudan ilgilidir ve bu iki değişken talep miktarını etkileyen en önemli parametrelerdir. Enerjinin temiz üretilmesi ve sürdürülebilir bir yaşam son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Enerjinin üretilmesinde fosil yakıtların tüketilmesi özellikle sanayi devriminden sonra büyük hız kazanmıştır. Bu yakıtların çevreye verdiği zararlar anlaşılmalı olup son yıllarda özellikle ülkeler arası protokollerle CO₂ emisyonu seviyeleri aşağıya çekilmeye çalışılmaktadır. Bunun yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da son on yıl içinde hızlı bir artış göstermiştir. Tüm bu gelişmelere paralel olarak uluslararası enerji politikaları da göz önünde bulundurulduğunda, özellikle güneş enerjisinin çok büyük bir kullanım alanına sahip olacağı ve buna bağlı süreçlerle karbon nötr topluma geçişin ileride gerçekleşeceği ortadadır.

Ülkemiz enerji kaynakları açısından sınırlı bir potansiyele sahip olup, enerji üretiminin çok büyük bir bölümü ithal kaynaklarla sağlanmaktadır. Kömür, biyokütle ve hidroelektrik santraller öz kaynaklarımızın kullanılması yönünde ilk sıralarda yer almaktadır. Buna karşın, ülkemizde mevcut kömür rezervlerinin büyük kısmı düşük kaliteli linyitlerden oluşmaktadır. Kyoto protokolünü de kabul etmemizin ardından bu düşük kaliteli linyitlerin çevreye en az zarar verecek biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca biyokütle açısından da önemli bir potansiyele sahip olan ülkemizde bu kaynağın da verimli biçimde kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Gazlaştırma ile katı yakıtlardan (kömür, biyokütle vb.) sentetik gaz üretimi ve elde edilen bu sentetik gazın genelde çeşitli kimyasal arıtma işlemlerden geçirilerek çevreye zararlarının azaltılması, diğer devletler için de emisyon kontrolü yönünde önemli bir AR-GE konusudur. Küresel ısınma nedeni ile CO₂ yakalama ve depolama yönünde birçok çalışma yapılmaktadır.

Alışılmış güç çevrimlerinde yüksek sıcaklıkta kömür kurutma, düşük buhar türbini giriş sıcaklığı (~500°C) ve düşük ekserji nedeniyle fosil yakıtların elektrik enerjisine çevrim oranı %30-35 dolayında kalmaktadır. Gaz/buhar kombine çevrimlerinde ise, bu verim yüksek gaz türbine giriş sıcaklığı (~1500°C) ve buna bağlı yüksek ekserji nedeniyle %60'lara çıkmaktadır. Buna göre, düşük kaliteli linyitlerin gazlaştırılarak kombine çevrim santrallerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılması hem düşük kaliteli linyitlerin değerlendirilmesini hem de çevresel etkilerin azaltılmasını sağlayacaktır. Kömür gazlaştırma aynı zamanda sıfır emisyonlu enerji dönüşüm sistemleri ile yakıt pili uygulamaları bağlamındaki hidrojen üretimi için de çıkış noktasını oluşturmaktadır. Dolayısıyla akışkan yataklı yakma ve gazlaştırma teknolojileri SO₂

kontrolü ve NO_x oluşumunun önlenmesi için uygundur. Ultra süperkritik buhar kazanları tasarımları ve O₂ ile yakma sistemleri de yakın gelecek için umut vadeden enerji dönüşüm sistemleri arasındadır.

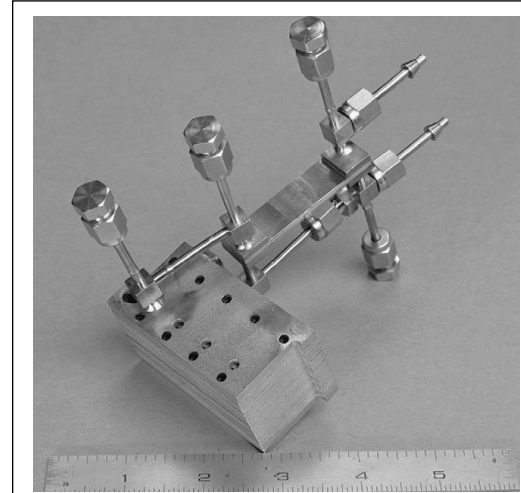
Tüm bu gelişmelere karşın halen fosil kaynakları tüketmekte ve gelecek nesiller için bir tehdit oluşturmaya devam etmekteyiz. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin hızla geliştirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik açısından bazı dezavantajları mevcuttur ve kesikli çalışan sistemlerdir. Örneğin güneş enerjisi kolektör yapısına göre farklı çalışma karakteristikleri göstermektedir. Yıllık güneşlenme süresi ve sistemin kurulacağı bölgeye düşen güneş enerjisi en kritik parametrelerdir. Rüzgâr enerjisi sistemleri, türbinin kurulacağı bölgedeki rüzgâr hızıyla doğrudan ilgilidir. Hepsinin ortak paydası kesintili çalışması ve ürettiği enerjiyi depolayamamasıdır. Güneş enerjisiyle yapılan araştırmalarda termal enerji depolama sistemleri önerilmiş olsa da bu sistemlerin maliyeti şu an için çok yüksektir. Buna karşın, emisyonların azaltılması yönünde bu teknolojilerin geliştirilmesi hız kazanmıştır.

