



**YANMA SONRASI YAKALANAN
KARBONDİOKSİT VE YENİLENEBİLİR
HİDROJEN ÜRETİMİ İLE METANOL ÜRETİMİ**

Yüksek Lisans Tezi

Gülay H. KESKİN

Eskişehir 2024

**YANMA SONRASI YAKALANAN KARBONDİOKSİT VE YENİLENEBİLİR
HİDROJEN ÜRETİMİ İLE METANOL ÜRETİMİ**

Gülay H. KESKİN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Ocak 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gülay H. KESKİN'nin "YANMA SONRASI YAKALANAN KARBONDİOKSİT VE YENİLENEBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ İLE METANOL ÜRETİMİ" başlıklı tezi 19/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye	:	Prof. Dr. Emin AÇIKKALP
Üye	:	Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ
Üye	:	Prof. Dr. Mesut TEKKALMAZ

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm yüksek lisans ğrencisi Gülay H. KESKİN “YANMA SONRASI YAKALANAN KARBONDİOKSİT VE YENİLENEBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ İLE METANOL ÜRETİMİ” başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Emin AÇIKKALP

ÖZET

YANMA SONRASI YAKALANAN KARBONDİOKSİT VE YENİLENEBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ İLE METANOL ÜRETİMİ

Gülay H. KESKİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP

Bu çalışmada, bir fabrikanın yıllık 56089 ton CO₂ salınımı kullanılarak yeşil metanol üretimi teknik ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Yeşil metanol üretimi için gerekli 61 MW enerji önce rüzgâr türbini santrali sonra güneş paneli tarlası kurularak elde edilmiştir. Tesisin hedefi, yakalanan 56089 ton CO₂ salınımı ve yeşil hidrojen ile yeşil metanol üretmektir. Hidrojen, su elektrolizi ile yenilenebilir elektrik kullanılarak üretilirken, karbondioksit fabrikanın bacalarındaki egzoz gazından amine tabanlı bir CO₂ absorpsiyon sistemi kullanılarak ayrılmaktadır. Aspen Plus simülasyon aracı referans alınarak gerçekleştirilen süreç modellemesi ve süreç optimizasyonu sonucunda elde edilen verilerle detaylı bir ekonomik analiz yapılmıştır. Saatte 5 ton yeşil metanol üretimi gerçekleştirilen tesiste güneş enerjisiyle elde edilen metanolün ton başına seviyelendirilmiş maliyeti LCOM 1003,21 €, LCOE 72,65 €/MWh rüzgâr enerjisiyle elde edilen metanolün ton başına maliyeti ise LCOM 658,84 €, LCOE 44,49 €/MWh olarak hesaplanmıştır. Ancak, fosil yakıtlardan elde edilen metanolün ton başına maliyeti sadece 450 €'dir. Bu durum, şu anda güneş ve rüzgâr enerjisiyle üretilen metanolün, fosil yakıtlardan elde edilen metanol ile rekabet etme seviyesine ulaşamadığını göstermektedir. Bu çalışmada, gelecekte yeşil metanol üretiminin fosil yakıtlarla rekabet edebilmesinin gelişen teknolojiye, yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüşe, verimli elektroliz yöntemlerine ve CO₂ salınımına getirilecek ceza politikalarına bağlı olduğu ileri sürülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Rüzgâr enerjisi, Elektroliz, CO₂ yakalama, Yeşil metanol, Yenilenebilir hidrojen.

ABSTRACT

METANOL PRODUCTION VIA POSTCOMBUSTED CARBONDIOXIDE CAPTURE AND RENEWABLE HYDROGEN PRODUCTION

Gülay H. KESKİN

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024

Supervisor: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP

In this study, the production of green methanol using the annual 56089 tons of CO₂ emissions from a factory has been examined technically and economically. The necessary 61 MW energy was obtained by first establishing a wind turbine power plant and then a solar panel field for green methanol production. The aim of the facility is to produce 5 ton of renewable methanol per hour using captured 56089 tons of CO₂ emissions and green hydrogen. While hydrogen is produced using renewable electricity through water electrolysis, carbon dioxide is separated from the factory's chimney exhaust gas using an amine-based CO₂ absorption system. Detailed economic analysis was conducted based on data obtained from process modeling and optimization using the Aspen Plus simulation tool. The cost of methanol obtained from solar energy is determined to be LCOM 1003,21 €, LCOE 72,65 €/MWh, and the cost of methanol obtained from wind energy is LCOM 658,84 €, LCOE 44,49 €/MWh. However, the cost of methanol from fossil fuels is only 450 €/ton. This indicates that currently, methanol produced from solar and wind energy has not reached the competitive level of methanol obtained from fossil fuels. In this study, it is suggested that the future competitiveness of green methanol production against fossil fuels relies on advancing technology, decreasing costs of renewable energy, efficient electrolysis methods, and penalty policies for CO₂ emissions.

Key Words: Wind power, Electrolysis, CO₂ air capture, Green methanol, Renewable hydrogen.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren değerli yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sn. Prof. Dr. Emin AÇIKKALP'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın hazırlanma sürecinde desteklerini esirgemeyen şirketime ve değerli arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her sürecinde yanımda olan, başarılarımla mutlu olan ve varlıklarıyla beni mutlu eden tüm sevdiklerime ayrıca annem Fatma, babam Selami, kardeşim Ömer, ablam Tülay ve tatlı yeğenim Mustafa Alper'e sonsuz teşekkür ederim.

Cumhuriyetimizin 100. Yılı'nın mutluluğunu yaşarken tezimi yazmama imkan sağlayan kadınlara okuma, yazma, seçme ve seçilme olanağı sunan “Kadınlarımız için asıl mücadele alanı, asıl zafer kazanılması gereken alan, biçim ve kılıkta başarıdan çok; ışıkla, bilgi ve kültürle, gerçek faziletle süslenip donanmaktır.” diyerek Türk kadının önünü açan hiç unutmadığımız Atamız Mustafa Kemal ATATÜRK'e, silah arkadaşlarına ve şehitlerimize sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Gülay H. KESKİN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Gülay H. KESKİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	II
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	4
3. METANOL ÜRETİMİNDE YÖNTEM VE SÜREÇLER.....	25
3.1. Sudan Hidrojen Üretimi ve Elektroliz Teknolojileri	25
3.1.1. Alkalın su elektroliz teknolojisi (AWE)	25
3.1.2. Proton Exchange Membrane (PEM) ile suyun elektrolizi	27
3.1.3. Katı Oksit Elektroliz Hücreleri (SOEC) ile su elektrolizi	30
3.2. Amine Yıkama ile Karbondioksit Yakalama	32
3.3. Metanol Sentez Bölümü	35
3.4. Yeşil Metanol Üretimi.....	35

4. BİR FABRİKANIN CO₂ SALINIMINDAN YEŞİL METANOL ÜRETİMİ VE TEKNO EKONOMİK ANALİZİ.....	38
4.1. Hidrojen ve Oksijen Üretimi.....	40
4.2. CO₂ Yakalama İşlemi.....	42
4.3. Yeşil Metanol Sentez Süreci	43
4.4. Yeşil Metanol Maliyet Analizi	47
4.4.1. Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi ile üretilen yeşil metanolün maliyet analizi	47
4.4.2. Güneş panelinden elde edilen elektrik enerjisi ile üretilen yeşil metanolün maliyet analizi	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKÇA.....	58
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1 Gelecek yıllarda H ₂ üretim ve CO ₂ yakalama maliyeti	8
Tablo 3.1. Suyun farklı elektroliz teknolojilerinin karşılaştırılması	32
Tablo 3.2. Suyun farklı elektroliz teknolojilerinin karşılaştırılması	32
Tablo 4.1. Madde ve sistemin özellikleri	39
Tablo 4.2. PEM elektrolizinden elde edilen maddelerin üretim miktarı	41
Tablo 4.3. Metanol sentez süreci	41
Tablo 4.4. Hidrojen üretim sistemi	41
Tablo 4.5. Hidrojen üretimi için sistemdeki enerji ve madde akışı	42
Tablo 4.6. CO ₂ yakalama sistemi detayları	43
Tablo 4.7. CO ₂ yakalama sistemi için malzeme akışı ve enerji tüketimi	43
Tablo 4.8. Metanol sentez bölümünde enerji ve madde akışı	44
Tablo 4.9. Süreç parametreleri	44
Tablo 4.10. Tahmini yatırım maliyeti	45
Tablo 4.11. Metanol üretimi için gerekli seviyelendirilmiş enerji ve maddelerin birim maliyetleri	46
Tablo 4.12. Toplam operasyon ve bakım maliyetleri	46
Tablo 4.13. Rüzgâr türbini santrali kurulumu için gerekli girdiler	47
Tablo 4.14. Rüzgâr türbini santrali kurulumu için gerekli yatırım girdileri ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti.....	48
Tablo 4.15. Metanol tesisi kurulumu için gerekli yatırım girdileri.....	49
Tablo 4.16. Yer seviyesinden 50 m yüksekteki rüzgâr hızları	52
Tablo 4.17. Güneş paneli santrali kurulumu için gerekli girdiler	52
Tablo 4.18. Güneş paneli santrali kurulumu için gerekli yatırım girdileri ve seviyelendirilmiş enerji.....	53
Tablo 4.19. Metanol tesisi kurulumu için gerekli yatırım girdileri.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yenilenebilir metanol gösterimi	4
Şekil 2.2. Elektrik maliyetleri ve Hidrojen maliyetleri gösterimi	9
Şekil 2.3. CH ₃ OH üretim kapasitesi yıllık 4000,10000,50000 ton/yıl olan sistemin yıllık gelir-maliyet	10
Şekil 2.4. Metan ve Metanol karşılaştırılması	11
Şekil 2.5. Hibrid enerji ile yeşil metanol üretim şeması	12
Şekil 2.6. Güneş -Rüzgâr enerjisi ile metanolün seviyelendirilmiş maliyeti	13
Şekil 2.7. a) Oksijen satış maliyeti	13
Şekil 2.8. b) Yeşil Metanol Tesisi LCOM'daki CO ₂ Yakalama Kaynağı	14
Şekil 2.9. Metanol üretim maliyetine elektrik ve kapasite faktörünün etkisi	15
Şekil 2.10. Elektroliz tesis kapasitesi üzerine hassasiyet analizi	16
Şekil 2.11. Fosil metanol, yeşil metanol üretim maliyeti ve CO ₂ kaçınma maliyetinin gelecekteki gelişimine dair tahmin	18
Şekil 2.12. Power-to-Liquid (PtL) süreci, yenilenebilir enerji, su elektrolizi ve geri dönüştürülmüş karbondioksit kullanarak metanol üretimi	19
Şekil 2.13. Hidrojen üretim yöntemleri	24
Şekil 3.1. Yeşil metanol üretim süreci	25
Şekil 3.2. Suyun Alkalın elektroliz cihazı ile H ₂ ve O ₂ 'ye ayrılma şeması	27
Şekil 3.3. Suyun PEM elektroliz cihazı ile H ₂ ve O ₂ 'ye ayrılma şeması.....	28
Şekil 3.4. Suyun PEM elektroliz cihazı ile H ₂ ve O ₂ 'ye ayrılma şeması.....	28
Şekil 3.5. Suyun SOEC elektroliz cihazı ile H ₂ ve O ₂ 'ye ayrılma şeması.....	31
Şekil 3.6. Suyun SOEC elektroliz cihazı ile H ₂ ve O ₂ 'ye ayrılma şeması.....	31
Şekil 3.7. Amine yıkama ile karbondioksit yakalama süreci	33
Şekil 3.8. Konvansiyonel sulu MEA CO ₂ yakalama süreci akış şeması.....	34
Şekil 3.9. CO ₂ yakalama akış diyagramları.....	34

Şekil 3.10. Metanol sentez akış şeması	35
Şekil 3.11. Yeşil metanol üretimi ve dağıtımını gösteren proje	36
Şekil 3.12. Yeşil metanol sentezi için Aspen Plus ortamında akış şeması	37
Şekil 4.1. Metanol sentez süreci	38
Şekil 4.2. Yapılan harcamaların dağılımı	45
Şekil 4.3. Yapılan harcamaların dağılımı	45
Şekil 4.4. Yapılan harcamaların dağılımı	46
Şekil 4.5. Rüzgar türbini santrali kurulumu için nakit akışı	50
Şekil 4.6. Rüzgar enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında	50
Şekil 4.7. Rüzgar enerjisi kullanılan metanol tesisinin nakit akışı	51
Şekil 4.8. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli haritası (Yer seviyesinden 50 m yüksekte)	51
Şekil 4.9. Güneş paneli santrali kurulumu için nakit akışı	54
Şekil 4.10. Güneş enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında	55
Şekil 4.11. Güneş enerjisi kullanılan metanol tesisi için nakit akışı	55
Şekil 4.12. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli haritası	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AWE	: Alkaline Water Electrolysis Technology (Alkalin Su Elektroliz Teknolojisi)
CAPEX	: Capital Expenditure (Sermaye Harcamaları)
CCS	: Carbon Capture and Storage (Karbon Yakalama ve Depolama)
CCU	: Carbon Capture and Utilization (Karbon Yakalama ve Kullanım)
CH ₃ OH	: Metanol
CH ₄	: Metan
DPBP	: Discounted Payback Period (İndirimli Geri Ödeme Süresi)
eMEOH	: Yeşil Metanol
EUA	: Avrupa Birliği Karbon Kotası
fMEOH	: Fosil Metanol
H ₂	: Hidrojen
LCOE	: Levelized Cost of Electricity (Seviyelendirilmiş Enerji Maliyet)
LCOM	: Levelized Cost of Metanol (Seviyelendirilmiş Maliyet)
MEA	: Monoetanolamin
O ₂	: Oksijen
PEM	: Proton değişim membran
PEMEL	: PEM Elektroliz
PtL	: Power-to-Liquid (Güçten sıvıya)
PPM	: Parts Per Million, (Parçanın Milyonda Biri)
SOEC:	: Solid Oxide Electrolyzer Cells (Katı Oksit Elektroliz Hücreleri)
YEE	: Yenilenebilir Enerji
vd	: ve diğerleri

1. GİRİŞ

İklim değışikliğıyle ilgili yapılan araştırmalar, son 10000 yıl içinde fosil yakıtların kullanımına bağılı olarak CO₂ seviyeleri 240 ppm'den günümüzde 400 ppm'yi geçerek son 20 milyon yılın en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Reading Üniversitesi'nde yapılan bir filmde, 1850'den 2016'ya kadar olan dönemde aylık CO₂ artış eğilimleri ile küresel ortalama sıcaklıkların ilişkilendirildiğı belirtiliyor. Bu süre zarfında ortalama sıcaklıkların ~1,5 °C arttığı ifade edilmiştir. Araştırmalar, fosil yakıt kullanmayan süreçlere acil bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Bu, iklim değışikliğinin kontrol altına alınması ve olumsuz etkilerinin sınırlandırılması için atılması gereken adımların önemini vurguluyor. Fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme ve enerji verimliliğini artırma çabaları, gelecek nesillere daha sürdürülebilir bir dünya bırakmak adına kritik öneme sahip olduğu bilinmektedir [14]. 2016 yılında küresel sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan en az 55 ülkenin katılımıyla imzalanan Paris İklim Anlaşması insan kaynaklı sera gazı salınımlarının neden olduğu küresel sıcaklık artışını uzun vadede, sanayileşme öncesi döneme kıyasla 2 santigrat derecenin altıyla sınırlamayı hedeflemekte; bu konuda 1,5 santigrat dereceyi yakalamanın önemine dikkat çekmektedir. Taraflar Konferansı 28-30 Kasım-12 Aralık 2023 tarihlerinde Birleşik Arap Emirlikleri ev sahipliğinde düzenlenmiştir.

Bu noktada metanol üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanılması yani yeşil metanol enerji sektöründe gerçekleşen dönüşüm çabaları açısından hayati bir öneme sahiptir.

Metanol (CH₃OH) plastiklerden boyalara, kozmetik ürünlere ve yakıtlara kadar binlerce günlük üründe kullanılan bir sıvı kimyasaldır.

Güneş ve Rüzgâr türbininden gelen yenilenebilir enerji, su elektrolizini beslemek için kullanılır bu işlemle hidrojen üretilir ve ardından endüstriyel kaynaklardan veya doğrudan havada yakalanan atık CO₂'nin katalitik hidrojenasyonu ile yenilenebilir metanol üretimini sağlanabilir [32].

Metanol'ün avantajları; bu bağlamda, rüzgâr enerjisi tabanlı elektrolitik hidrojen üretimi, yenilenebilir enerjinin kimyasal depolama olarak işlev görmesini sağlayabilir. Hidrojen, temiz bir yakıt olarak nitelendirilir; çünkü yanması sonucunda zararlı emisyonlar ortaya çıkmaz ve gravimetrik ısı değeri, tipik hidrokarbon yakıtlarından üç

kat daha yüksektir. Ancak, hidrojenin üretim, depolama, sıkıştırma ve taşıma maliyeti hala yüksek seviyededir.

Yeşil metanole baktığımızda Power-to-Metanol (PtM) teknolojisi çeşitli sektörleri karbonsuzlaştırmak için büyük potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Bu potansiyel, kimyasal esnekliği, yüksek enerji yoğunluğu, düşük yanma sıcaklığı, kolay depolama ve taşıma ve mevcut altyapıyla uyumluluğu gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır [31].

Rüzgâr ve güneş fotovoltaik enerjisinin hızla büyümesi, dünya genelinde temiz ve ekonomik elektrik sağlama potansiyelini artırmıştır. Ancak, bu enerjinin üretildiğinde hemen kullanılması gerekliliği, talep yetersiz olduğunda enerji israfına ve ek maliyetlere yol açtığı bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları olan özellikle güneş paneli ve rüzgâr türbini , enerji üretiminde dalgalanmalar yaşayabilir. [33]

Bu fazla enerji, atılan enerjiye dönüşmeden önce temiz enerji üretimi veya yenilenebilir yakıt üretimi için kullanılabilir. Fazla enerjinin yenilenebilir metanol sentezi için kullanılması, bu soruna çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımla, yenilenebilir metanol çeşitli alanlarda enerji kaynağı, yakıt veya kimyasal bileşen olarak kullanılabilir. Bu, yeşil metanolün depolanmasını ve ihtiyaç duyulduğunda geri dönüştürülmesini sağlayarak enerji israfını önlemeye yardımcı olabilir. Bu yöntem, enerji talebinin dalgalanmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerjinin etkili bir şekilde değerlendirilmesine yönelik sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır [33].