Fosil enerji kaynaklarıyla enerji üretimi sonucunda yanma ürünü olan CO₂ ve H₂O gibi üç atomlu bileşiklerin sera etkisi oluşturarak küresel ısınmaya neden olduğu belirlenmiştir. Farklı tipteki enerji senaryoları ile artan nüfusa bağlı olarak enerji talebinin de artacağı kesindir. Bu talep artışının karbon serbest ya da karbon nötr teknolojilerle sağlanması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından direkt elektrik üretimi karbon serbest teknolojilere örnektir. Bu çalışma kapsamında ele alınacak olan teknoloji ise karbon nötr teknolojidir.

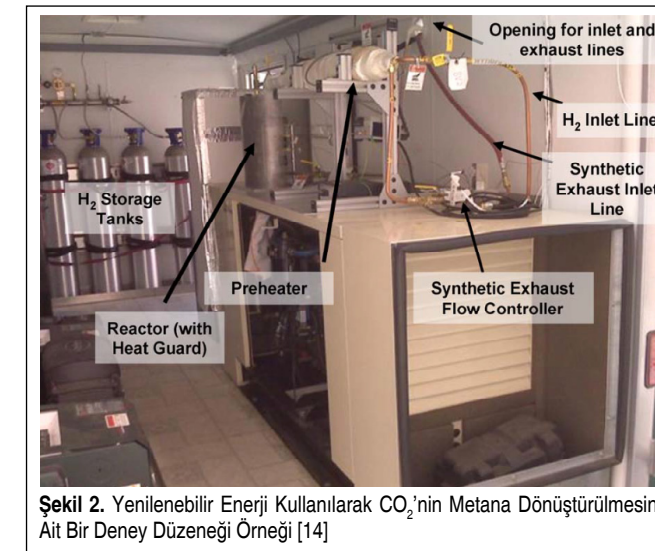
Karbon nötr teknolojiler ve bu konudaki çalışmalar yüzyıl öncesine dayanmaktadır. Paul Sabatier 1912 yılında kimya alanında bu çalışmasıyla Nobel Ödülü'ne layık görülmüştür [1]. Sabatier kendi adını taşıyan reaksiyonla CO₂ ve H₂ kullanılarak CH₄ üretmeyi başarmıştır [2]. Sterner [3] çalışmasında biyoyakıtlar ve Sabatier prosesi hakkında bilgi vermiştir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla küresel ısınmanın önüne geçilebileceğini belirtmiştir. Almanya ve Avusturya ortak bir çalışma grubu bünyesinde fazla yenilenebilir enerjiden sentez metan üretmek için mevcut doğal gaz şebekesiyle taşımayı ya da mevcut depolama tesisleriyle depolamayı önermişlerdir [4-6]. Brooks ve ark. [7] mikro kanallarda metan üretimini incelemişlerdir ve çalışmalarını NASA Johnson Space Center tarafından desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre katalizör olarak Ru ve TiO₂ kullanıldığı durumda 400°C reaktör sıcaklığında ve H₂:CO₂ molar oranı 6 iken %99.8 dönüşüm oranı olduğunu bulmuşlardır. Mohseni ve ark. [8] çalışmalarında biyokütlenin gazlaştırılması ya da bakteriler tarafından çürütülerek metan oluşturulması durumlarını incelemişlerdir. Yenilenebilir enerjinin Sabatier prosesi ile gazlaştırma ve çürütmeye entegre edilmesi durumunda sentez metan üretiminde sırasıyla %110 ve %74 artış

sağlanabileceğini göstermişlerdir. Lunde [9] Sabatier prosesi için model oluşturmuştur ve reaktördeki sıcaklık bölgelerinin simülasyonunu yaparak deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Kodama ve ark. [10] 180-250 kWm⁻² güneş akısında metal köpük katalizör kullanarak metanın kalorifik değerinin %17 oranında artırılmasını incelemişlerdir.