Metanol, enerji sektöründen kimya endüstrisine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip çok yönlü bir kimyasal bileşiktir. Yakıt hücreleri ve içten yanmalı motorlar gibi enerji kaynaklarından, endüstriyel kimyasalların üretimine kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Metanol sentezi, CO₂'nin kimyasal üretimde besleme kaynağı olarak kullanılmasıyla atmosferdeki karbondioksit yoğunluğunu azaltma potansiyeli taşımaktadır. Formaldehit, asetik asit gibi endüstriyel kimyasalların üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Metanol, sürdürülebilir enerji ve çevre dostu üretim alanlarında stratejik bir öneme sahiptir. Plastik endüstrisinde metilen ve diğer monomerlerin üretiminde de etkilidir. Temizlik ürünleri, endüstriyel çözücülerin yapımı, elektronik endüstrisinde yarı iletkenlerin üretimi ve laboratuvarlarda çözücü olarak da tercih edilir. Avrupa ve Kuzey Amerika'da endüstriyel ölçekte üretimi başlamış olan yeşil metanol, düşük karbonlu bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Özellikle Çin gibi Asya ülkelerinde güçlü otomobil filoları yenilenebilir metanol kaynaklarını keşfetme ve uygulama konusunda kararlı bir ilerleme kaydetmektedir. Biokütle, belediye atıkları, egzoz karbonu

ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi çeşitli yenilenebilir hammadde kaynakları, metanolün ulaşım ve endüstri için uygun, çok yönlü, ekonomik ve istikrarlı bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Fosil yakıtların yerine kullanıldığında, metanol bu şekilde CO₂'nin geri dönüştürülmesine katkıda bulunabilir ve önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji için birden fazla çözüm olmasına rağmen, özellikle ağır araçlar, denizcilik ve havacılık gibi sektörlerde sıvı yakıtların hala gerekliliği göz önüne alındığında, metanol umut vaat eden bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Küresel yatırımlar ve başarılı denemeler, gelecekte yenilenebilir metanolün ulaşım ve kimyasal üretimde önemli bir rol oynayacağını göstermektedir [33].

Yeşil metanol üretimindeki hidrojen üretimi ve karbon yakalama süreçlerinin maliyetleri, projenin ekonomik performansını temsil eden kritik unsurlardır. Elektroliz ile üretilen hidrojenin maliyeti, kullanılan elektrik, elektroliz teknolojisi ve hammadde maliyetlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Karbon yakalama maliyetini ise CO₂'nin yakalanması için kullanılan sistemler teknolojiler belirler. Bu maliyetler, tesis ölçeği, piyasa koşulları ve gelişmiş teknolojilerin kullanımı gibi faktörlere bağlı olarak çeşitlenir.

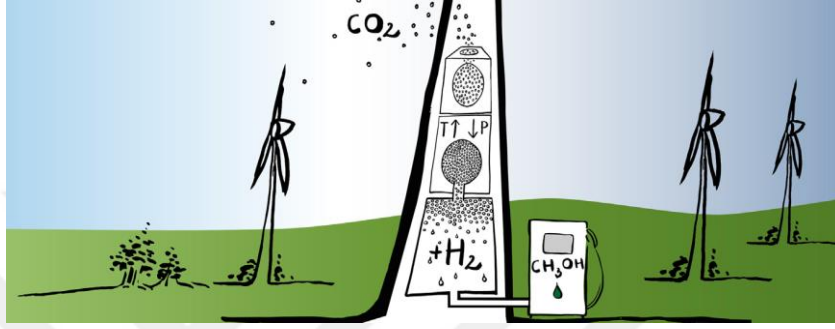
Günümüzde yenilenebilir metanol üretimi, mevcut teknoloji ve altyapının sınırlamaları nedeniyle halen yüksek maliyetlidir. Hidrojen üretimi ve karbon yakalama maliyetlerinin düşürülmesi, CO₂ salınımindan kaynaklı yaptırımların arttırılması yeşil metanol üretiminin ekonomik sürdürülebilirliğini artırabilir ve sürdürülebilir enerji sektöründeki rekabet avantajını güçlendirebilir.

Bu çalışmada yeşil metanol üretimi ile ilgili süreçler ve yapılan tekno-ekonomik çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar referans alınarak günlük CO₂ salınımı 6000 m³/saat olan bir fabrikanın karbondioksit salınımı kullanılarak yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar ve güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi ile üretilen yeşil metanol maliyeti ve üretimi için gerekli yatırım maliyetleri hesaplanmıştır. Rüzgar ve güneş enerjisi kullanılarak üretilen yeşil metanolün, seviyelendirilmiş maliyetleri hesaplanarak sistemin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde, yenilenebilir metanol üretimi ile ilgili yapılan çalışmaların kısa özetleri verilmiştir.

Bos ve diğerleri, (2020), rüzgâr enerjisinden metanole geçiş, elektrik, su elektrolizi ve CO₂ hava yakalama kullanarak yenilenebilir metanol üretimini ilgili makalelerinde incelemişlerdir [1].



Şekil 2.1. Yenilenebilir metanol gösterimi [1]

2020 de yapılan çalışma yenilenebilir metanol üretimi üzerine odaklanmaktadır. Literatür taraması, önceki çalışmalardaki sınırlamalara vurgu yapmaktadır. Çalışma, enerji üretimi, elektroliz, CO₂ ve H₂O yakalama ile metanol sentezi arasındaki ısı entegrasyonunu değerlendirmektedir. Direkt havada yakalama yöntemiyle CO₂ ve su kullanarak metanol üretimine odaklanan bu çalışma, önceki sınırlamaları aşan bir yaklaşım sunmaktadır. Steinberg ve Dang'ın 1977'deki önerisi hatırlatılarak, saf CO₂ besleme yerine CO₂ yakalama üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, süreç ekipmanlarının rüzgâr türbininin temel kulesine entegre edilmesini içeren fiziksel entegrasyonu değerlendiren ilk çalışmalardan biridir. Bu inceleme, 100 MW'lik bir rüzgâr enerjisi tesisi üzerinde gerçekleştirilen bir projenin metanol üretimine dönüştürülmesini değerlendirmektedir. Metanol üretim verimliliği yaklaşık %50 olarak belirlenmiş ve metanol maliyeti, rüzgâr türbini sermaye maliyeti hariç 300€/ton ve sermaye maliyeti dahil 800€/ton olarak hesaplanmıştır. Toplam sermaye maliyeti, 100 MW'lik rüzgâr türbini için yapılan 300 M€'luk yatırım maliyeti hariç, yaklaşık 200 M€ olarak belirlenmiştir. Bu maliyetin %45'i elektroliz için, %50'si CO₂ havada yakalama sistemi için ve %5'i metanol sentezi sistemi için ayrılmıştır. Elektroliz tarafından üretilen ısı, CO₂ desorpsiyonu için gerekli ısı ile entegre edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, hava

yakalama sistemi, elektroliz ekipmanı ve metanol reaktörünün rüzgâr türbini temelini içine yerleştirilebileceği ve kendi enerji üretimiyle uyumlu bir şekilde çalışabileceği ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca CO₂ hava yakalama sistemi için kullanılan sorbentin çalışma kapasitesinin optimizasyonunun hem ısı talebini hem de sermaye maliyetini azaltılabileceği vurgulanmıştır. Bu, CO₂ desorpsiyonu için ısı talebini azaltacak ve sorbent kütlesini düşürecek, böylece metanol ton başına maliyeti azalacağı belirtilmiştir. Yenilenebilir metanol üretimi için ekstra işlem adımlarını göz önünde bulundurarak, 800 €/ton'luk bir ilk maliyet tahmininin, beklenen yenilenebilir enerji, elektroliz ve doğrudan hava yakalama maliyetlerindeki düşüşlerle birlikte, enerji depolama ortamı ve kimya endüstrisi için umut verici bir başlangıç noktası olduğunu ifade etmektedir [1].

Tinoco ve diğerleri, (2015), elektrolitik hidrojen üretimi ve katalitik CO₂ azaltımını kullanarak güçten metanol üretimi araştırmasında güçten-metanol (Power-to-MeOH) teknolojisinin teknik ve ekonomik değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmanın kapsamında, bir model su elektrolizeri (polimer elektrolit veya katı oksit teknolojisi) ile bir model katalitik CO₂ reaktörü entegre edilerek, söz konusu teknolojinin performansı detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. ASPEN Plus V8.0 kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre, SOEC/Metanol sürecinde metanol üretim maliyetinin başlıca olarak sermaye harcamalarından (CAPEX) etkilendiği görülmüştür. SOEC teknolojilerindeki maliyet azaltma potansiyeli ve ömrünün arttırılması, maliyet düşürücü faktörler olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, PEM/Metanol sürecine dair yapılan maliyet analizi, işletme harcamalarının (OPEX) metanol maliyetini belirlemede kilit bir rol oynadığını göstermiştir. Elektrolizerin ömrünün iki katına çıkarılması, metanol maliyetini bir miktar etkilemektedir. Gelişmiş teknolojilerin kullanılmasıyla, PEM/Metanol süreci için ton başına 891 € ve SOEC/Metanol süreci için ton başına 5459 € metanol maliyeti belirlenmiştir. Bu maliyetler, sırasıyla mevcut metanol piyasa fiyatının 2.5 ve 15 katını temsil etmektedir. Su elektroliz teknolojilerinin geliştirilmesiyle, gelecekte metanol maliyetlerinde umut vadeden düşüşler beklenmektedir [2].

Schöneberger, C. ve diğerleri (2015) metanol sentezi için yakalanan CO₂'nin hammadde olarak kullanılması sürecinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan incelenmesini ele almışlardır. Bu makalenin amacı, metanol (MeOH) üretimini değerlendirmek ve teknik-ekonomik ve çevresel ölçütlerle CO₂ ve H₂'nin ham madde olarak kullanıldığı bir süreç üzerinde çalışmaktır. Bu tip karbon yakalama ve kullanım (CCU) tesisi, (i) CO₂ emisyonlarının net azalması ve (ii) üretim maliyeti açısından

geleneksel MeOH sentez süreci ile karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Süreç akış modellemesi, operasyonel performansı ve toplam satın alınan ekipman maliyetini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Akış şeması CHEMCAD'de uygulanmış ve elde edilen kütle ve enerji akışları, belirlenen anahtar performans göstergelerini hesaplamak için giriş olarak kullanılmıştır. Çevresel etkiyi değerlendirmek için CO₂ temelli ölçütler kullanılmaktadır. Değerlendirilen MeOH tesisi yılda 440 ktMeOH üretmekte olup, konfigürasyonu bir ısı entegrasyon sürecinin sonucudur. Özgün sermaye maliyeti geleneksel tesislere göre daha düşük olduğu bilinmektedir. Ancak, H₂ ve yakalanan CO₂ gibi ham madde fiyatları, bu tür bir projenin finansal olarak sürdürülebilir olmasına izin vermemektedir. CCU tesisi finansal açıdan çekici hale getirilmek isteniyorsa, MeOH fiyatının neredeyse 2 katına çıkması, H₂ maliyetinin neredeyse 2,5 kat azalması veya CO₂'nin bu çalışmanın varsayımları altında yaklaşık 222 €/t değerine sahip olması gerekmektedir. İncelenen MeOH CCU tesisi, 550 MW net elektrik üreten bir kömür (PC) enerji santralının CO₂ emisyonlarının yaklaşık %21,5'ini kullanabilir. Net CO₂ emisyon tasarrufu, PC santralının emisyonlarının %8'ini temsil etmektedir. Bu sonuçlar, CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeli olduğunu, ancak bu potansiyelin küçük olduğunu göstermektedir. MeOH talebindeki büyümeyi ve mevcut olarak ithal edilen miktarları karşılamak için Avrupa'da bu tür CCU tesislerinin inşa edilmesi durumunda, net CO₂ emisyonlarının azalma potansiyelinin yılda 2,71 MtCO₂ olduğu tahmin edilmektedir [3].

Zucker ve diğerleri (2017) çalışmalarında rüzgâr enerjisi üretimiyle CO₂ kullanımının birleştirildiği Power-to-Metanol modelinin fırsatlarını incelemektedirler. Bu çalışma bir rüzgâr enerjisi çiftliğinin bir metanol (MeOH) CO₂ tabanlı tesise yatırım yapma kararını optimize etmeyi amaçlayan matematiksel bir yaklaşımı tanımlar. Önerilen iş modeli, İspanya elektrik piyasasındaki rüzgâr enerjisi tahmin belirsizliğini azaltmaya yönelik bir metodolojiye dayanmaktadır. Teorik bir 400 MW rüzgâr enerjisi çiftliğinin, 175 kt/yıl maksimum üretim kapasitesine sahip bir MeOH tesisi ile eşleştirildiğini gösterir. Ürünün ton başına satış fiyatı 350 € (Euro) ve CO₂ maliyeti 35 € olarak varsayılmıştır. Elektrolizörün sürekli çalışması için her saat üretilen metanolün depolanması gerektiğinden, bu durum metanol üretiminin enerji piyasasında rekabet avantajına sahip olduğunu gösterir. Bu, rüzgâr enerjisi çiftliği ile CO₂ tabanlı tesisi arasında bir kazan-kazan ilişkisinin olduğunu vurgular. Gelecekteki çalışmalar, ekonomik koşulları daha iyi anlamak için duyarlılık analizlerini içerecek ve daha az elektrik tüketen diğer CO₂ tabanlı süreçleri de kapsayacaktır. Özetle, MeOH CCU tesisinin

entegrasyonunun avantajları belirtilmiş, ancak ham materyal fiyatlarının projeyi finansal açıdan zorladığı vurgulanmıştır. Su elektrolizörü ve CO₂ yakalama teknolojilerinin yeni ve gelişmekte olan teknolojiler olduğu, bu nedenle MeOH sentezi maliyetlerinin teknolojik ilerlemeye bağlı olduğu vurgulanmıştır [4].

Schöneberger ve diğerleri, (2015), atmosferden yakalanan CO₂'nin hammadde olarak kullanıldığı metanol sentezi sürecinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirildiği çalışmada, Güçten Metanole (Power-to-MeOH) teknolojisinin teknik ve ekonomik performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Model su elektrolizeri ve katalitik CO₂ reaktörünü birleştiren bu teknoloji, ASPEN Plus V8.0 kullanılarak simülasyonlarla analiz edilmiştir. SOEC/Metanol sürecinde, simülasyonlar, Metanol üretim maliyetinde CAPEX'in baskın olduğunu doğrulamıştır. SOEC teknolojilerindeki maliyet düşüşleri ve ömürlerindeki iyileştirmeler, maliyet azaltma faktörleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca, SOEC/Metanol tesisinin inşa hızının bu sürecin rekabetçiliğini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. PEM/Metanol sürecinde ise maliyet analizi, metanol maliyetinde OPEX'in baskın olduğunu göstermiştir, ancak elektrolizerin ömrünün iki katına çıkarılması bu değeri etkilemiştir. Elektrolizerin enerji verimliliği, metanol üretim maliyetlerini azaltma açısından kritik bir faktör olarak belirlenmiştir. Güncel teknolojilerle, PEM/Metanol sürecinin metanol maliyeti 891 €/ton, SOEC/Metanol sürecinin ise 5459 €/ton olarak belirlenmiştir. Bu maliyetler, mevcut piyasa fiyatının sırasıyla 2,5 ve 15 katına denk gelmektedir. Ancak, su elektroliz teknolojilerindeki iyileştirmelerle gelecekte metanol maliyetlerinde umut verici düşüşlerin beklenebileceği vurgulanmaktadır [5].

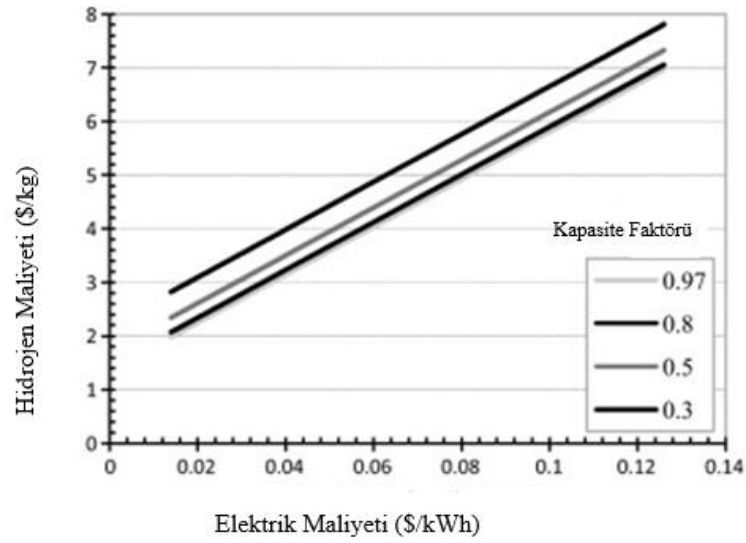
Bellotti ve diğerleri (2015) farklı yenilenebilir kaynaklardan metanol üretiminin fizibilite çalışması ve termo-ekonomik analiz çalışması yapmışlardır. Yapılan termo-ekonomik analiz, farklı senaryoları inceleyerek farklı elektrik enerjisi maliyetlerinin ve metanol satış fiyatlarının etkisini araştırdı. İtalya senaryosunda hidroelektrik kaynaktan elde edilen enerjinin en iyi ekonomik sonuçları sağladığı belirlenmiştir. Mevcut metanol fiyatında, CO₂ satın alma ile yapılandırılan tesisin sadece düşük maliyetli hidroelektrik enerjisiyle ve düşük elektrik alım fiyatında karlı olduğu görülmüştür. Ancak gelecekteki yüksek metanol satış fiyatları düşünüldüğünde, rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklarıyla yapılandırılan tesisin ekonomik olarak uygun hale geldiği belirlenmiştir. Biyogaz sekestrasyonu yapan tesisin en iyi ekonomik performansına sahip olduğu ancak CO₂ satın alma yapılandırmasının daha düşük maliyetli ve daha basit olduğu ve yüksek metanol

fiyatlarında benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar çevresel açıdan metanol üretiminde fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyonları azalttığı ve karbon vergisi dikkate alındığında ekonomik performansların daha da iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır [6].