Bu teknoloji NASA tarafından 2007 senesinden itibaren Uluslararası Uzay İstasyonlarında (ISS: International Space Station), Çevresel Kontrol ve Hayat Destek Sistemi (ECLSS: Environmental Control Life Support System) olarak kullanılmaya başlanmıştır [11]. Holladay ve ark. [12] uzayda bu sistemin kullanılması amacıyla bir mikroreaktör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan mikroreaktöre ait fotoğraf Şekil 1'de gösterilmiştir. Hwang ve ark. [13] uzay uygulamalarında kullanılmak üzere membran tabanlı bir Sabatier prosesi önermişlerdir ve oluşan CO₂ bu yolla metana dönüşmesinin sağlanabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 1. Sabatier Prosesinin Uzayda Kullanımı İçin Tasarlanan Mikroreaktör [12]



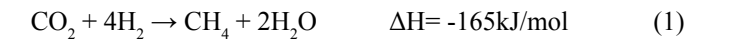
Şekil 2. Yenilenebilir Enerji Kullanılarak CO₂'nin Metana Dönüştürülmesine Ait Bir Deneysel Düzeneği Örneği [14]

Hoekman ve ark. [14] yenilenebilir enerjiye dayalı bir Sabatier prosenin deneysel çalışmasını yapmışlardır. Deneysel düzeneğine ait fotoğraf Şekil 2'de gösterilmiştir. Farklı H₂:CO₂ oranlarında CO₂ dönüşümünü incelemişlerdir.

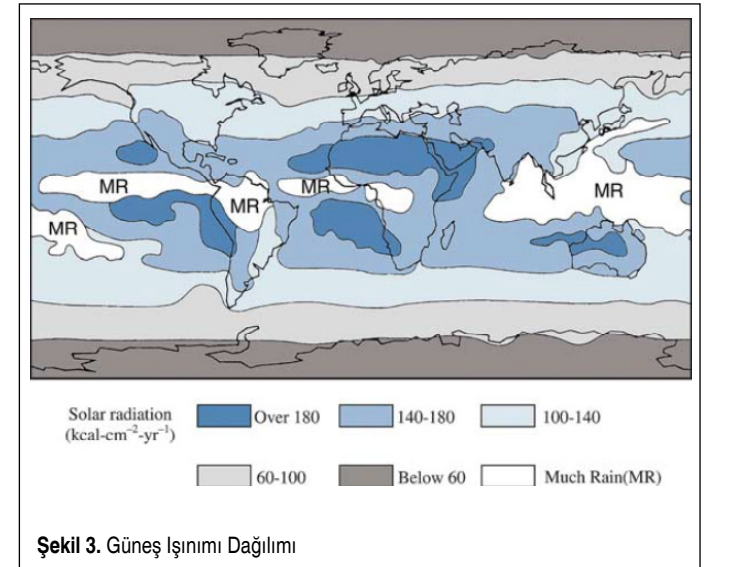
Karbon nötr bu teknoloji hem sürdürülebilir bir yaşam hem de uzay araştırmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında elektroliz amacıyla yenilenebilir enerji teknolojilerinin kurulum yeri seçimi, ülkelerin enerji politikalarının küresel değerlendirilmesi ve yeniden gündeme gelen bu teknolojinin gelişimi sırasında ülkemizin de teknoloji gelişiminin gerisinde kalmaması amacıyla bilgiler verilmiştir.

2. SÜREÇ TANIMI VE UYGULAMALAR

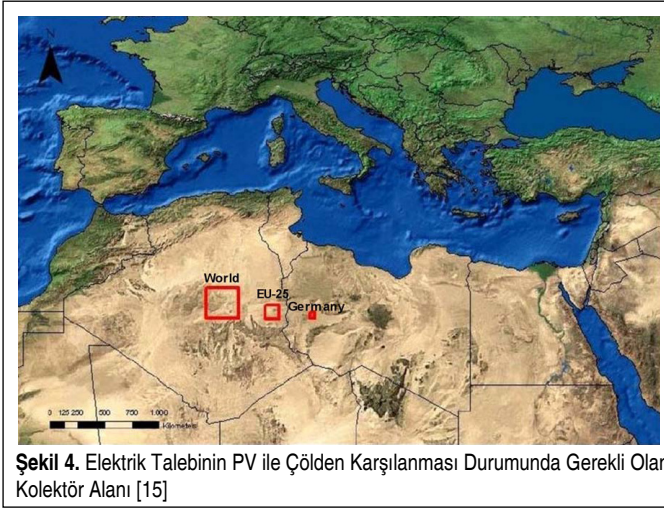
Sabatier prosesi, H₂ ve CO₂'nin yaklaşık 400°C sıcaklığında Eş. 1'de belirtildiği gibi bir nikel katalizör varlığında ürün olarak CH₄ ve H₂O'nun ortaya çıktığı ekzotermik bir reaksiyondur. Rutenyum ve Alumina (Alüminyum oksit) katalizörün daha etkin olmasını sağlamaktadır [15].