Anita ve diğerleri, (2011), İran'da rüzgâr-hidrojen kullanımının metanol üretimi için ekonomik değerlendirme yaptıkları çalışmada metanol sentezinin sıfır karbon emisyonlu bir yaklaşımla gerçekleştirilebilirliğini ele almaktadır. Bacalardan gelen gazın geri kazanımı ile CO₂ emisyonlarını azaltma, elektrolizle yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojenin kullanımı, rüzgâr enerjisi ile çalışan elektroliz ünitesi, elektrolizden elde edilen oksijenin ototermal reaktörde kullanımı ve su elektrolizi ile depolama sistemleri üzerine odaklanan çalışma, sürdürülebilir bir entegre sistem modeli sunmaktadır. Önerilen sistem, CO₂ yakalama, geri dönüşüm ve yenilenebilir hidrojen üretimiyle birleşerek, maliyet etkin bir şekilde sıfır emisyonlu metanol üretimini sağlama potansiyeline işaret etmektedir. Entegre sistem, yılda 0,42 Mton karbondioksit emisyonunu azaltma potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve daha verimli elektrolizörlerin kullanılması durumunda, iyileştirilmiş metanol sentezi sisteminin ekonomik olabileceği öne sürülmektedir. Ancak, metanol sentez katalizörleri üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak, metanol üretiminde entegre bir yaklaşımın karbon azaltışına katkı sağlayabileceği ancak enerji maliyetleri ve katalizör geliştirmelerinin önemli faktörler olduğu belirtilmektedir. İncelenen senaryonun elektroliz sistemi için kullanılacak enerji maliyetinin 325,1 MWh güç enerjisi gerektirdiğini ve bu enerjinin maliyetinin 0,01 \$/kWh olduğunu belirtiyor. Ancak, elektrik bulunabilirliğine göre proje ölçeklendirilebileceğinden, daha düşük bir kapasiteye ölçeklendirilebileceği ifade ediliyor. Gelecek yıllarda bir ton metanol üretimi için gerekli hidrojenin maliyeti 187,5 dolar. CO₂'nin ton başına yakalanması işlemi için maliyet 41,25 dolar olacağı belirtilmiştir [7].

Tablo 1.1 Gelecek yıllarda yeşil metanol üretimi için gerekli H₂ üretim ve CO₂ yakalama maliyeti [7]

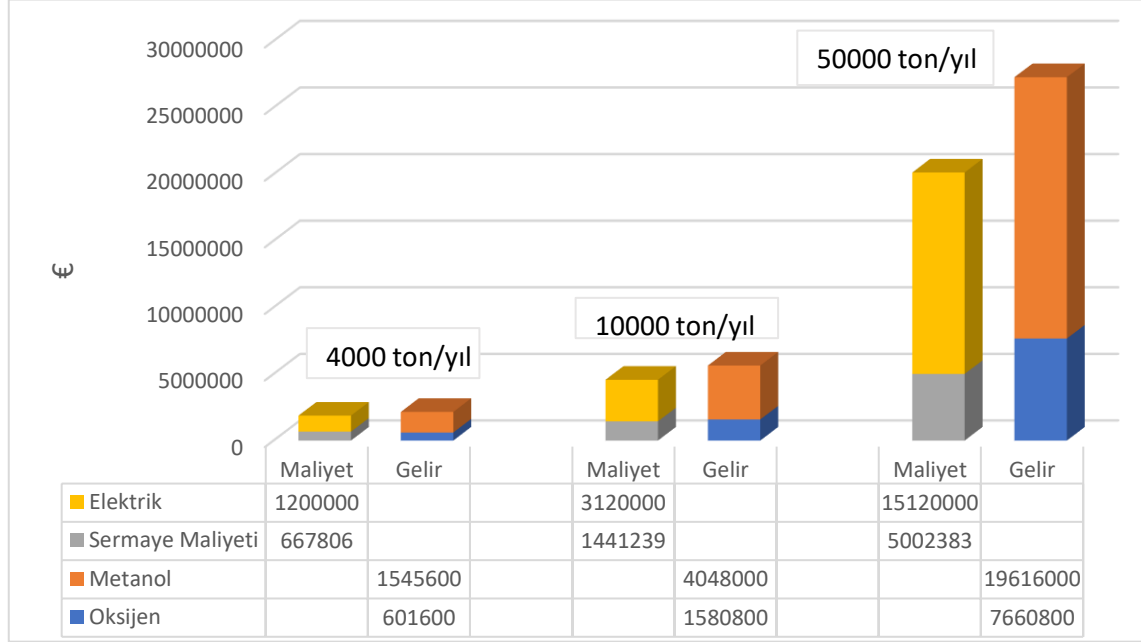
	Birim maliyet	Toplam maliyet (\$/ton Meoh)
Hidrojen	1 \$/kg = 2 \$/kmol	187,5
CO ₂ yakalama	30 \$/ton	41,25



Şekil 2.2. Elektrik maliyetleri ve Hidrojen maliyetleri gösterimi [7]

Massardo ve diğerleri, (2017), hidrojen ve yakalanan karbondioksit kullanılarak metanol üretim tesisi için fizibilite çalışmasında; Bir fosil yakıt santrali tarafından yakalanan karbondioksit ile su elektrolizi kullanılarak üretilen hidrojenin metanol sentezi için kullanıldığı, yenilikçi bir tesisin fizibilite analizini sunmayı amaçlamıştır. Termo-ekonomik analiz, MefCO₂ H₂ 020 AB projesi kapsamında gerçekleştirilmiş ve Alman ekonomik senaryosuna referans verilmiştir. Bu analiz, farklı tesis bileşenlerinin gerçek piyasa maliyetlerini ve maliyet fonksiyonlarını dikkate alarak yapılmıştır. Metanol üretimi için üç farklı tesis kapasitesi (4000, 10000 ve 50000 ton/yıl) incelenmiştir. Elektrolizörlere enerji sağlamak için elektrik enerjisi için ortalama bir maliyet öngörülmüş ve tesisin karlılığı üzerinde etkili olan en önemli parametreler vurgulanmıştır. Bu parametreler arasında oksijen satış opsiyonu, metanol satış fiyatı ve elektrolizörlerin sermaye maliyeti bulunmaktadır. Gelecekte ki teknolojik gelişmeler ve bu tür tesislerin pazarda daha fazla yaygınlaşmasıyla birlikte, elektroliz cihazları ve diğer tesis bileşenlerinin sermaye maliyetlerinin düşeceğini öngörüyor. Önümüzdeki yıllarda bu maliyet azalmasını gösteren bir eğilimi ortaya koyuyor. Özellikle büyük tesisler için, mevcut metanol satış fiyatının 400 €/ton olduğu durumda bile ekonomik sonuçların, İndirimli Geri Ödeme Süresi'nin (DPBP) 10 yıldan daha kısa olabileceğine vurgu yapmaktadır. Metanol talebinin artması ve bu nedenle piyasa fiyatının yükselmesi (450 veya 500 €/ton) durumunda, daha küçük çözümlerin bile uygulanabilir hale gelebileceğini belirtmektedir. Beklenen bir olumlu senaryoda (sermaye maliyetlerinin azalması ve

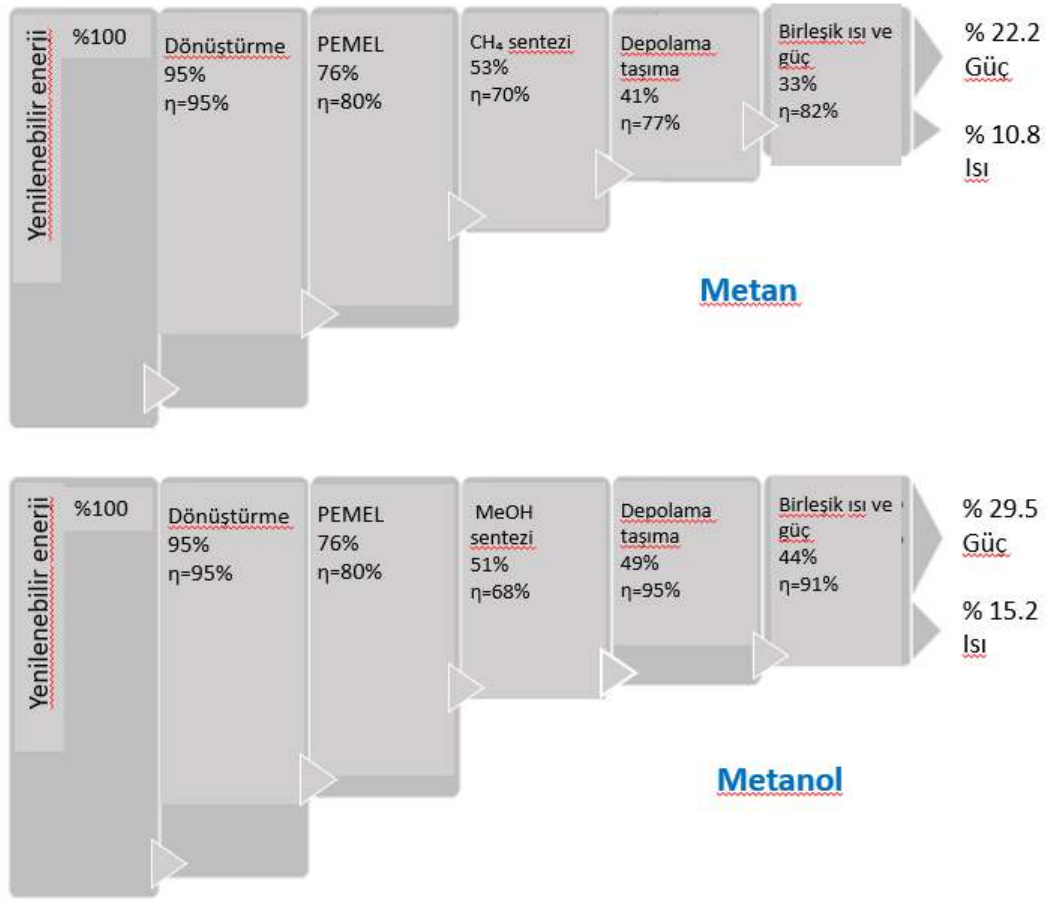
yüksek metanol satış fiyatları), DPBP'nin beş yıldan daha kısa olabileceği bir potansiyeli olduğunu ifade ediyor [8].



Şekil 2.3. CH_3OH üretim kapasitesi yıllık 4000, 10000, 50000 ton/yıl olan sistemin yıllık gelir-maliyet bütçesi [8]

100 €/ton konservatif oksijen satış fiyatıyla yapılan hesaplamalara göre, elektrik maliyetinin 0,03 €/kWh olduğu ve mevcut metanol fiyatının 400 €/ton olduğu durumda tesisin ekonomik olarak uygun olmadığı belirtilmiştir. Ancak metanol satış fiyatının 500 €/ton olduğu durumda büyük ölçekli tesisin kabul edilebilir bir çözüm olacağı ve geri ödeme süresinin 10 yıl olacağı ifade edilmektedir. 600 €/ton gibi daha yüksek bir satış fiyatı durumunda ise daha küçük ölçekli tesis konfigürasyonlarının bile ekonomik olarak uygun olabileceği belirtilmektedir [8].

Rauchle ve diğerleri, (2016), yenilenebilir enerji depolama ve kullanımı için metanol isimli çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla fosil enerji taşıyıcılarını değiştirmeye yönelik çabaların, özellikle rüzgâr ve güneşin dalgalanmalarının etkisiyle karşılaşmakta olduğuna dikkat çekmektedirler. Bu dalgalanmalar, özellikle uygun enerji depolama teknolojilerinin eksikliği nedeniyle daha belirgin hale geldiği, kimyasal enerji depolama, bu zorluğun üstesinden gelmek için umut verici bir çözüm sunması vurgulanmaktadır [9].

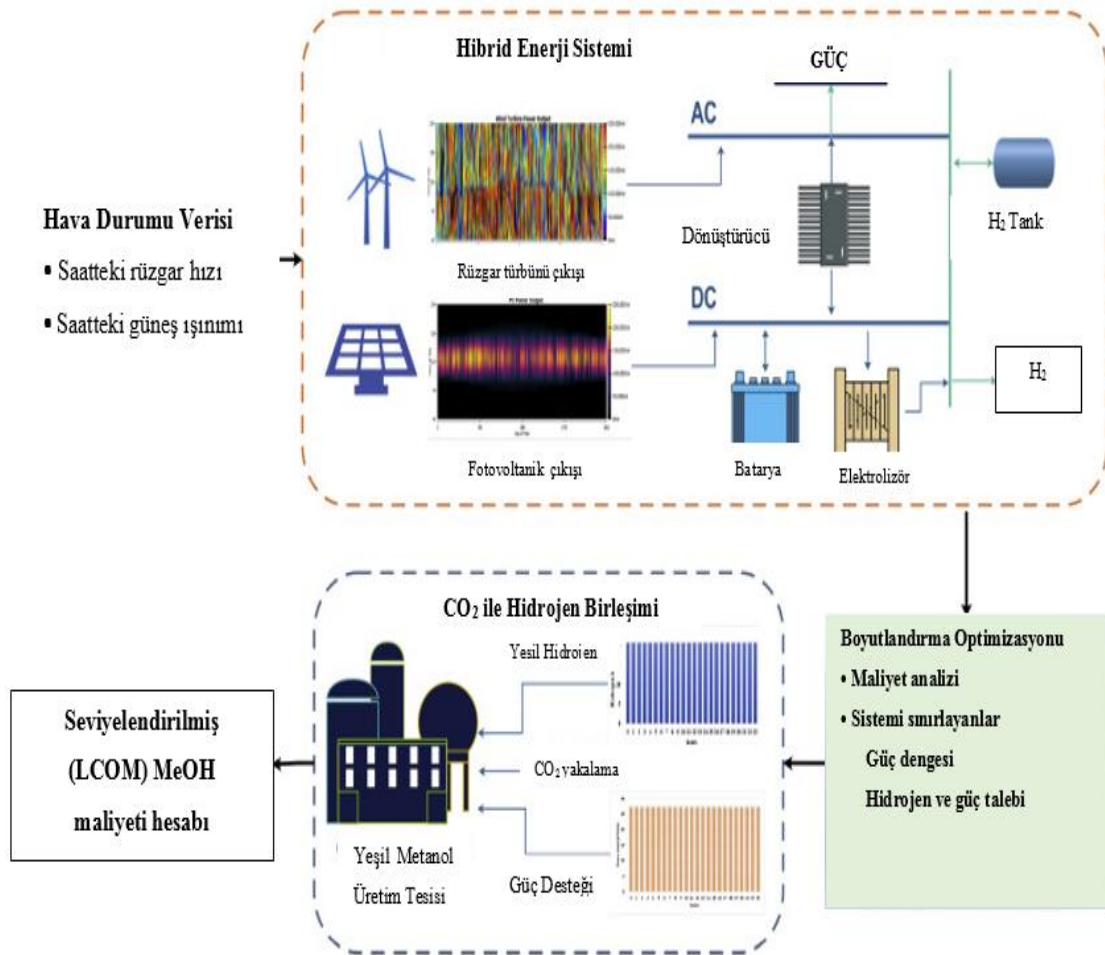


Şekil 2.4. Metan ve Metanol karşılaştırılması [9]

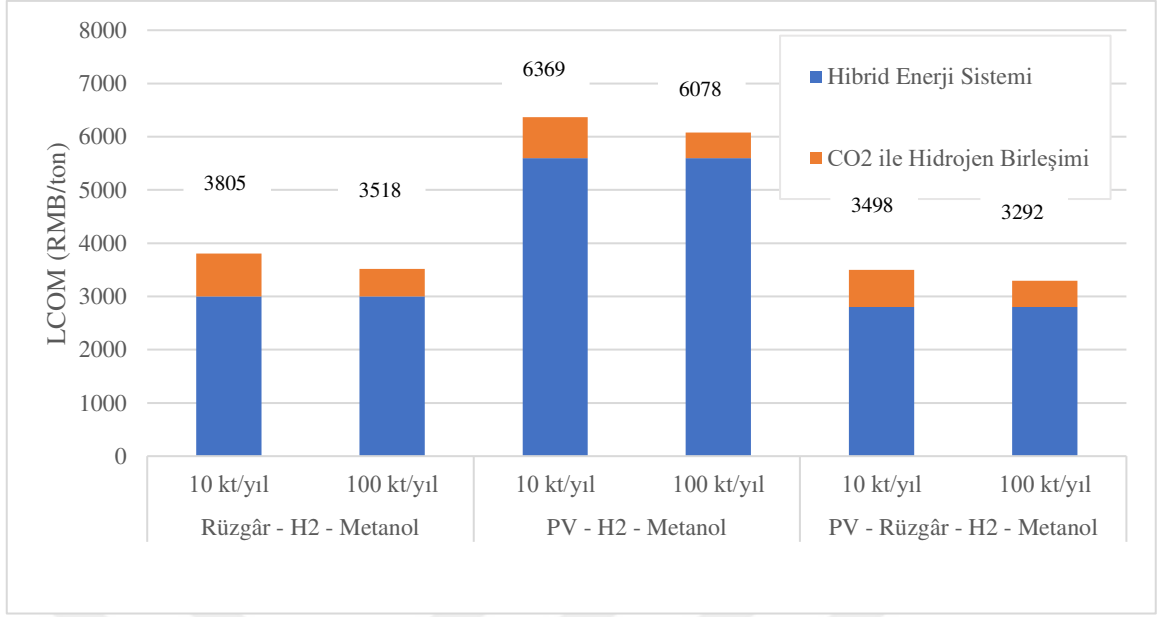
Araştırmada metan üreten güçten gaza (PtG) ve metanol formunda elektrik enerjisi depolayan güçten likite (PtL) gibi iki temel alternatif tartışılmaktadır. Ancak, genellikle her iki teknolojinin avantajları ve dezavantajları, süreçleri dikkate alınmadan ele alınmaktadır. Air Liquide tarafından yapılan bir analiz, metan ve metanol tesislerinden elde edilen işletme deneyimlerine dayanarak, her iki yaklaşım arasında önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Metanolün yüksek genel verimliliğe sahip olduğu ve evrensel bir kimyasal ve yakıt hammadde olarak kullanılma avantajına sahip olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, metanolün sadece kimyasal enerji depolama için değil, aynı zamanda fosil hammaddelerin yerine geçme potansiyeliyle ideal bir aday olduğu vurgulanmaktadır [9].

Gu ve diğerleri, (2022), Çin'de yeşil metanol tesisi için teknik-ekonomik analiz ve yenilenebilir hidrojen üretiminin en uygun tasarım modeli çalışmasında yeşil metanol tesisinin kapsamlı teknik-ekonomik analizi ASPEN Plus yardımıyla gerçekleştirilmiş ve

yenilenebilir hidrojen-elektrik üretiminin en uygun tasarımı üzerinde durulmuştur. Analiz, farklı hibrid enerji konfigürasyonlarıyla yeşil metanol tesisinin ekonomik performansını ele almış, özellikle incelenen bölge olan Ordos, Çin için PV-Rüzgâr-H₂ sistemi ve oksijen satışını içeren bir yeşil metanol tesisinin en düşük Levelized Cost of Metanol (LCOM) yani metanolün seviyelendirilmiş maliyeti (tesisnin ölçeği, enerji tüketimi, hammaddelerin maliyeti ve diğer faktörlere bağlı olarak hesaplanan seviyelendirilmiş bir maliyettir) 3498 RMB/ton-MeOH sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, bu maliyet geleneksel kömür tabanlı metanol üretim maliyetine göre yaklaşık %86 daha yüksektir [10].

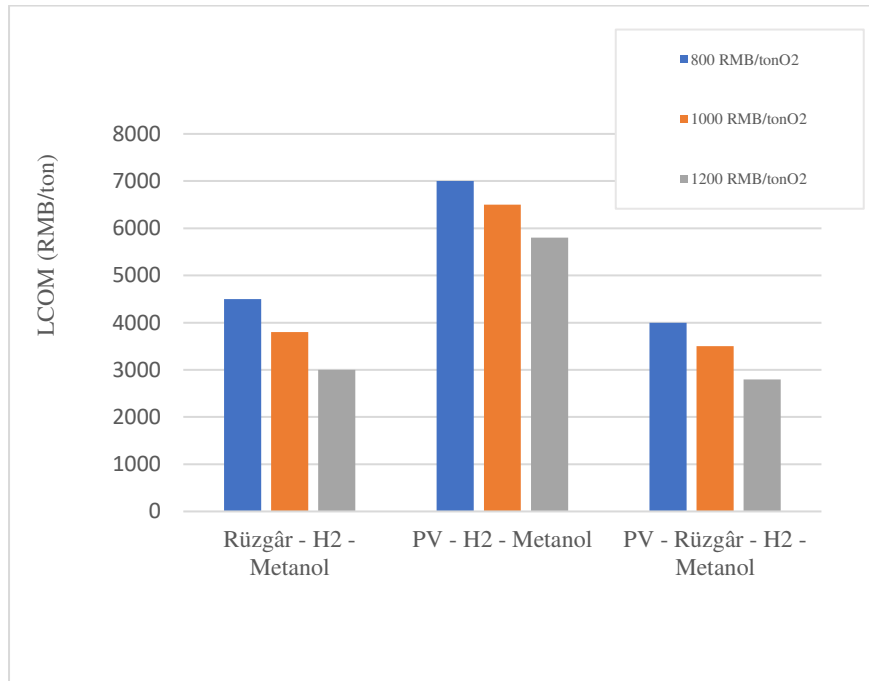


Şekil 2.5. Hibrid enerji ile yeşil metanol üretim şeması [10]

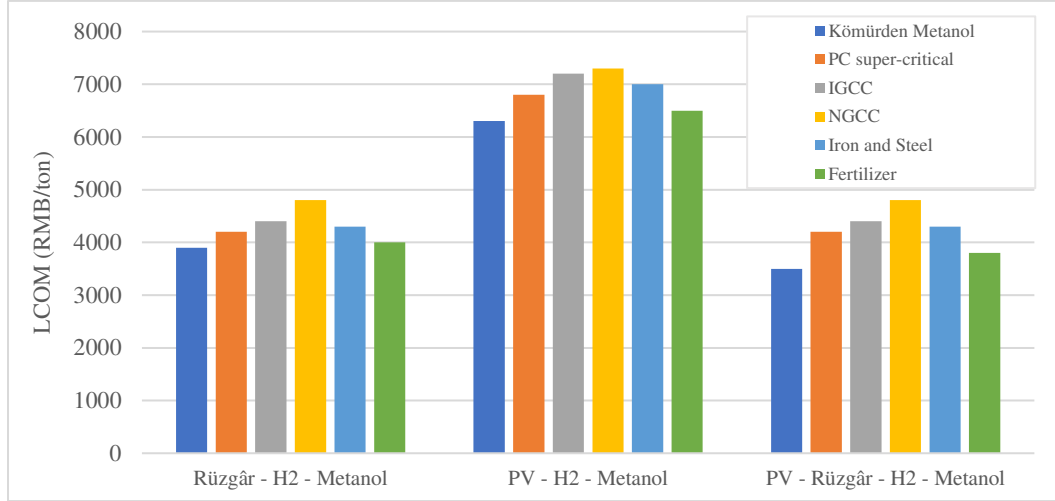


Şekil 2.6. Güneş -Rüzgâr enerjisi ile metanolün seviyelendirilmiş maliyeti [10]

Tesisteki ölçeğin LCOM üzerindeki etkisi incelenmiştir. 10 kt/yıl'den 100 kt/yıl'ye çıkarken, LCOM'un bu sistemler için sadece %5-7 azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, tesis ölçeğinin artmasının LCOM üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir [10].



Şekil 2.7. a) Oksijen satış maliyeti [10]

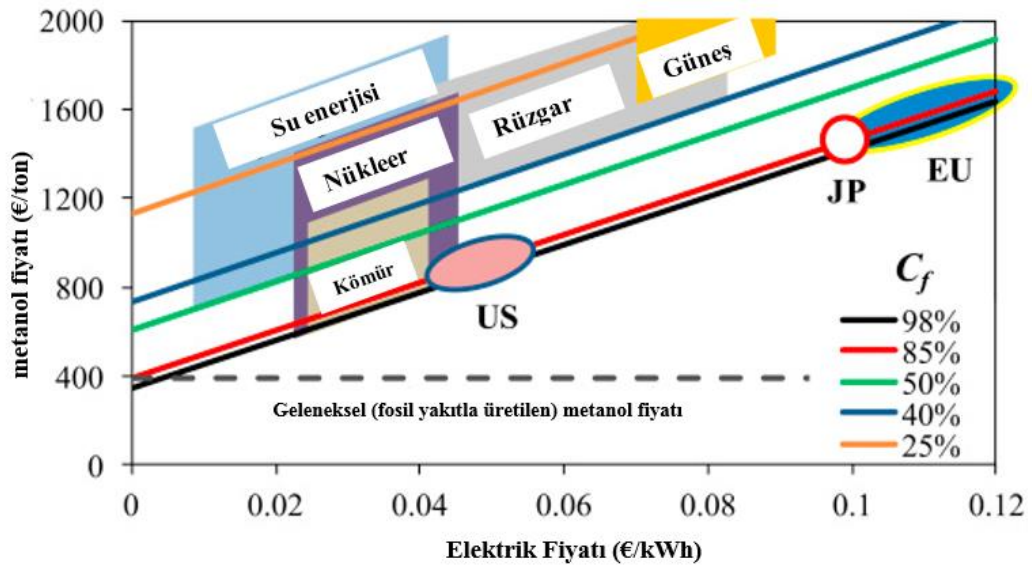


Şekil 2.8. b) Yeşil Metanol Tesisi LCOM'daki CO₂ Yakalama Kaynağı [10]

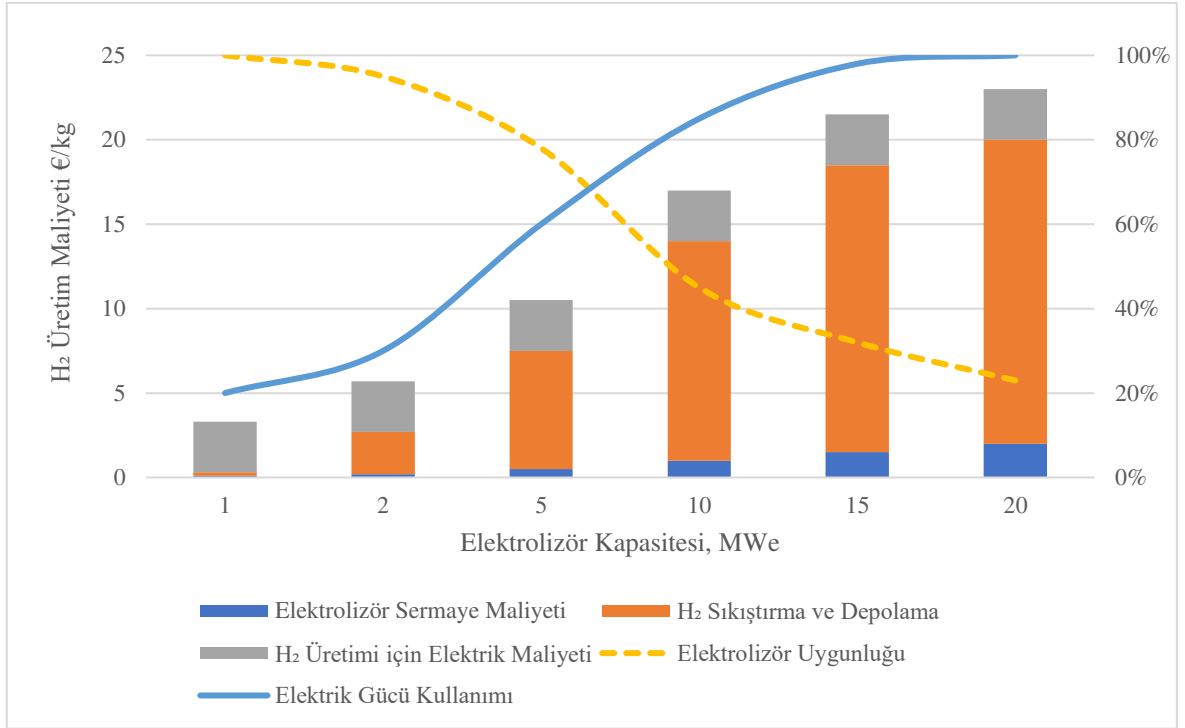
a) gösterildiği gibi, yan ürün olarak oksijenin satılmasının metanol üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkisi olduğu ifade ediliyor. Örneğin, oksijenin satış fiyatındaki 200 RMB/ton'luk bir artış, metanol maliyetini 697 RMB/ton olduğu ifade edilmektedir. b) Hangi kaynaktan elde edilen CO₂'nin kullanıldığı, yeşil metanol üretim maliyetini önemli ölçüde etkileyebilir. PV-Rüzgâr-H₂-metanol sistemi için daha ekonomik CO₂ kaynaklarının seçilmesinin, yeşil metanol tesisinin ekonomisini iyileştirmenin mümkün bir yolu olduğu ifade edilmektedir. Maliyet yapısı analizi, sermaye maliyetinin üç durumun da ana ekonomik katkı sağlayıcısı olduğunu göstermiş ve bu maliyetin %90'dan fazlasının hibrid enerji sisteminden kaynaklandığını belirtmiştir. Hassasiyet analizi sonuçlarına göre; 1) analiz edilen sistemin ekonomik ölçeğinin bu çalışmada belirgin olmadığı, 2) oksijen satış seçeneği ve CO₂ kaynağının işletme ve bakım maliyeti üzerinde önemli bir etkisi olduğu, 3) PV-Rüzgâr-H₂-metanol ve Rüzgâr-H₂-metanol sistemleri için en etkili ekonomik faktörün rüzgâr türbini maliyeti olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin maliyetinin mevcut fiyattan %50 düşmesi durumunda, PV-Rüzgâr-H₂-metanol ve Rüzgâr-H₂-metanol sisteminin LCOM'u sırasıyla %32 ve %37 azalmaktadır. Ayrıca, karbon vergisinin göz önüne alınması durumunda, yeşil metanol tesisinin geleneksel metanol tesisi ile ekonomik rekabet edebileceği belirtilmiştir. Mevcut rüzgâr türbini maliyeti ve ton başına 500 RMB kömür fiyatı altında, PV-Rüzgâr-H₂-metanol sistemi, yeşil metanol tesisinin geleneksel metanol tesisi ile rekabet edebilmesini sağlayan karbon vergisinin 512 RMB/tonCO₂'den yüksek olduğu durumda mümkün olabileceği ifade edilmektedir. Bu ifadeler, yeşil enerji kaynakları kullanılarak gerçekleştirilen

metanol üretiminin optimize edildiğini, bu sistemin ekonomik avantajlara sahip olduğunu ve karbon vergisi düşünüldüğünde geleneksel metanol üretim tesisleriyle rekabet edebilecek durumda olduğunu ifade etmektedir. Oksijenin satışı, CO₂'nin nasıl yakalandığı gibi faktörlerin de metanol maliyetini etkilediği belirtilmiştir [10].

Atsonios ve diğerleri, (2015), CO₂ hidrojenasyonu ile metanol üretimi için teknik ve ekonomik yönlerin araştırılmasını ele almışlardır. Çalışmalarında elektrik fiyatının ve kapasite faktörünün Power to Metanol konseptindeki etkilerini göstermektedir. (Şekil 2.8) Ayrıca, enerji sektörlerine özgü elektrik maliyeti ve çalışma saatleri aralıklarına dayanarak, elektrik sağlayıcısının metanol üretim maliyeti üzerindeki etkileri tasvir edilmiştir. Tesisin maksimum işletme saatlerini sağlamak, düşük kapasite faktörlerinde metanol üretim maliyetini düşük veya sıfır elektrik maliyetine sahip olsa bile önemli ölçüde artırır. Elektrik şebekesinden sağlanan ucuz enerji, CO₂'den metanol üretim konseptini rekabetçi kılmak için potansiyele sahiptir ancak bu devletin/ülkenin politikasına bağlı olarak değişen bir faktördür [11].



Şekil 2.9. Metanol üretim maliyetine elektrik ve kapasite faktörünün etkisi [11]



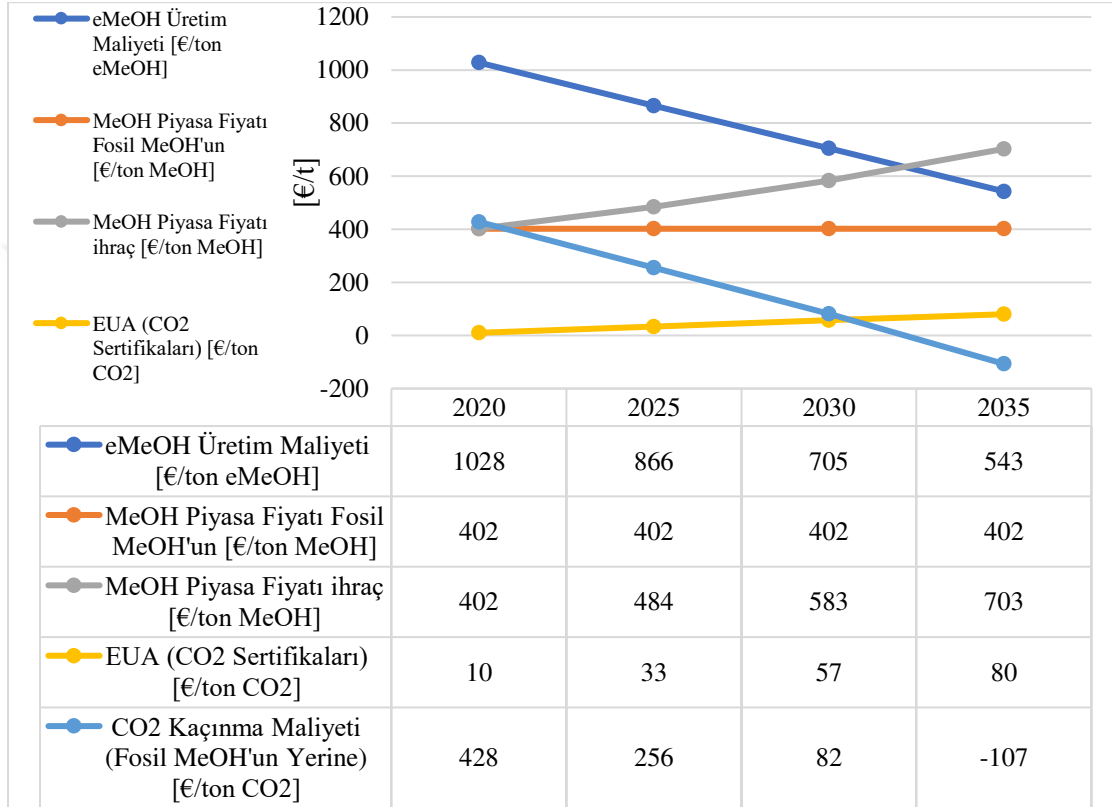
Şekil 2.10. Elektroliz tesis kapasitesi üzerine hassasiyet analizi [11]

Bu çalışmada, CO₂'den metanol üretim konseptinin ekonomik olarak cazip olmadığı belirtilmiştir. CO₂'den türetilmiş yakıtların küresel pazarda rekabetçi seviyeye ulaşabilmesi için önemli bir çaba gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma, konseptin uygulanabilirliğini etkileyen temel parametreleri belirlemeyi amaçlamış ve her bir durum için elektrik kaynağının çizimini, gaz depolama ve maliyet ayrıntıları gibi faktörleri içermektedir. Elektrik maliyeti, sistem konfigürasyonu, oksijen kullanımı ve yatırım maliyeti gibi faktörlerin, CO₂ kullanım konseptinin ekonomik başarısını güçlü bir şekilde etkilediği sonuçları çıkmıştır. Bu faktörler arasında, düzenli ve ucuz elektrik kullanımının, metanol ve etanol üretim maliyeti üzerindeki payı en aza indirme potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, CO₂ yakalama ünitesinin yerleşim yeri ve oksijenin rekabetçi fiyatla satılması gibi stratejik kararların da önemli olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, çalışma, CO₂'den metanol üretimine yönelik bu konseptin mevcut durumda ekonomik olarak cazip olmadığını ancak belirli stratejik düzenlemeler ve teknolojik geliştirmelerle rekabetçi hale getirilebileceğini öne sürülmüştür. Çalışmada enerji sistem konfigürasyonu, oksijen kullanımı ve yatırım maliyeti azalımı gibi anahtar faktörlerin CO₂'den metanol üretim konseptinin ekonomik başarısını etkilediği belirtilmiştir. Metanol tesisiyle hidrojen üretiminin yakın olmasının, H₂'nin teslimat ve

depolama maliyetlerini azaltarak lojistik avantaj sağladığı ifade edilmiştir. Ayrıca, H₂ tesisi tarafından üretilen yüksek kaliteli oksijenin endüstriyel, tıbbi ve diğer sektörlerde kullanılması ve rekabetçi bir fiyatla satılmasıyla metanol üretim maliyetinin en az %10 azaldığı belirtilmiştir. Yatırım maliyetinin metanol üretim maliyetinde önemli bir paya sahip olduğu ve özellikle alkalın elektroliz cihazı maliyetinin bu payın 2/3'ünü oluşturduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle, düşük maliyetli yeni bir elektroliz tasarımının minimum satış fiyatını önemli ölçüde azaltacağı ve yatırımın karlı olabilmesi için önemli olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, mikrobiyal elektrosentez sistemine (MES) dayanan CO₂ azaltma teknolojisinin, doğrudan elektrik akımını su ve CO₂'den ethanol gibi kimyasal enerjiye dönüştürme potansiyeline sahip olduğu, ancak bu konseptin henüz büyük ölçekte uygulanmadığı ve tam bir ekonomik değerlendirme ve karşılaştırmanın yapılmadığı belirtilmiştir [11].