Bu reaksiyonun girenler kısmında bulunan CO₂ yanma ürünü olan ve küresel ısınmaya neden olan sera gazlarından birisidir. H₂ ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla suyun elektrolizinden elde edilebilecektir. Ürün olarak sentez metan ve su ortaya çıkmaktadır. Özellikle uzay istasyonlarında sürdürülebilir bir yaşam için bu teknolojinin mutlaka geliştirilmesi gerekmektedir. Solunum sonucu ortamda artan CO₂, fotovoltaik panellerden elde edilen elektrik enerjisiyle birlikte suyun elektrolizinde kullanılarak hem bir yakıt hem de kullanılabilir su üretimini sağlayacaktır. Şekil 3'te güneş ışınım miktarlarının yeryüzündeki dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3, özellikle Sahra çölünün çok büyük bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Şekilde MR ile



Şekil 3. Güneş Işınımı Dağılımı



gösterilen alanlar yağmur ormanlarını belirtmektedir. Sahra çölünün dışında yüksek güneş ışınımına sahip kara parçası Avustralya'dadır. Geri kalan yüksek ışınımlı alanlar büyük miktarda okyanus alanlarıdır.

Meisen ve Pochert [15] güneş enerjisiyle dünya elektrik tüketiminin karşılanması durumunu incelemişlerdir. Sonuç olarak dünya, AB ve Almanya'nın tüm elektrik ihtiyacının karşılanması için gerekli alan Şekil 4'te gösterilmiştir.

Dünya üzerindeki çöl alanlarının yaklaşık %4'ü 2010 yılı enerji talebinin karşılanmasında yeterli olmaktadır [15]. Tablo 1'de dünya üzerindeki büyük çöllere ait bilgiler ve fotovoltaik (PV) sistemlerle üretilebilecek enerji miktarları verilmiştir.

Tablo 1'de belirtilen çöllere dünyanın en büyük çöllerinden bazılarıdır. Burada en büyük yüzey alanı ve yıllık ortalama ışımaya değerleri dikkate alındığında Sahra Çölü, güneş enerjisi sistemleri için en uygun bölge olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hesaplamalarda PV verimi %17 ve kolektörler arası boşluk faktörü %50 olarak alınmıştır.

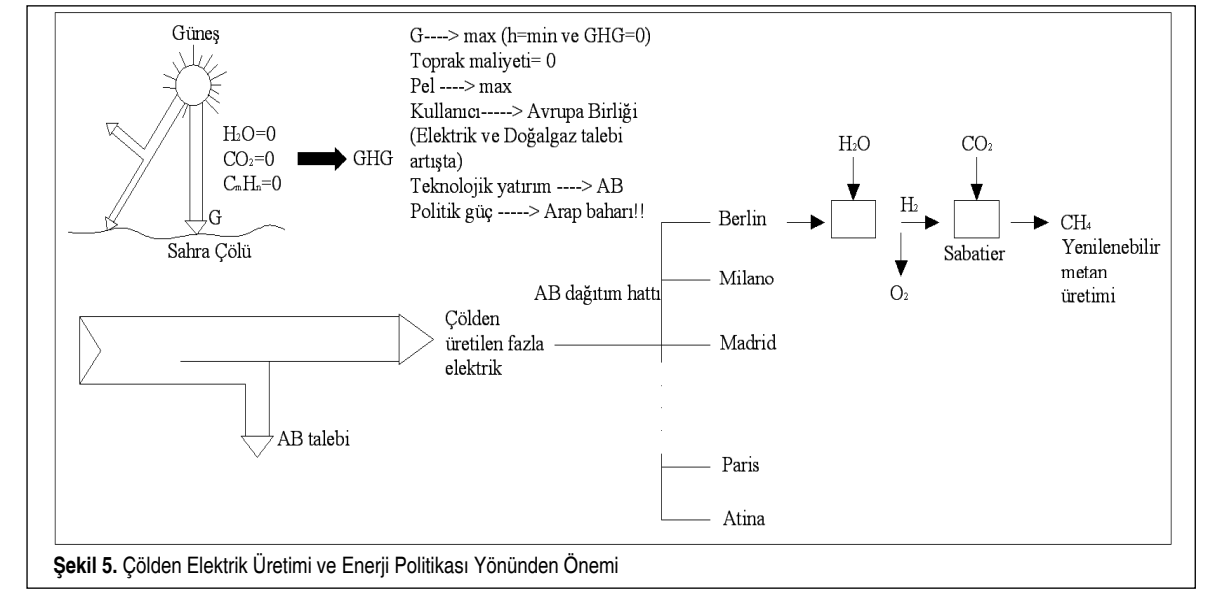
Sahra Çölü'nün Avrupa kıtasına yakınlığı da enerji politikaları açısından büyük önem arz etmektedir. Arap Baharı'nın altında yatan temel neden, bu karbon nötr enerji politikası olabilir. Bu tip enerji politikaları ileriye dönük projeksiyonlara ve el-

deki maddi kaynak, sistem yapısı ve daha birçok parametreye bağlı olarak hayat bulmaktadır. 1960'lı yıllarda Almanya'da başlatılmış olan Adem ile Havva projesi, Almanya'nın ihtiyacı olan elektrik enerjisinin Sahra çölünden karşılanması ve Sabatier reaksiyonuna bağlı olarak yenilenebilir metan üretimi ile gaz ihtiyacının da karşılanması temeline dayanmaktadır. Günümüzde bu sürecin hayata geçirilmesi ve planlamanın yapılması adına çalışmalar gün yüzüne çıkmaya başlamıştır. Şekil 5'te metan üretim prosesi ve Avrupa'da Sahra Çölü'nün kullanımı ile elektrik ve yenilenebilir metan üretimi gösterilmiştir. Şekil 5'te de gösterildiği üzere Sahra çölüne güneşten gelen ışınlar dik olarak düşmektedir. Çölde sera etkisi yaratan gazlar (GHG) çok düşük düzeylerde bulunmaktadır. Teknolojik yatırımın AB tarafından karşılanabileceği düşünülürse ve Arap Baharı ile toprak maliyetinin de çok düşük olacağı göz önünde bulundurulursa AB ülkelerinin enerji sorununu çözebilmeleri adına çok büyük bir potansiyel ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda geliştirilmesine devam edilen PV teknolojisi için kurulum yeri Sahra Çölü olmalıdır. Buradan elde edilecek olan elektrik enerjisi iletim hatlarıyla belli başlı şehirlere taşınarak buralarda Sabatier prosesi ile yenilenebilir metan üretimi sağlanacaktır. Aynı zamanda talepler direkt olarak bu yolla da sağlanabilecektir. Mevcut doğal gaz taşıma altyapısı da kullanılarak AB bir doğal gaz imalatçısı haline gelebilecektir. Böylece doğal gaz yönünden Rusya ve İran'a olan bağımlılık son bulabilecektir. Şekil 6'da Sabatier prosesinin detaylı bir biçimde açıklaması gösterilmiştir.

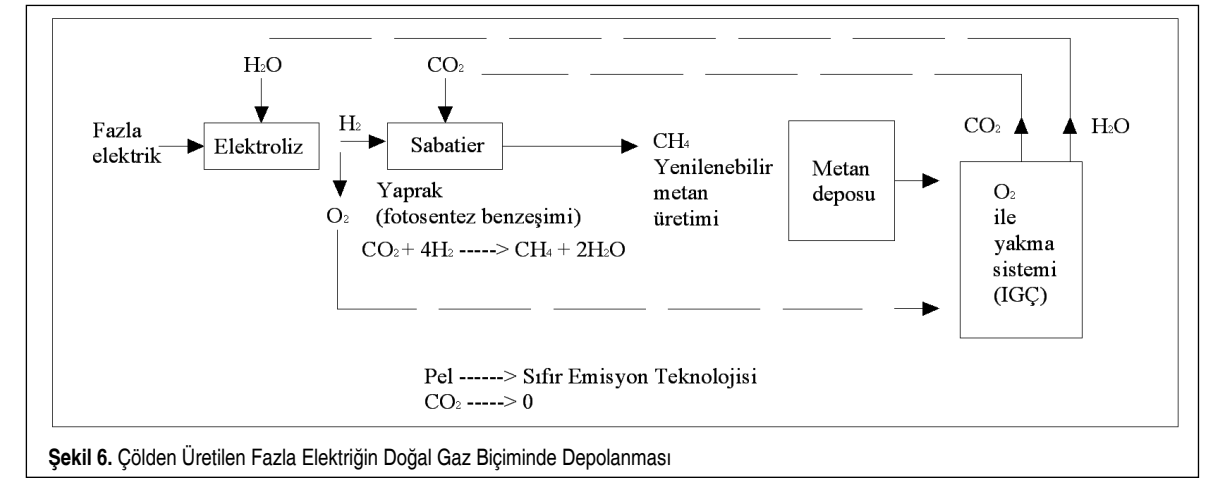
Şekil 5 ve 6'da belirtilen fazla elektrik, çölden (Sahra) üretilen ve AB'nin ihtiyacından fazla olan elektriği göstermektedir. Bu kadar büyük bir enerji yatırımı için ülkelerin maddi anlamda birlikte hareket etmesi gerekliliği ortadadır. Bu fazla elektrik Sabatier prosesi için gerekli olacak H₂'nin suda elektrolizi sırasında kullanılacaktır. H₂, CO₂ ile reaksiyona girerek CH₄ oluşumu sağlanacaktır ve AB hazır iletim, dağıtım hatları ve depolama istasyonları ile çölden üretilen fazla elektriği metan biçiminde depolayacaktır. Bu metan, O₂ ile yakma sistemlerinde kullanılarak (O₂ suyun elektrolizinden) emisyon olarak CO₂ ve H₂O elde edilecektir. CO₂ Sabatier prosesi için bir girdi olup H₂O suyun elektrolizinde kullanılacaktır. Şekil

Tablo 1. Dünya Üzerindeki Bazı Çöl Alanları ve PV Enerji Üretim Miktarları [15]