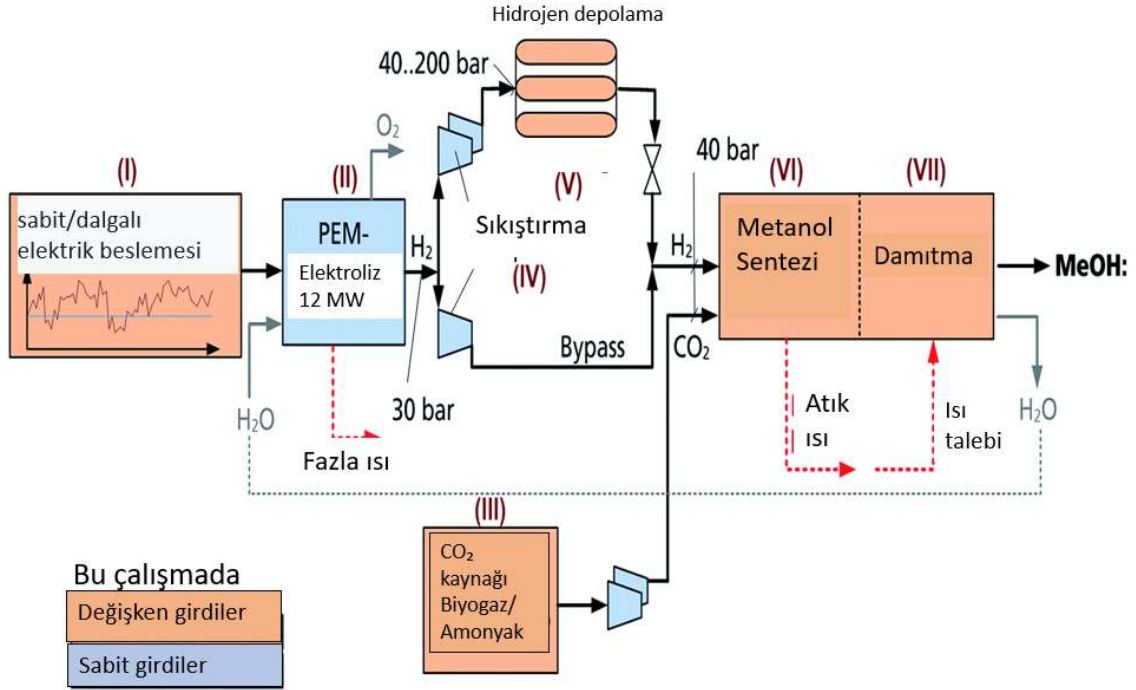
Hank ve diğerleri, (2018), yenilenebilir hidrojen ve geri dönüştürülmüş karbondioksit ile metanol üretiminin ekonomik ve karbondioksitten kaçınma maliyetinin analizi çalışmalarında; Almanya'da rüzgâr enerjisiyle üretilen yeşil metanolün (eMeOH) ton başına maliyetinin şu anda 608 ila 1453 € arasında değiştiği ortaya konulmuştur. Ancak, bu maliyetin büyük bir kısmını elektrolizör ve H₂ depolama sistemi oluşturmakta olup, işletme maliyetleri de etkileyici bir faktördür. Sadece rüzgâr enerjisiyle desteklenen bir senaryoda, eMeOH üretim maliyeti 1028 ila 1067 €/ton aralığında değişmektedir. Elektrik maliyeti ve CO₂ sertifika fiyatındaki dalgalanmalar, önemli bir maliyet azaltma potansiyeli göstermektedir. CO₂'un biyogaz veya amonyak tesisi gibi AB ile uyumlu kaynaklardan alındığı bir senaryoda, fMeOH (fosil metanol) yerine eMeOH (yeşil metanol) kullanılması, ton başına 365 ila 430 € arasında değişen CO₂ önleme maliyeti sağlamaktadır. Bu değerlendirme, Almanya'da eMeOH üretim maliyetinin 2030-2035 civarında pazar fiyatına ulaşacağını ve aynı dönemde CO₂ önleme maliyetinin bir avantaja dönüşeceğini göstermektedir. Bu iyimser senaryoda, maliyeti öncelikle hızla düşen yenilenebilir enerji maliyetleri etkilemekte, bu da Güney Amerika ve Arap ülkelerinde olduğu gibi metanol üretim maliyetini <500 €/ton seviyesine getirme potansiyeline sahip olduğu ve artan yenilenebilir enerji katkısı ve dalgalı enerji arzına yönelik ekonomik çözümlerin gerekliliğini ve büyük kapasiteli ve etkili elektrik depolama teknolojilerinin önemi vurgulanmaktadır. Elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşümü, temiz yakıtların üretilmesine ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağladığı görülmüştür. Mobilite sektöründeki sıvı yakıtların önemi,

enerji üretimi ve kullanımının ayrılmasıyla birleştirilebilir ve CO₂ dönüşümü temelli yaklaşımlar, ulusal ve uluslararası emisyon azaltma hedeflerine hizmet edebileceği vurgulanmıştır. Şekil 2.10. eMeOH'un metanol piyasa fiyatındaki artışa karşı gelişimini karşılaştırarak, pazar paritesinin tahminen 2032 civarında gerçekleşeceğini göstermektedir [12].



Şekil 2.11. Fosil metanol, yeşil metanol üretim maliyeti ve CO₂ kaçınma maliyetinin gelecekteki gelişimine dair tahmin [12]

Çalışma off-grid (şebeke bağlantısız) rüzgâr enerjisinin eMeOH (yeşil metanol) üretimi için umut verici olduğunu ancak izole rüzgâr enerjisi sistemlerinde ve büyük H₂ depolaması olmadan yüksek kapasite kullanımını garanti edemediğini belirtilmiştir. Off-grid yenilenebilir PtL süreçleri için rüzgâr enerjisinin fotovoltaiik veya güneş termal elektriklerle birleştirilmesi ile daha yüksek kapasite kullanımının sağlanması gerektiğini ifade ediyor. Küresel düşünüldüğünde, daha yüksek güneş ışınlımına sahip bölgelere taşınmanın veya güvenilir rüzgâr enerjisi bölgelerine yerleşmenin düşük maliyetli YEE tedarikini sağlayabileceğini vurgulanmıştır [12].



Şekil 2.12. Power-to-Liquid (PtL) süreci, yenilenebilir enerji, su elektrolizi ve geri dönüştürülmüş karbondioksit kullanarak metanol üretimi [12]

Boreum ve diğerleri, (2021), yenilenebilir enerjiye dayalı su elektrolizi ile yeşil metanol sentezi için ekonomik eşdeğerlik analizi çalışmalarında; günlük 100 metrik tonluk bir metanol üretim kapasitesi için yapılan bir teknik-ekonomik analizde, alkalin su elektrolizi (AWE), polimer elektrolit/proton değişim membranı su elektrolizi (PWE) ve katı oksit yüksek sıcaklık elektrolizi (SOE) gibi farklı su elektrolizi tiplerinin yeşil metanol üretimi için yöntemler olarak değerlendirildiği belirtilmiştir. Doğrulanmış işlem modeline dayanarak, 100 metrik ton/gün MeOH üretim kapasitesi için optimize edilmiş işletme koşulları belirlendi. İşlem simülasyonu sonuçlarına dayanarak, birim yeşil metanol üretim maliyetinin gri metanol ile eşit veya daha düşük olduğu zaman olan geçiş noktasını 2050'ye kadar bulmaya yönelik ekonomik bir denge analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, AWE, PWE ve SOE kullanarak yeşil metanol üretimi için birim MeOH üretim maliyetleri belirlenmiş ve bu maliyetler solar fotovoltaik tabanlı yenilenebilir elektrik kullanılarak elde edilmiştir. SOE kullanılarak yeşil metanol üretimi için MeOH denge noktasının 2044'te gerçekleşebileceği belirtilmiştir. Bu çalışma, ekonomik açıdan yeşil MeOH üretiminin olası olduğunu ve su elektrolizi teknolojisinin sürekli gelişimi ve düşük maliyetli elektriğin önemli olduğunu öne sürülmektedir [13].

Bowker, (2019), CO₂ hidrojenasyonundan metanol sentezi çalışmasında gelecekte fosil yakıtların kullanımını azaltma ve daha sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme eğilimini vurgulanmaktadır. Hidroelektrik, rüzgâr ve fotovoltaik gibi güneş enerjisi türlerine odaklanmak, ancak bu kaynakların değişken doğası nedeniyle enerji depolama ihtiyacını ortaya çıkardığını belirtilmektedir. Bu depolama ihtiyacını karşılamak için enerjiyi hidrojen üretimi yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürmek önemli bir yöntem olarak görülmektedir. Mevcut düşüncenin elektrolitik üretim olduğu, ancak gelecekte bu işlemin foto katalitik su bölünmesi yoluyla gerçekleştirilebileceği ifade edilmektedir. Hidrojenin bu üretim şeklinin, metanol veya amonyak gibi enerji yoğun sıvı formlarda depolanabileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca, endüstriyel metanol sentezi için mikroskobik karbon kaynağının CO₂ olduğu, ancak geleneksel ve yeni tip katalizörler kullanılarak CO₂ ve hidrojenin birleştirilerek metanol üretilabileceği incelenmiştir. Çalışma bu süreçleri örneklerle atmosfere doğrudan girebilecek CO₂ ve sürdürülebilir şekilde üretilebilecek hidrojen kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaları özetlemektedir. Bu alanda hızla gelişen bir bilim olduğu ve gelecekte yeni fikirler ve süreçlerin geliştirileceği vurgulanmaktadır [14].

Matzen ve diğerleri, (2015), Rüzgâr enerjisinin kimyasal depolanması için yenilenebilir metanol üretimi çalışmasında; rüzgâr enerjisi tabanlı elektrolitik hidrojen üretimi, biyoetanol tabanlı karbondioksit yakalama ve sıkıştırma ve doğrudan metanol sentezini içeren bir entegre tesisin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. ASPEN Plus simülasyonu kullanılarak, tesisin günlük 97,01 metrik ton metanol ürettiği, bunun için günlük 138,37 metrik ton CO₂ ve 18.56 metrik ton H₂ kullandığı modellenmiştir. Entegre tesisin ekonomik analizi için çeşitli hidrojen üretim maliyetleri ve metanol satış fiyatlarına göre iskontolu nakit akış diyagramı kullanılmıştır. Çalışmanın fizibilite analizi, ekonomik ve sürdürülebilirlik göstergelerini içeren çok kriterli bir karar matrisine dayanmakta ve yenilenebilir ve yenilenemez metanol üretimini karşılaştırmaktadır. Yenilenebilir metanolün genel enerji verimliliği yaklaşık %58'dir ve karbonun sabitlenmesi, bir kilogram metanol başına yaklaşık 1,05 CO₂ emisyonu azaltmaktadır. Elektrolitik hidrojen üretim maliyeti, entegre tesisin ekonomisine en büyük katkıyı sağlamaktadır. Çok kriterli dayalı fizibilite analizi, yenilenebilir metanol üretiminin fizibil olabileceğini göstermektedir [15].

Sollai ve diğerleri, (2022), yeşil hidrojen ve yakalanan CO₂ kullanılarak yenilenebilir metanol üretimi tekno-ekonomik çalışmasında yenilenebilir metanol (e-

metanol) üretimi için tasarlanmış bir güçten yakıt tesis konfigürasyonunun çalışmasını sunmayı amaçlamaktadır. Tesis, yeşil hidrojen ve yakalanan karbondioksit kullanarak saatte 500 kg yenilenebilir metanol üretmeyi hedeflemektedir. Hidrojen, su elektrolizi kullanılarak aşırı miktarda yenilenebilir elektriğin kullanılmasıyla elde edilmektedir. Karbondioksit ise geleneksel bir enerji santralinin bacalarındaki egzoz gazından amine tabanlı bir CO₂ absorpsiyon sistemi kullanılarak ayrıldığı varsayılmaktadır. Süreç modellemesi için Aspen Plus aracından destek alınarak tüm tesis bölümleri ve genel sistemler simüle edilmiştir. Süreç optimizasyonu sonrasında, ticari ölçek deneyimlerinden elde edilen sermaye ve işletme maliyetleri temel alınarak ve 20 yıl ömür süresi varsayılarak detaylı bir ekonomik analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda metanolün seviyelendirilmiş maliyeti (LCOM), 960 €/ton (yaklaşık 175 €/MWh) olarak hesaplanmıştır. Analiz, teknolojinin mevcut koşullarda ekonomik açıdan rekabetçi olmadığını, LCOM'nin uluslararası piyasada mevcut metanol fiyatının (450 €/ton) iki katından fazla olduğunu göstermektedir. Ancak, çalışma, sürecin yeni Avrupa politikalarının bir sonucu olarak orta vadeli bir gelecekte rekabetçi olması beklenmektedir. Ayrıca, LCOM'nin özellikle elektrik fiyatı, Elektrolizör sermaye maliyeti ve tesisin kapasite faktörü gibi faktörlere duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır [16].

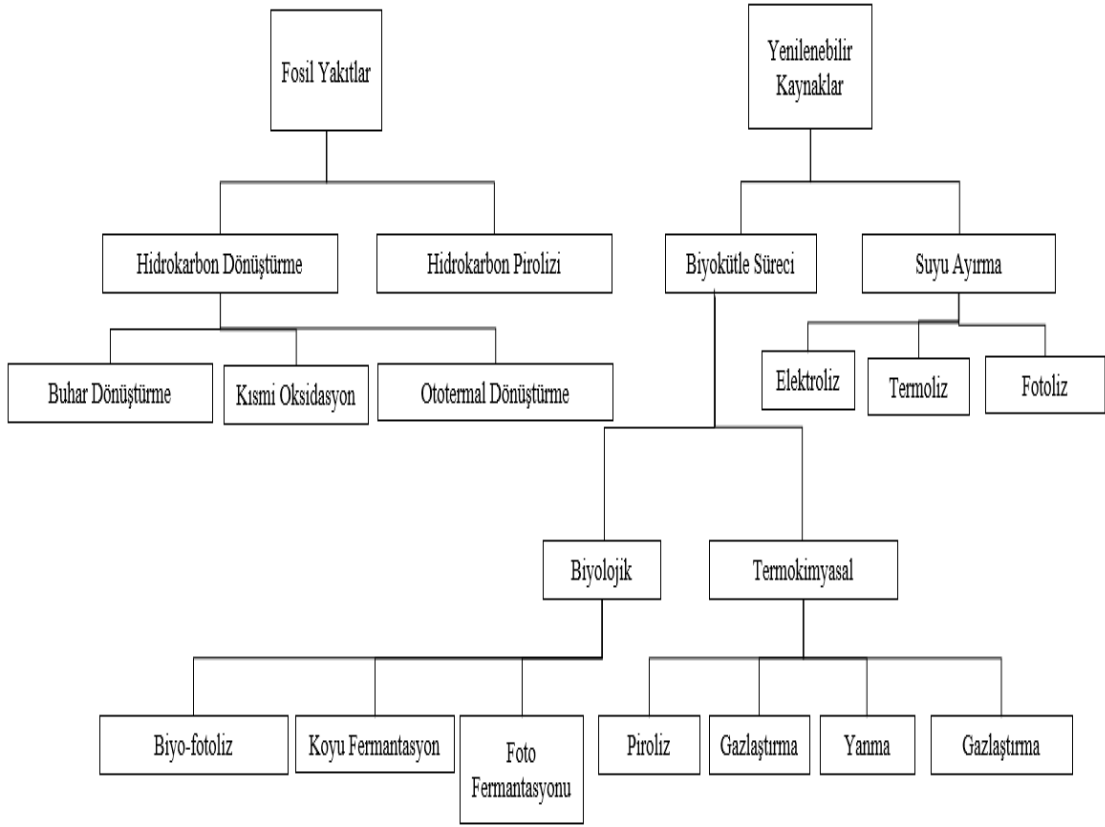
Tozlu, (2022), biyogazdan yakalanan CO₂'nin hidrojenasyonu ile sentetik bir yakıt üretim tesisi için teknik-ekonomik değerlendirme çalışmasında biyogazdan elde edilen CO₂'nin hidrojenasyonu kullanılarak sentetik yakıt üretim tesisinin termodinamik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Metanol üretimi, PEM elektrolizörü ve şebekeye bağlı güneş fotovoltaik modüllerin yardımıyla sağlanan hidrojen kullanılarak hedeflenmiştir. CO₂, bir atık su arıtma tesisi tarafından üretilen biyogazdan su yıkama ünitesi yöntemi ile yakalanmıştır. PV panelleri tarafından üretilen gücün metanol üretimi için gereken toplam gücün 2923 kW olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, günlük metanol üretimi 1674 kg olarak bulunmuştur. Elektrik, hidrojen ve metanol üretim maliyetleri sırasıyla \$0,043 (kWh⁻¹), \$3,156 kg⁻¹ ve \$0,693 kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Güneş ışığı, reaktörden elde edilen metanol verimi ve PEM aşırı gerilimleri, ürün maliyetini etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, uygun metanol üretim maliyetleri ve makul yatırım gereksinimleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, emisyonların azaltıldığı bir ortamda biyogazın zenginleştirilmesi, kombine tesisin verimliliğini arttırabileceği ifade edilmiştir [17].