Çölün adı	Alan 10 ⁴ km ²	Yıllık ortalama ışımama [kWh/m ² /yıl]	Yıllık güneşlenme süresi [h]	Fotovoltaik kapasitesi [TW]	Yıllık elektrik üretimi 10 ³ [TWh]
Sahra	860	2685	2533.71	731	1296.5
Arap	233	1945	2254.89	198.05	312.61
Gobi	130	1701	1675.96	110.5	129.64
Büyük Victoria	65	2343	2186.96	55.25	84.58
Patagonya	67	1737	1298.79	56.95	51.78



Şekil 5. Çölden Elektrik Üretimi ve Enerji Politikası Yönünden Önemi



Şekil 6. Çölden Üretilen Fazla Elektrik Doğal Gaz Biçiminde Depolanması

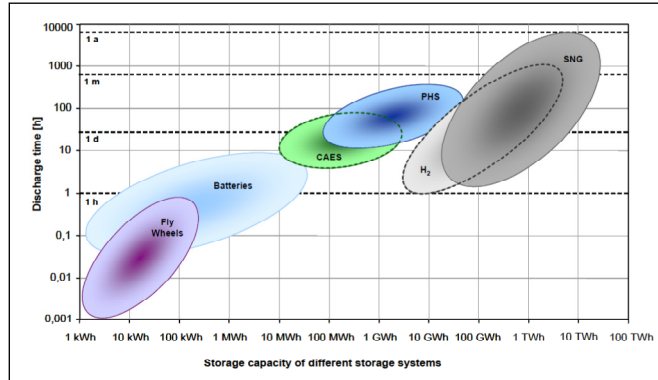
6'dan da açıkça görüldüğü üzere bu tarz bir enerji dönüşümü karbon nötr bir toplumun yapı taşı olacaktır.

Enerjinin bu kadar önemli olduğu günümüz dünyasında ülkeler arası politikalar ya da ülkelerin iç dinamikleri bu temele göre belirlenmektedir. Karbon nötr topluma geçişte güneş enerjisi ve Sabatier süreci büyük bir öneme sahip olacaktır. Enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin tekrar kullanım süresi göz önüne alındığında kimyasal depolama sistemleri diğer sistemlere göre daha avantajlıdır ve bunun grafik gösterimi Şekil 7'de belirtilmiştir [16]. Şekil 7'de CAES (Compressed Air Energy Storage) basınçlı hava ile depolama sistemlerini, PHS (Pumped Hydro Ssystems) pompalı depolama sistemlerini, H₂ hidrojen ve SNG (synthetic natural gas) sentetik doğal gaz sistemlerini göstermektedir.

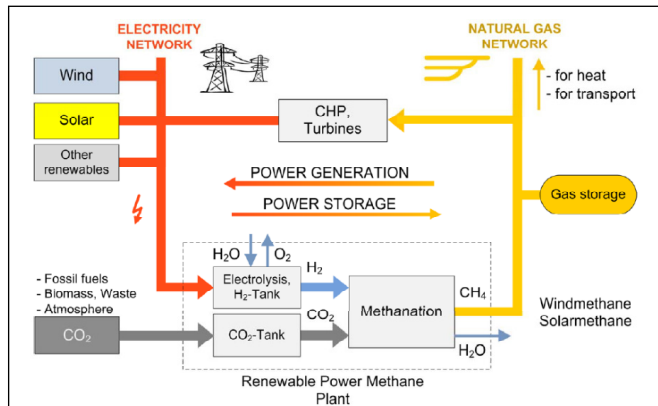
Şekil 7'den de açıkça görüldüğü üzere sentez gaz üretimi ile özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji depolama sorununu da çözmeye adaydır. Fraunhofer Enstitüsü ve ZSW

25 kW'lık bir pilot tesisi 2010 yılında çalıştırmaya başlamışlardır. 2013 yılında ise AUDI ile 6300 kW'lık daha büyük bir yenilenebilir metan üretim tesisi hayata geçirilecektir. AUDI bu tesisten doğal gazlı araç kullanıcıları için günlük 3900 m³ yenilenebilir metan üretimini hedeflemektedir [17]. Rüzgâr enerjisinden de faydalanılacak olan sistemin akış şeması Şekil 8'de gösterilmiştir.

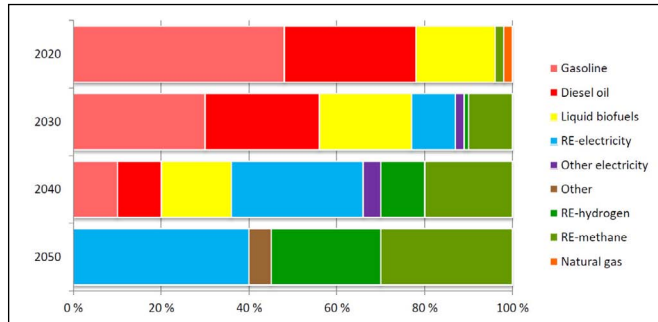
Bununla birlikte, Almanya kaynaklı birçok proje daha yakın bir tarihte hayata geçirilecektir. Bu projelerden en önemlisi CO2RECT projesidir [18, 20]. Yenilenebilir metan üretimiyle ilgili diğer projeler özetlenmiştir [18, 22]. "Green Gas Grids" projesiyle Avrupa'daki ülkelerin doğal gaz taşıma ve depolama potansiyelleri belirlenmiştir [19]. Bu projenin amacı yenilenebilir metanın dağıtımı ve depolanması yönünde AB'nin entegre bir şebeke halinde çalışmasıdır. Şekil 5'te de belirtilmiş olan yenilenebilir metan üretim istasyonları bu hatlara dahildir. Ari [21] çalışmasında, yenilenebilir metan