Nguyen ve Zondervan, (2019), yakalanan CO₂ ile yapılan metanol üretiminin çevresel ve ekonomik değerlendirmesi çalışmalarında ele alınmıştır. CO₂ kullanılarak metanol üretimi için üç farklı süreç (hidrojenasyon, bi-reforming, tri-reforming) önerilmiş, simüle edilmiş ve farklı kapasitelerde (300, 1500, 3500 ton/gün) optimize edilmiştir. Aspen Plus kullanılarak hidrojenasyon sürecine ait bir akış şeması modeli oluşturulmuş ve yüksek basınçlı termodinamik özellikler kullanılarak değerlendirilmiştir. CO₂ tabanlı teknolojilerin yıllık yatırım ve işletme maliyetleri detaylı bir şekilde hesaplanmış ve çevresel ve ekonomik etkiler karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, çevresel sürdürülebilirlik açısından, hidrojenasyon tekniği, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojenle metanol üretimi için diğer yöntemlere göre daha etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bi-reforming ve tri-reforming süreçleri, yıllık ortalama %37 ve %39 daha düşük maliyetle daha ekonomik ve düşük CO₂ emisyonlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle, çevresel etkiler ve ekonomik maliyetler göz önüne alındığında, bi-reforming ve tri-reforming süreçleri daha çekici görünebilir. Bu araştırma, CO₂ kullanımıyla metanol üretiminde çeşitli süreçlerin kapsamlı bir değerlendirmesini sunarak, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faktörler arasında denge sağlamayı amaçlamaktadır [18].

Battaglia ve diğerleri, (2021), CO₂ yakalama ve hidrojenasyon ile metanol sentezi, termal entegrasyon, enerji performansı ve tekno-ekonomik değerlendirme yaptıkları çalışmalarında; yenilenebilir elektrik enerjisi kullanılarak üretilen yeşil metanolün (MeOH) kimyasal işlemler endüstrisinden karbonu uzaklaştırmak için bir taşıyıcı olarak kullanılma fırsatı değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, ASPEN kullanılarak kömürle çalışan bir enerji santralinden yakalanan 1,25 ton/saat CO₂'nin, su elektrolizi ile üretilen yeşil hidrojen aracılığıyla saatte 788 kg metanola dönüştüren entegre bir sistem değerlendirmiştir (10MW). "Power-to-MeOH" yöntemi, tesisin enerji ve kütle dengelerini belirlemek ve enerji ile çevresel performanslarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Karbon yakalama, su elektrolizi ve metanol sentezi gibi çeşitli bölümlerin işleyişini simüle etmek için detaylı bir model geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, metanolün seviyelenmiş maliyeti (LCOM) tahmin edilmiştir. Hidroelektrik enerji kullanımı durumunda, LCOM 874€/t ile 1356€/t arasında değişmekte ve bu da MeOH'un gelecekteki piyasa fiyatına (655-1135€/t) yakın bir değer olup özellikle hidroelektrik enerji maliyetlerinin daha düşük olduğu durumlarda (26,2 €/MWh) iyileştirme potansiyeli bulunduğunu vurgulanmaktadır [19].

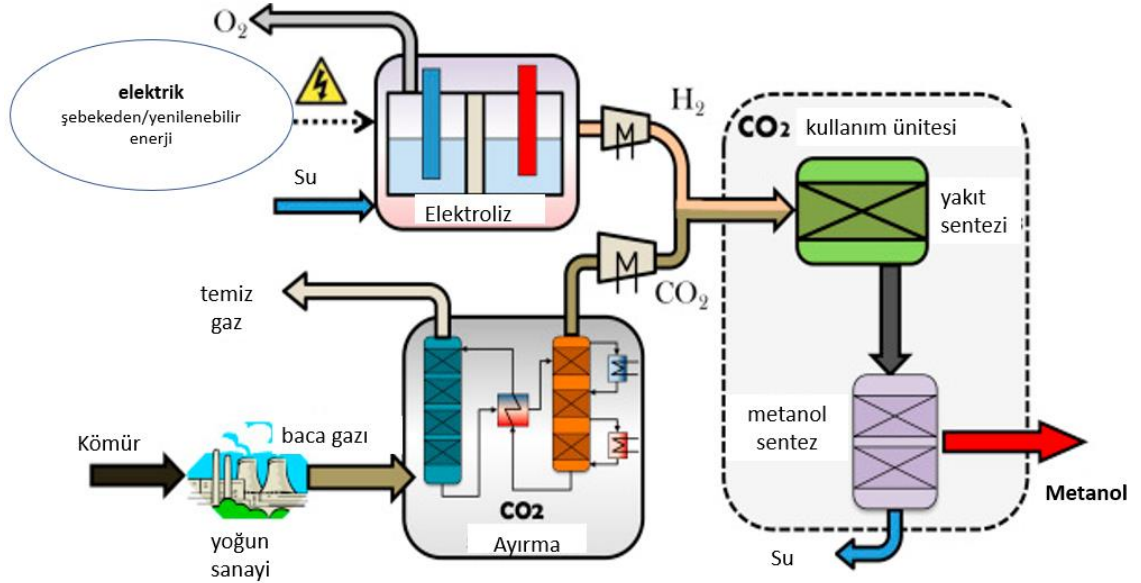
Ma ve diğerleri, (2022), baca gazından elde edilen karbondioksitin metanol üretimi için kullanılması, sistem tasarımı ve değerlendirmesi çalışmasında bir metanol sentezi sistemi geliştirmeyi amaçlanmaktadır. Sistem, bir sıvı katalitik çatlama ünitesinin egzoz gazından karbondioksit, ayrıca kuru gazdan hidrojen ve metan toplayarak karbon emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Aspen Plus yazılımı kullanılarak karbondioksit-dry gazdan metanol sistemi modellenmiş ve sistemin enerji performansı, karbondioksit azaltımı ve ekonomik performansı değerlendirilmiştir. Çalışma, bu teknolojinin yılda 2,8 milyon ton CO₂ azaltımı sağlayabildiğini ve sıvı katalitik çatlama ünitelerinin enerji verimliliğini %2,80 artırarak geleneksel kömürden metanol üretimine göre daha maliyet etkin olduğu belirtilmiştir. Rafineriler, bu yöntemin enerji ve çevresel avantajlarından faydalanabilir, çünkü orijinal sıvı katalitik çatlama işleminin enerji verimliliğini büyük ölçüde artırırken sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Geliştirilen sistemin ürün maliyeti 1746 Yuan/t olarak belirlenmiş ve bu Çin'deki tipik metanol fiyatından (yaklaşık 2500 Yuan/t) daha maliyet ucuz olduğunu göstermektedir [20].

Nikolaidis ve Poullikkas, (2017), hidrojen üretim süreçlerine karşılaştırmalı genel bir bakış sunulmaktadır. İklim değişikliği ve fosil yakıt kaynaklarının azalması, hidrojen teknolojisine ilgiyi artırmıştır. Bu çalışmada, doğal gaz, kömür, nükleer enerji, biokütle, güneş ve rüzgâr gibi çeşitli enerji kaynaklarından hidrojen üretimi süreçleri, karşılaştırmalı bir genel bakışla incelenmiştir. Termokimyasal piroliz ve gazlaştırma gibi ekonomik yaklaşımlar, büyük ölçekte rekabet avantajına sahip olarak öne çıkmaktadır. Ancak, geleneksel yöntemler hala 1,34-2,27 \$/kg maliyet aralığı ile hidrojen üretiminde öncü bir rol oynamaktadır. Biyolojik yöntemler umut vaat etmekle birlikte, üretim oranlarını artırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Suyu hidrojen ve oksijene ayırma teknolojileri, düşük dönüşüm verimlilikleri ve yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle geleneksel yöntemlerle rekabet etmekte zorlanmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin geliştirilmesi ve H₂ depolama, taşıma ve kullanımı konularında yapılan önemli yeniliklerle, ulusal enerji bağımsızlığının artırılması ve yeşil hidrojenin geleneksel enerji kaynaklarına üstünlük sağlaması beklenmektedir [21].



Şekil 2.13. Hidrojen üretim yöntemleri [21]

3. METANOL ÜRETİMİNDE YÖNTEM VE SÜREÇLER



Şekil 3.1. Yeşil metanol üretim süreci [11]

3.1. Sudan Hidrojen Üretimi ve Elektroliz Teknolojileri

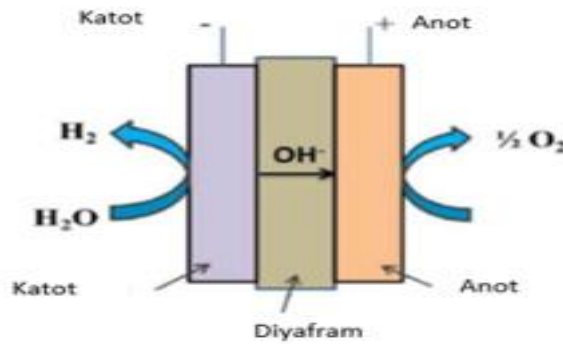
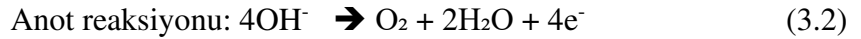
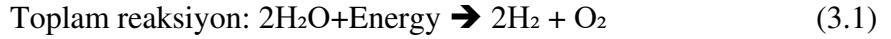
3.1.1. Alkalın su elektroliz teknolojisi (AWE)

Alkalın su elektroliz teknolojisi, hidrojen üretimi için yaygın ve olgun bir teknolojidir. Bu teknoloji, 120 yıldan fazla bir süredir birçok üretim tesisi tarafından kullanılmaktadır. Ekonomik ve dayanıklı olmasına rağmen, üretilen hidrojenin saflığı, yüksek işletme giriş gücü ile düşük akıntı yoğunluğu gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Alkalın elektroliz, genellikle oda sıcaklığında ve en fazla 80 °C'de çalışır. Kullanılan elektrolit, %30 ağırlığında potasyum hidroksit (KOH) içeren bir sulu bazik çözeltisidir. İyon değişim membranı, katodu ve anodu ayırarak üretilen hidrojen ve oksijen gazlarını ayrı depolama tanklarında saklanmaktadır. Şekil 3.2'de alkalın elektroliz teknolojisi detaylı bir şekilde gösterilmektedir [28].

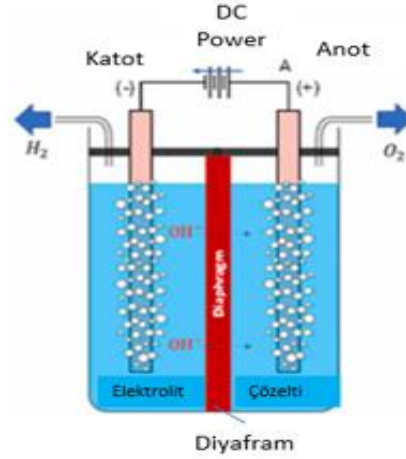
Alkalın elektroliz teknolojisinde, sermaye harcamaları (CAPEX) ve yıllık işletme harcamaları (OPEX) değerlerinin, alkalın elektrolizör tesisinin boyutu ve kapasitesine bağlı olduğu belirtilmektedir. Örneğin, 1 MW'den küçük bir alkalın elektrolizör tesisi için CAPEX, 40 MW civarındaki bir tesise göre kilovat başına sırasıyla 1250 euro ile 700 euro arasında değişmektedir. Alkalın elektrolizör tesisinin OPEX'inden bahsedildiğinde,

ortalama bir boyuttaki bir tesisi için bu değer yaklaşık olarak %7'dir. Ancak teknik yaklaşımı iyileştirmek ve üstün dayanıklılık sağlamak için devam eden araştırma faaliyetleri göz önüne alındığında, bu değer 2030 yılına kadar %2'ye düşme olasılığı bulunmaktadır [28].

AWE teknolojisi, PEM elektroliz gibi yüksek maliyetli malzemelere ihtiyaç duyulmadığı için maliyet açısından uygun bir elektroliz teknolojisi olarak kabul edilir. Ancak, bu maliyet avantajı, AWE sistemlerinin genellikle düşük akıntı yoğunluklarına sahip olmalarından kaynaklanan verimlilik sorunlarına yol açar. Ayrıca, AWE hücresinde kullanılan diğer önemli bir bileşen, elektrotlar arasında bir ayraç olarak işlev gören bir diaframdır. Bu diafram, üretilen gazları ayrı bölümlerine sınırlar ve üretilen gazlar arasındaki karışımı en aza indirir. Ancak, bu diaframın hücre içindeki elektriksel dirence katkıda bulunarak verimliliği azalttığı belirtilmektedir. Ayrıca, 100–110 °C' de geri dönüşü olmayan bozulmalara yol açtığı için AWE hücresinin çalışma sıcaklığını 90 °C'ye sınırladığı ifade edilmektedir. Geleneksel olarak, bu tür direnci önlemek ve hidrojen ve oksijenin etkili bir şekilde üretilmesini sağlamak için kalın amiant levhaları diafram olarak kullanılmıştır. Ancak bu durum, genel ohm direncinde bir artışa neden olur ve bu tür bir direncin kaçınılmaz olduğunu göstermiştir [27].



Şekil 3.2. Suyun Alkalın elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [27]

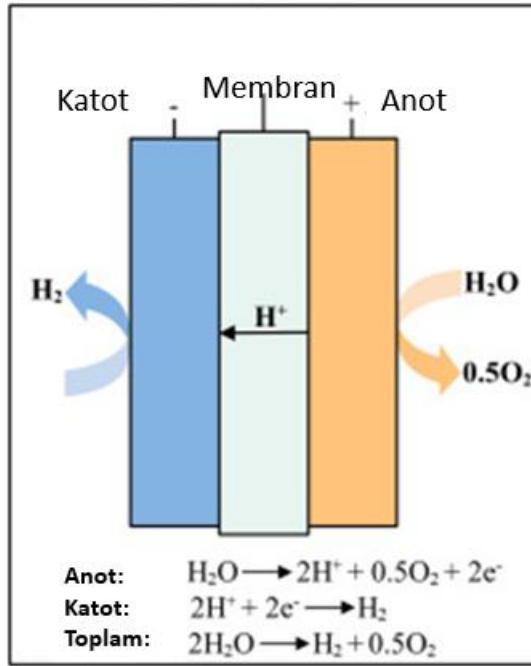
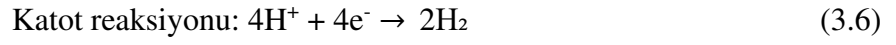
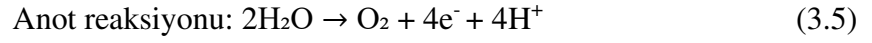


Şekil 3.2. (Devam) Suyun Alkalın elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [28]

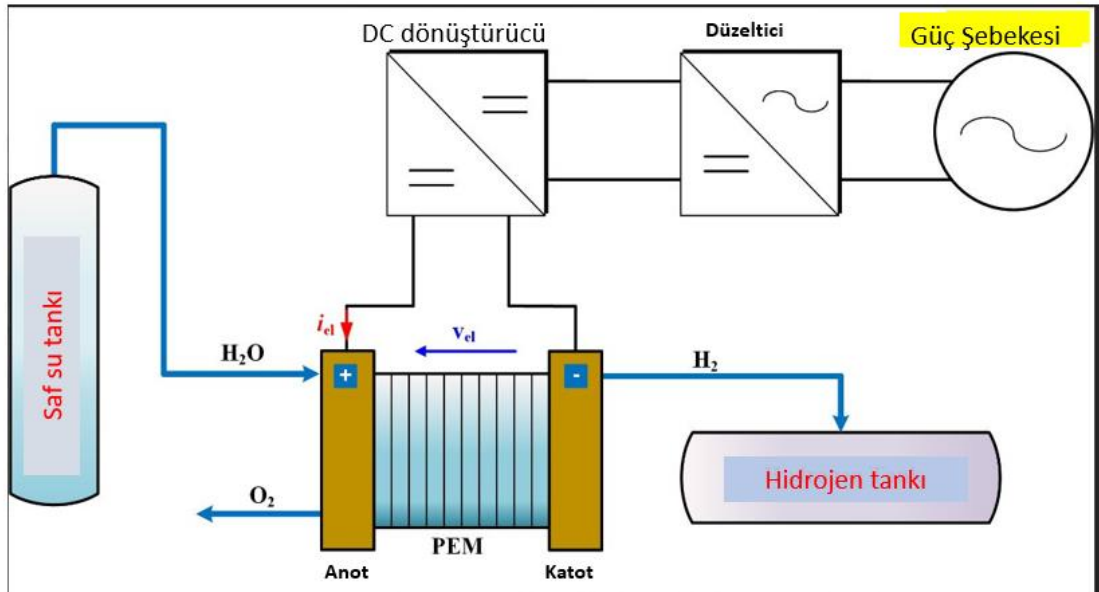
3.1.2. Proton Exchange Membrane (PEM) ile suyun elektrolizi

Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle rüzgâr veya güneş enerjisi gibi sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi kullanılarak PEM (Proton Exchange Membrane) elektroliz yapılır. Bu süreç, temiz ve sürdürülebilir hidrojen üretimini sağlar. PEM teknolojisi, yaygın olarak kullanılan bir hidrojen üretim yöntemidir. PEM elektrolizörlerinde, su elektrokimyasal reaksiyonla hidrojen ve oksijen olarak ayrılır. Bu reaksiyonda hidrojen ve oksijen sırasıyla katotta ve anotta üretilir. Su, anoda pompalanarak oksijen (O_2), protonlar (H^+), ve elektronlara (e^-) ayrılır. Protonlar, proton iletken membran aracılığıyla katoda taşınırken, elektronlar anottan dış güç devresi kullanılarak alınır ve reaksiyon için gerekli hücre voltajını sağlar. Sonuç olarak, elektronlar ve protonlar katotta birleşerek hidrojen üretilir. Aşağıdaki resimlerde ifade edilmiştir.