Şekil 7. Enerji Depolama Sistemleri ve Tekrar Kullanım Süreleri [16]



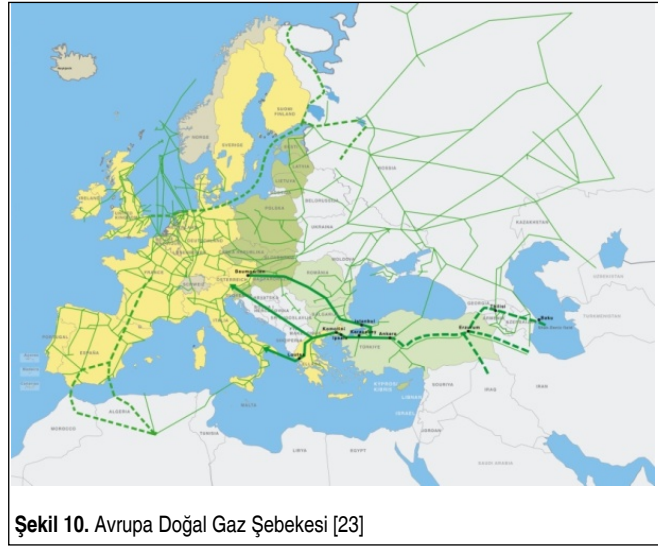
Şekil 8. Yenilenebilir Metan Üretim Tesisi [17]



Şekil 9. Hafif Araçlarda Enerji Kaynağı Kullanımının Değişimi [21]

ekonomisi ve 2050 yılına ait bazı ön görüşleri belirtmiştir. Bu ön görüşlere göre hazırlanmış ve 2050 yılına kadar hafif araçlarda kullanılması muhtemel enerji kaynakları Şekil 9'da gösterilmiştir.

Avrupa Birliği'nin yenilenebilir metan üretimiyle sağlayacağı katkı ülkemiz açısından da iyice irdelenmelidir. Avrupa doğal gaz şebekesi Şekil 10'da gösterilmiştir. Şu anda ülkemiz üzerinden taşınmakta olan doğal gaz, yenilenebilir metan üretiminin hayata geçirilmesiyle sektöre uğrayacaktır ve bölgedeki tüm dengeler değişecektir. Güneş enerjisi potansiyelinin olduğu ülkemizde de bu tip projelerle yenilenebilir metan üretimi desteklenmelidir. Böylece ülkemiz de mevcut üreticiler



Şekil 10. Avrupa Doğal Gaz Şebekesi [23]

ve tüketiciler arasındaki köprü görevinden başka potansiyellerin değerlendirilmesiyle üretici konumuna geçerek bölgede söz sahibi olabilecektir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji, çağımızın en önemli araçlarından birisi olmakla birlikte karbon nötr enerji dönüşüm teknolojileri ve bu konuda yapılan çalışmalar hızlanmaktadır. Özellikle karbon nötr toplum oluşumu adına Sabatier prosesinin endüstriyel boyutta uygulaması büyük önem taşımaktadır. Bu proses NASA tarafından da uzay istasyonlarında yaşam destek ünitesi olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel boyutta yenilenebilir metan üretimi teknolojisine geçmemiz karbon nötr topluma geçişi sağlayacağı için önemli bir basamak oluşturacaktır. Özellikle Almanya ve Avusturya bu konuda birçok AR-GE çalışması sürdürmektedir. Yenilenebilir kaynak olarak güneş enerjisi ve PV teknolojisi seçildiğinde uluslararası enerji politikaları, Arap baharı ve daha birçok çağrışım bu konunun önemini ifade etmektedir. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ve depolanması için en uygun alternatif sentez doğal gaz üretimi olup bu teknolojinin pilot ölçekte de olsa ülkemiz sınırlarında uygulanması bir zorunluluk haline gelecektir. Bu teknolojinin endüstriyel boyutta uygulanmasını başarabilecek ülke herhangi bir doğal gaz rezervi olmamasına rağmen bir anda doğal gaz üreticisi ülke haline gelebilecektir ve bu durum birçok enerji politikasının ve ülkeler arası dengenin değişmesine sebep olacaktır. Bölgede söz sahibi olunabilmesi için yenilenebilir metan üretimi projeleri öncelikle AR-GE boyutunda sonrasında endüstriyel boyutta desteklenmelidir.

KAYNAKÇA

1. "Paul Sabatier-Chemist," [http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Sabatier_\(chemist\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Sabatier_(chemist)), son erişim tarihi: 1 Kasım 2011.

2. "Sabatier Reaction," http://en.wikipedia.org/wiki/Sabatier_reaction, son erişim tarihi: 1 Kasım 2011.
3. Sterner, M. 2009. Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems, Kassel University Press, Kassel, Germany.
4. Science Daily. 2010. "Storing Green Electricity as Natural Gas," <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/05/100505113227.htm>, son erişim tarihi: 1 Temmuz 2010.
5. Dillow, C. 2010. "System Stores Wind and Solar Power in the Form of Natural Gas, to Fit Neatly Into Existing Infrastructure," <http://www.popsci.com/science/article/2010-05/carbon-neutral-natural-gas-made-wind-and-solar-could-power-existing-infrastructures>, son erişim tarihi: 1 Temmuz 2010.
6. Page, L. 2010. "Germans Plan to Make 'Synthetic Natural' Gas from CO₂," http://www.theregister.co.uk/2010/05/06/german_synthetic_natural_gas, son erişim tarihi: 1 Temmuz 2010.
7. Brooks, K.P., Hu, J., Zhu, H., Kee, R.J. 2007. "Methanation of CO₂ by H₂ Reduction Using the Sabatier Process in Microchannel Reactors," Chemical Eng. Science, no. 62, p. 1161-70.
8. Mohseni, F., Magnusson, M., Görling, M., Alvfors, P. 2012. "Biogas from Renewable Electricity-Increasing a Climate Neutral Fuel Supply," Applied Energy, no. 90, p. 11-16.
9. Lunde, P.J. 1974. "Modeling, Simulation and Operation of a Sabatier Reactor," Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop., vol. 13, no. 3, p. 226-232.
10. Kodama, T., Kiyama, A., Moriyama, T., Mizuno, O. 2004. "Solar Methane Reforming Using a New Type of Catalytically Activated Metallic Foam Absorber," Transactions of ASME Journal of Solar Energy Engineering, no. 126, p. 808-811.
11. Nimon, J. 2011. "The Sabatier System: Producing Water on the Space Station," http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/sabatier.html, son erişim tarihi: 14 Aralık 2011.
12. Holladay, J.D., Brooks, K.P., Wegeng, R., Hu, J., Sanders, J., Baird, S. 2007. "Microreactor Development for Martian in Situ Propellant Production," Catalysis Today, no. 120, p. 35-44.
13. Hwang, H.T., Harale, A., Liu P.K.T., Sahimi, M., Tsotsis,

- T. T. 2008. "A Membrane Based Reactive Separation System for CO₂ Removal in Life Support System," Journal of Membrane Science, no. 315, p. 116-124.
14. Hoekman, S.K., Broch, A., Robbins, C., Purcell, R. 2010. "CO₂ Recycling by Reaction with Renewably Generated Hydrogen," International Journal of Green House Gas Control, no. 4, p. 44-50.
15. Meisen, P., Pochert, O. 2006. "A Study of Very Large Solar Desert Systems with the Requirements and Benefits to Those Nations Having High Solar Irradiation Potential," Technical Report.
16. Kassel University. 2010. "Renewable Power to Methane," http://www.iset.uni-kassel.de/abt/FB-I/publication/2010-036_Renewable_power_to_methane.pdf, son erişim tarihi: 1 Ocak 2013.
17. Kimmel, M. 2011. "From Wind and Sun to Gas: Fraunhofer's 'Renewable Methane' Energy Storage Technology," <http://blogs.worldwatch.org/revolt/is-%E2%80%99Renewable-methane%E2%80%99D-energy-storage-an-efficient-enough-option/>, son erişim tarihi: 5 Ocak 2013.
18. Elliot, D. 2012. "Renewable Methane," <http://environmental-researchweb.org/blog/2012/10/renewable-methane.html>, son erişim tarihi: 5 Ocak 2013.
19. "Overview of Biomethane Markets," http://www.greengasrids.eu/sites/default/files/files/120529_D2_2_Overview_of_biomethane_markets_rev1.pdf, son erişim tarihi: 9 Ocak 2013.
20. Bayer-Siemens. 2013. "CO₂RRECT," <http://co2chem.co.uk/carbon-utilisation/co2rrect>, son erişim tarihi: 9 Ocak 2013.
21. Lampinen, A. 2012. "Roadmap to Renewable Methane Economy," http://www.globalmethane.org/documents/finland_roadmap_renewable_methane_economy.pdf, son erişim tarihi: 10 Ocak 2013.
22. Nayab, N. 2011. "Storing Renewable Energy as Clean-Burning Methane," <http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/78303.aspx>, son erişim tarihi: 10 Ocak 2013.
23. World Travel Maps. 2012. "Europe Map Natural Gas Network," <http://worldtravelmaps.info/wp-content/uploads/2012/08/europe-map-natural-gas-network.jpg>, son erişim tarihi: 10 Ocak 2013.