Bu teknolojinin temeli, proton ile iletken polimer membranının kullanımına dayanır. Membran, hidrojen ve oksijen reaksiyon bölmelerini ayırırken aynı zamanda elektrotlar arasındaki iyonik iletişimi sağlar. Değerli metal elektrotlar, genellikle platin gibi, elektroliz reaksiyonlarını katalize eder ve gaz üretimi bu elektrotların yüzeyinde gerçekleşir. Bu sayede, PEM elektroliz hücresi, suyun elektrokimyasal ayrışmasını sağlayarak hidrojen ve oksijen üretimini mümkün kılar.



Şekil 3.3. Suyun PEM elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [3]



Şekil 3.4. Suyun PEM elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [24]

PEM elektroliz yöntemi, suyun asidik bir elektrolit içerisinde ayrıştırılması prensibine dayanır. Genellikle perflorine edilmiş katı polimerden yapılan ince bir membran kullanılır. Bu membran, iki katalitik katman ile kaplanmıştır: katot üzerindeki ilk katman, hidrojen evrim reaksiyonu (HER) için platin içerirken, anot üzerindeki ikinci katman oksijen evrim reaksiyonu (OER) için iridyum dioksit içerir. PEM hücresi konsepti, 1950'lerde Grubb tarafından tanıtılmıştır. Geleneksel alkalın su elektrolizine göre daha kompakt olan PEM, yüksek akım yoğunluklarında çalışabilir. Çalışma koşulları genellikle 50 °C ile 80°C ve 2 ile 30 bar arasındadır. Araştırma ve geliştirme faaliyetleri, sistem verimliliğini artırmak için daha yüksek işletme sıcaklıkları (150 °C) ve basınçlar (400 bar) hedeflenmektedir. Tipik olarak, PEM su elektrolizörlerinin enerji tüketimi, 90 °C ve 1 A/cm² akı yoğunluğunda 3,8 kWh/Nm³ H₂ (1,67-1,72 V) aralığındadır. Bu teknoloji, hidrojen sıkıştırmasını önlemek ve aşırı gerilimleri azaltmak amacıyla yapılan araştırmalarla daha yüksek verimlilik hedeflerine odaklanmaktadır [2]. PEM elektrolizörü, %99,995 saflıkta hidrojen üretebilme yeteneğine sahiptir. PEM'lerin (Nafion tabanlı zarlar gibi) rolü, bir elektrolizörde anodu katottan ayırmaktır ve bu zarlar, iletkenlik, termal ve kimyasal stabilite, mekanik dayanıklılık ve önemli ölçüde değişen sıcaklık ve basınçta kararlılık gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Ancak, PEM elektrolizörünün genel dayanıklılığına yönelik ana dezavantajlar, elektrokatalizörün ve PEM iletken zarın maliyetidir. Bu dezavantajı aşabilmek için PEM elektrolizörünün üretim maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir, ancak yüksek verimliliği sürdürmek de önemlidir. PEM elektrolizörünün yığın malzemesinin fiyatını alkalın elektrolizörle karşılaştırsak, PEM elektrolizörünün maliyeti önemli ölçüde daha yüksektir [28].

PEM Elektrolizör sermaye maliyetlerinde önemli bir azalmanın, 2020'de kilovat başına 2000 Euro civarından 2030'da kilovat başına yaklaşık 900 Euro'ya kadar gerçekleştirilebileceği ifade edilmektedir. PEM Elektrolizör için operasyonel maliyetleri azaltmaya odaklanmak daha fazla önem arz etmektedir. Alkalın elektrolizör tesisleri ile benzer bir çizgide, PEM elektrolizörün kapasitesini 1 megavat ila 40 megavat arasında artırarak hidrojenin seviyelendirilmiş maliyeti de kilogram başına 7,37 Euro'dan kilogram başına 4,49 Euro'ya kadar kontrol altında tutulabileceği hesaplanmaktadır [28].

3.1.3. Katı Oksit Elektroliz Hücreleri (SOEC) ile su elektrolizi

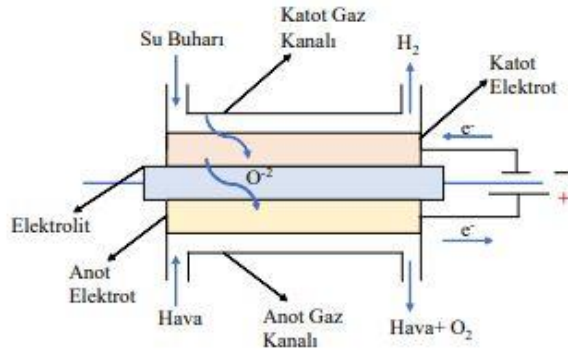
Yüksek sıcaklıkta çalışan bir elektroliz hücresi kullanarak suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırmak amacıyla tasarlanmıştır. SOEC, katı oksit elektrolit tabakası içeren bir hücre yapısına sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için termokimyasal ayrışma reaksiyonlarını gerçekleştirebilir. SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cells, Katı Oksit Elektroliz Hücreleri), yüksek sıcaklıkta su buharını elektrolize etmek amacıyla kullanılan bir teknolojidir. Bu teknolojinin "yakıt hücresi" versiyonu ticari olarak bulunmaktadır ancak su buharının elektrolizi uygulaması hala Ar-Ge aşamasındadır. Çalışma sıcaklıkları 800 °C ile 1000 °C ve basınçlar ise 1-30 bar arasında değişmektedir. SOEC su elektroliz hücresinde, katı bir elektrolit olarak genellikle itriyum katkılı zirkonya veya Y_2O_3/ZrO_2 kullanılan, oksijen iyonları (O_2^-) ile iletken malzeme bulunmaktadır. Hidrojen üretimi sırasında katotta oluşan oksijen iyonları, anoda geçerek oksijenin serbest bırakıldığı yerdir. Enerji tüketimi 2,5 ile 3,5 kWh/Nm³H₂ arasında değişir ve SOEC, sıvı fazdaki diğer su elektroliz teknolojilerinden daha az elektrik enerjisi tüketir. Özellikle, elektrik dışındaki bir ısı kaynağı kullanılarak suyu buharlaştırmak, süreci diğer su elektroliz yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde daha verimli hale getirebilir [28].

SOE teknolojisi, PEM elektrolizör ile karşılaştırıldığında daha hızlı bir işletme tepki süresine sahiptir. Bu hızlı tepki süresi, katı seramik bir membranın kullanılması ve zıt kutup elektrotların hızlı şarj transfer oranlarıyla ayrılmasıyla mümkün olur. SOE hücresi, daha yüksek iyonik iletkenlik avantajı sayesinde yakıt hücresi olarak da kullanılabilir. Ancak, SOE'nin temel dezavantajı, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Yüksek sıcaklıkta çalışabilmesi, ancak henüz endüstri uygulamaları için hazır bir teknoloji seviyesine ulaşmamış olması, bu teknolojiyi sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır [28].

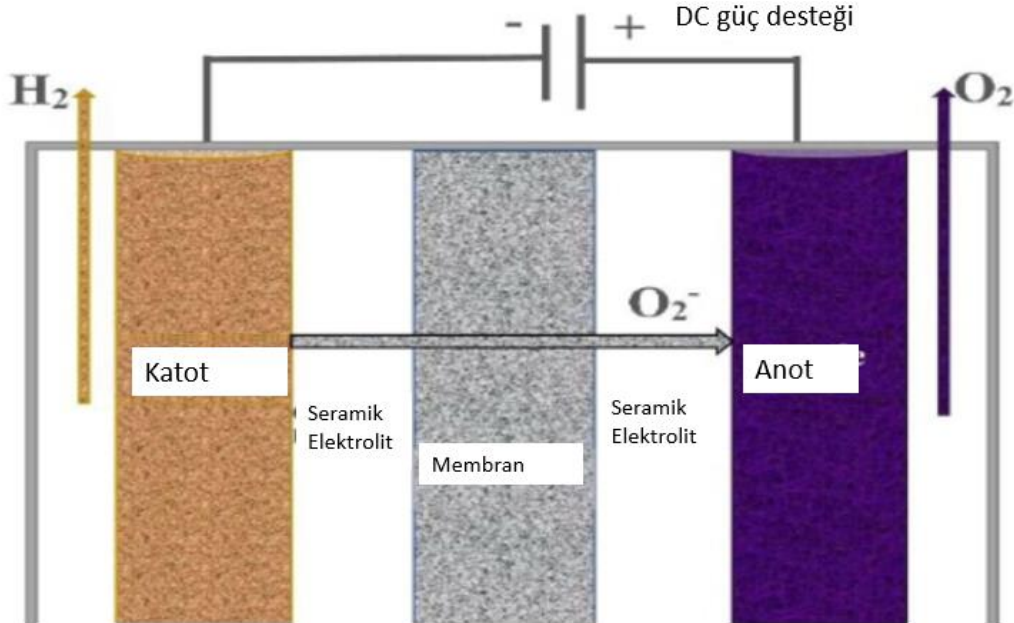
Çalışmalar bu teknolojinin, bileşenlerin korozyonunu ve erken bozulmasını önlemek için yüksek saflıkta suya ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır. Bakım maliyetlerinin, yüksek sıcaklık işletme modu nedeniyle sıvı fazlı su elektroliz teknolojilerinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Elektroliz hücrelerinin ömrü diğer teknolojilere kıyasla daha kısa olup, 4000 saate kadar çıkabilmektedir. SOEC sistemlerine yapılan yatırımlar için CAPEX'in 4000 ila 11000 dolar/kW arasında olduğu ifade edilmiştir. Gelecek yıllarda, daha büyük miktarlarda SOEC sistemleri üretildikçe ekonomilerin ölçeğinden kaynaklanan bir maliyet azalması bekleniyor. Ayrıca, malzemelerin, hücre geometrisinin ve yığın konfigürasyonlarının sürekli Ar-Ge

çalışmalarının, bu teknoloji için umut vadeden ek maliyet azalmalarını gösterdiği belirtilmiştir [2].

SOE (Katı Oksit Elektrolizör) teknolojisinin henüz olgunlaşmamış bir aşamada olduğu ve CAPEX'in (sermaye harcamaları) önemli ölçüde değişken ve güvenilirmez olduğu belirtilmektedir. Şu anda, SOE tekniğinin kullanılmasıyla elde edilen hidrojen enerjisinin maliyeti, kilovat başına 3000 Euro'nun üzerindedir. Ancak, daha fazla SOE tesisi kurulumuyla bu maliyetin 2030 yılına kadar 750 Euro'nun altına düşebileceği güçlü bir tahmin bulunmaktadır [28].



Şekil 3.5. Suyun SOEC elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [26], [28]



Şekil 3.6. Suyun SOEC elektroliz cihazı ile H_2 ve O_2 'ye ayrılma şeması [28]

Tablo 3.1. Suyun farklı elektroliz teknolojilerinin karşılaştırılması [27] [[19], [20], [21], [22], [23], [24]]

Yöntem	Verimlilik %	Elektrot Malzeme Maliyeti	İşletme Gerilimi (V)	Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	Ağırlık
Alkalın Su Elektrolizi (AWE)	70–90	Düşük (50\$/kW'nin altında)	1,5–2,5	0,1–0,5	Büyük ve Ağır (100 kg'nin üzerinde)
Proton Değişim Membranı (PEM) Elektrolizi	70–90	Yüksek (500\$/kW'nin üzerinde)	0,8–1,5	0,2–2,0	Kompakt ve Hafif (50 kg'nin altında)
Anyon Değişim Membranı (AEM) Elektrolizi	70–90	Yüksek (500\$/kW'nin üzerinde)	0,8–1,5	0,2–2,0	Kompakt ve Hafif (50 kg'nin altında)
Katı Oksit Elektrolizi (SOEC)	80–90	Yüksek (500\$/kW'nin üzerinde)	1,2–1,8	0,1–0,5	Büyük ve Ağır (100 kg'nin üzerinde)

Tablo 3.2. Suyun farklı elektroliz teknolojilerinin karşılaştırılması [1]

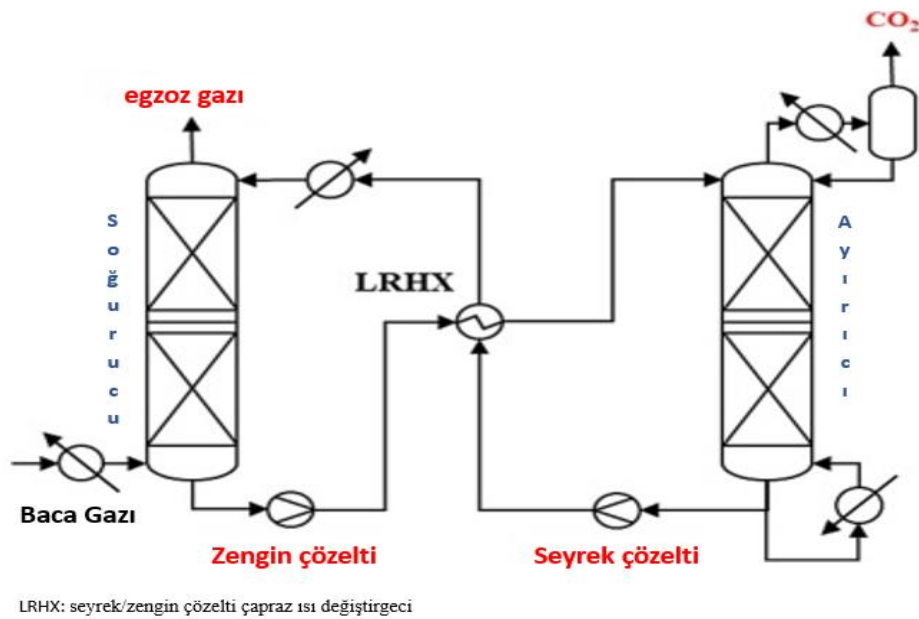
	Alkaline	PEM	Solid Oxide	Unit
Sıcaklık	60–90	50–80	600–1000	°C
Basınç	1,05–30	10–200	1–25	bar
Enerji tüketimi	4,5–6,6	4,2–6,6	3,7–3,9	kWhm _{H₂} ⁻³
Maksimum Kapasite	5,3	1,1	n.a	MW
Sermaye Maliyeti	800–1500	900–2200	>2000	€ kW ⁻¹
Teknoloji Hazırlık Seviyesi	9	5–7	3–5	-

3.2. Amine Yıkama ile Karbondioksit Yakalama

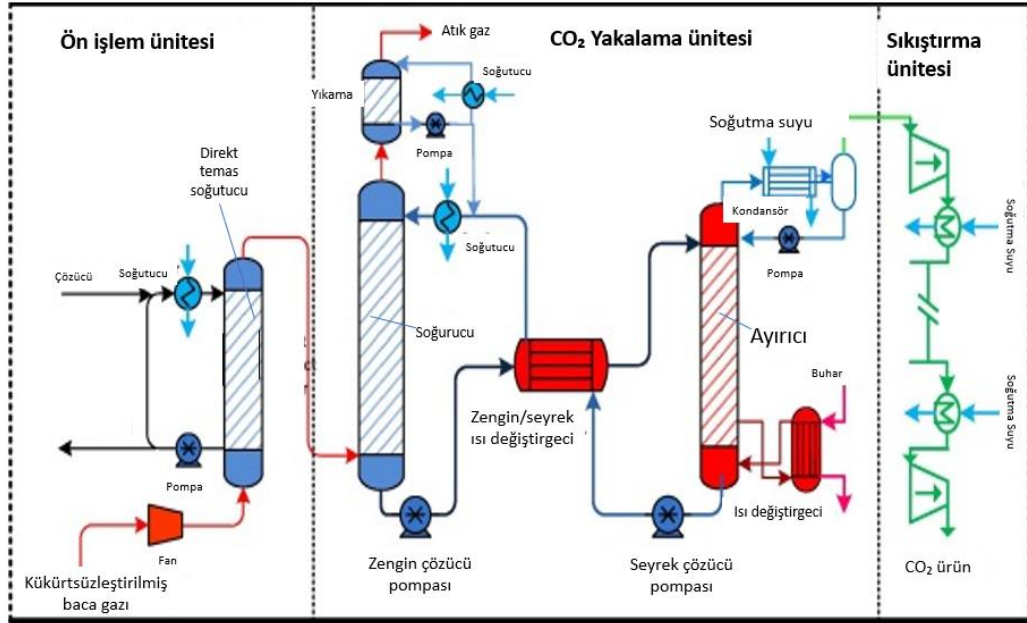
Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) konsepti, geçen on yıl içinde CO₂ ayırma tekniklerinin her birinde önemli gelişmeler kaydedilmiş olmasına rağmen, henüz hiçbir konseptte ticari bir seviyeye ulaşılmamıştır. Birkaç CO₂ yakalama seçeneği arasında, amine yıkama (MEA) ve oksifuel teknolojisi, endüstriyel ölçekte uygulama için ilk nesil uygulamalar için en rekabetçi ve uygulanabilir teknolojiler olarak kabul edilmektedir. Amin yıkama ile yapılan son yanma kimyasal absorpsiyon tekniği, daha yüksek teknoloji hazırlık seviyesine sahip olan en olgun teknoloji olup, zaten büyük ölçekli uygulamalarda test edilmiş ve uygulanmıştır.

Flue gazından CO₂ kimyasal absorpsiyonu, bir monoetanolamin (MEA) sulu çözücüyü CO₂ ile bir sütunda buluşturarak gerçekleştirilir, burada şu reaksiyon meydana gelir [11]. Bir absorber (soğurucu), stripper (ayırıcı), ısı değiştiriciler ve pompalardan

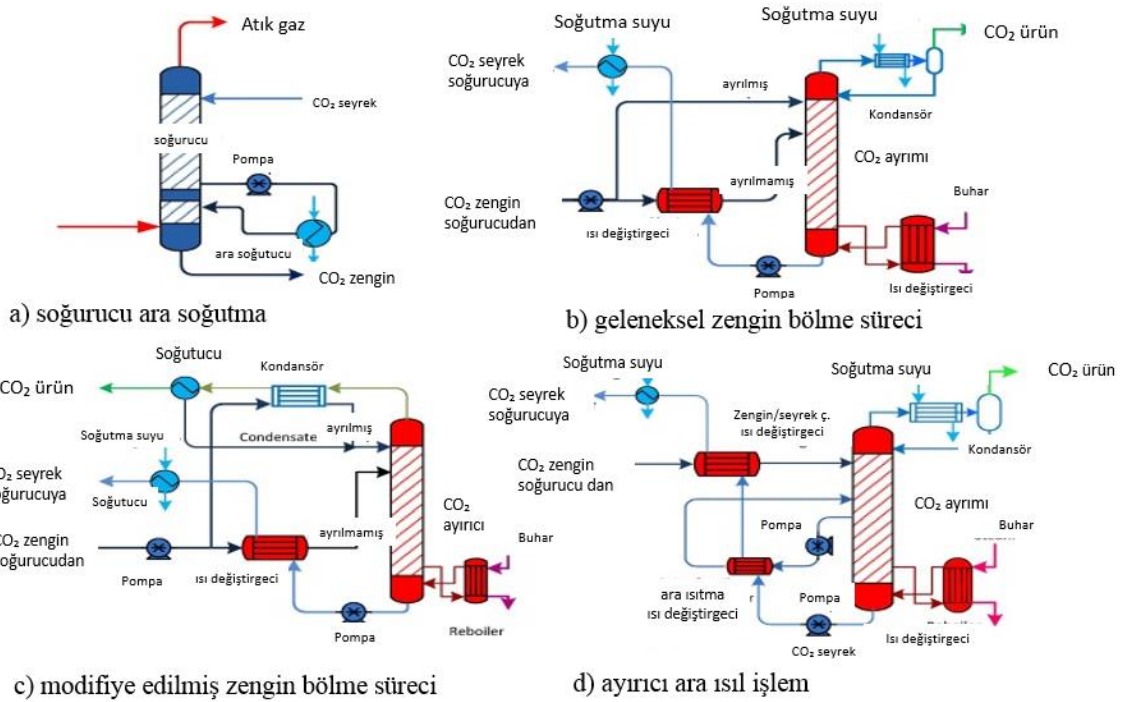
oluşmaktadır. Absorber atmosfer basıncında (yani 1 bar) çalıştırılırken, enerji tasarrufu amacıyla stripper yaklaşık 2 bar basınca çekilmiştir. Kirli gaz kaynağından gelen partikül madde ve kirleticiler, yani SO_x ve NO_x, ön işleme ünitelerinde (Korre et al., 2010) uzaklaştırılır. Ön işlenmiş kirli gaz daha sonra istenilen bir sıcaklığa soğutulur ve absorberin altına beslenir. Kirli gaz, absorpsiyon kolonunun altından yukarı doğru hareket eder ve yukarıdan beslenen seyrek çözücü ile karşı akım olarak temas eder. Kimyasal absorpsiyon reaksiyonları, kolonda karmaşık ısı ve kütle transferleri ile birlikte gerçekleşir. Sonuç olarak, CO₂ içeriği kirli gazdan kademeli olarak uzaklaştırılır. Yıkandıktan sonra işlenmiş gaz nihayet üst kısımdan boşaltılır. Pratik işlemlerde, çevresel havaya dağılmadan önce işlenmiş gazın önce amini geri kazanmak için bir su yıkama bölümünden geçmesi gerekmektedir. Öte yandan, amin çözeltisinin CO₂ yükü aşağı doğru akarken kademeli olarak yükselir ve nihayet alt kısımdan ayrılır. Zengin çözücü, yakalanan CO₂'nin desorbe edildiği ve nihai ürün olarak kullanıldığı stripperda yeniden oluşturulur. Bu CO₂ ürünü daha sonra sıkıştırma ve dehidrasyon bölümüne gönderilir ve diğer CO₂ kullanıcılara dağıtımı kolaylaştırılır. Zengin çözeltinin üstten strippere girmesinden önce, genellikle zengin çözeltiyi seyrek/zengin çapraz ısı değiştiriciye (LRHX) göndermek, strippin tabanındaki sıcak seyrek çözeltinin duyumsal ısısını geri kazanmak için yaygın bir uygulamadır. Aşağıdaki şemalarda akış süreci gösterilmiştir [29], [30].



Şekil 3.7. Amine yıkama ile karbondioksit yakalama süreci [29]



Şekil 3.8. Konvansiyonel sulu MEA CO₂ yakalama süreci akış şeması [30]

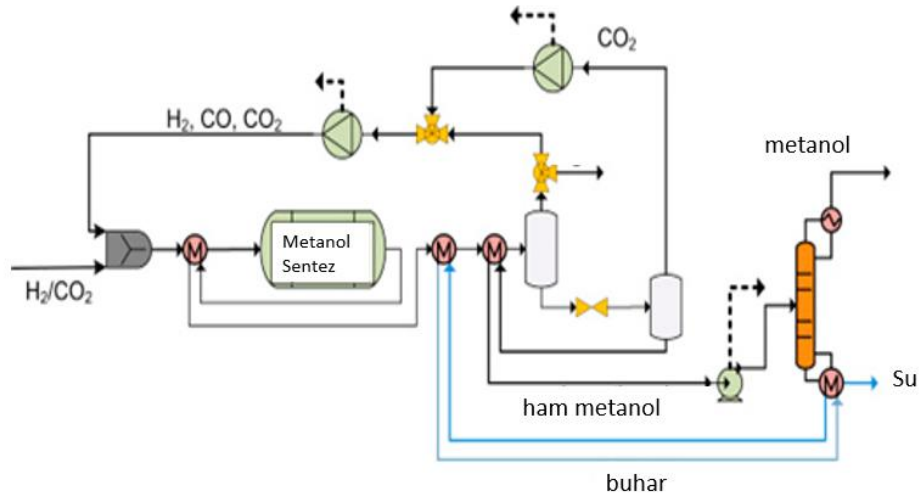


Şekil 3.9. CO₂ yakalama akış diyagramları: (a) soğurucu ara soğutma; (b) geleneksel zengin bölme süreci; (c) modifiye edilmiş zengin bölme süreci; (d) ayırıcı ara ısıl işlem [30]

3.3. Metanol Sentez Bölümü

Şekil 3.10'da gösterilen tipik bir CO₂'den metanol sentezi ünitesinin işlem akış diyagramı, metanol sentezi, gaz ayırma ve ürün arıtma bölümlerinden oluşur. Giriş gazı, reaktörün belirli bir sıcaklık altında adiabatik olarak çalışmasını sağlayacak bir sıcaklık seviyesine kadar ısıtılır. Isı, ham metanolün ısıtılması ve ayrılması için gereklidir ve gaz çıkış soğutmasından elde edilir. Metanol ürününde yüksek saflık seviyelerine (>99.2%) ulaşmak için, ilk flaş ayırıcısından sonra sıvı akışı, Rectisol™ işlemi ile aynı yaklaşımı izleyerek atmosfer basıncının birkaç kPa altına düşürülür. Geri dönüş gazının küçük bir kısmı (<1%), hidrokarbonlar, inert gaz vb. gibi yan ürün birikimini önlemek için atık gaz olarak çekilir [11].

Önceden ısıtılmış hidrojen ve karbondioksit, CO₂ hidrojenasyonu (1), ters su-gaz kayması (2) ve CO hidrojenasyonu (3) reaksiyonları aracılığıyla metanole katalitik olarak dönüştürülür.

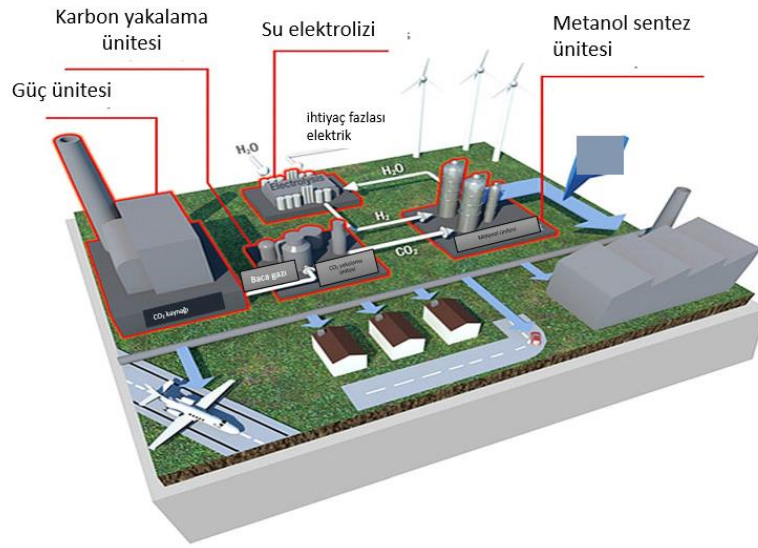


Şekil 3.10. Metanol sentez akış şeması [11]

3.4. Yeşil Metanol Üretimi

Yenilenebilir kaynaklardan metanol üretimi, iklim değişikliğiyle mücadelede ve fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol

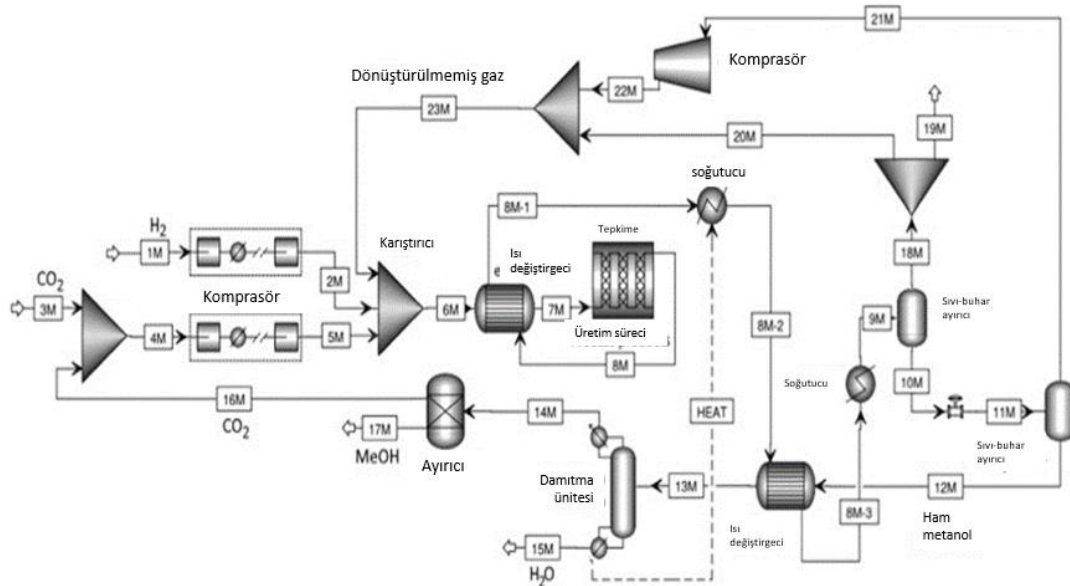
oynayabilir. Bunun nedeni, yenilenebilir kaynaklarla üretilen metanolün fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olmasıdır. Yenilenebilir kaynaklar, güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyoenerji gibi kaynaklardan enerji üretimini ifade eder. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilen metanol yeşil metanol olarak isimlendirilmektedir. Yeşil metanol elektroliz yöntemi elde edilebilen hidrojenin ve fabrika bacasından çıkan CO_2 'in hidrojenasyonudur. Hidrojenasyon: Karbondioksitin (CO_2) hidrojen gazı (H_2) ile reaksiyona girmesi anlamına gelir. Bu kimyasal reaksiyon, CO_2 'nin hidrojen kullanılarak metanola dönüştürülmesini içerir. CO_2 'nin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen hidrojenle reaksiyona girmesiyle gerçekleşen bu süreç, karbon salınımını azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak kimyasal ürünler elde etmek amacıyla uygulanır.



Şekil 3.11. Yeşil metanol üretimi ve dağıtımını gösteren proje [14]

CO_2 hidrojenasyonu, genellikle bir katalizörün varlığında gerçekleşir. Bu kimyasal dönüşüm, CO_2 'nin enerji yoğunluğu yüksek metanol gibi ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Yeşil metanol, CO_2 hidrojenasyonu sürecinin bir örneğidir. Bu yöntem, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin kullanılmasıyla, karbondioksitin metanola dönüştürülmesini sağlayarak temiz ve yenilenebilir bir yakıt üretimini hedefler. CO_2 hidrojenasyonu - genellikle 250-300 °C ve 50-100 bar basınçta çalışan sabit yatak katalitik reaktörlerle işletilen bir teknoloji şu anda ticari ölçekte en

Şekil 3.12’de yeşil metanol sentezi için Aspen Plus ortamında akış şeması detayını içermektedir. Ok işaretleri takip edildiğinde sürecin nasıl devam ettiği anlatılmaya çalışılmıştır. Elektrolizerden gelen hidrojen (1M) ve yakalama bölümünden gelen karbondioksit (3M), hidrojenasyon reaksiyonu için gereken 65 bar basınca sıkıştırılır. Reaktörden çıkan gazın resirkülasyonu (23M) ile karıştırılan bu gaz karışımı (6M), reaksiyondan çıkan ürünlerden geri kazanılan ısı ile ısıtılır (8M). Isınan karışım daha sonra soğutulur, ardından reaktörden çıkan gaz fazından iki flaş ile sıvı fazdan ayrılır. Hidrojen ve CO₂'nin yanı sıra izole edilmiş metanol, su ve CO gibi iz elementlerini içeren bu gaz karışımı (18M ve 21M), geri dönerek reaktöre verilir. Gaz fazından ayrılan sıvı faz, soğutulur ve ardından reaktörden çıkan gazı içeren iki flaş ile ayrılır.



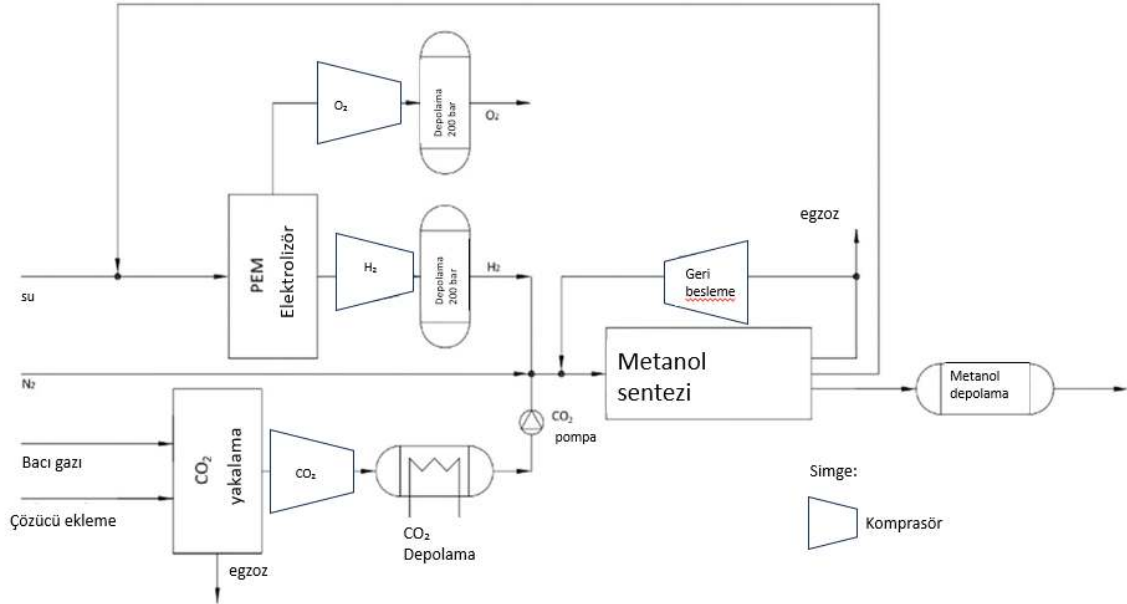
Sistem, proses gazından geri kazanılan ısı ile termal dengeyi koruyarak, işlem sırasında kendini sürdürebilir hale getirilmiştir. Özetle, ayrıştırıcılardan çıkan ham metanol (12M), içerdiği su ve CO₂ izleriyle birlikte distilasyon kolonunun işletme sıcaklığına kadar ısıtılır (13M), distilasyon kolonunda, su kondanse olur ve alt kısımda toplanır (15M). Metanol CO₂'den separatörle ayrılarak elde edilmiş olur (17M).

4. BİR FABRİKANIN CO₂ SALINIMINDAN YEŞİL METANOL ÜRETİMİ VE TEKNO EKONOMİK ANALİZİ

Bu çalışmada yıllık CO₂ salınımı 56089 ton olan bir fabrikanın salınım değeri kullanılarak Zhao ve Brouwer tarafından Aspen-Plus ortamında geliştirilen özel bir model referans alınarak yeşil metanol üretimi için gerekli değerler hesaplanmıştır. Yeşil metanol üretiminde ihtiyaç duyulan gerekli elektrik enerjisi, rüzgâr veya güneş enerjisi ile desteklendiğinde ortaya çıkan maliyetler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1’de metanol sentez sisteminin üç ana bölümünü göstermektedir:

- 1) Hidrojen ve Oksijen Üretimi: Su, polimer elektrolit membranlı (PEM) Elektrolizör aracılığıyla hidrojen ve oksijen olarak ayrılır.
- 2) Karbon Yakalama: Amine tabanlı çözücüler kullanılarak karbondioksit, endüstri tesisindeki baca gazından ayrılır.
- 3) E-Metanol Sentezi ve Saflaştırma: Ayrılan CO₂, doğrudan hidrojenasyon ile e-metanol sentezi için kullanılır ve elde edilen ürün saflaştırılır.



Şekil 4.1. Metanol sentez süreci [16]

Bu çalışmada, CO₂'nin e-metanole katalitik hidrojenasyonu için gerekli olan yeşil hidrojenin, bir PEM elektrolizör kullanılarak su elektrolizi yoluyla elde edilmesi öngörülmektedir. Bu teknolojinin, geleneksel alkalin sistemlere kıyasla daha hızlı soğuk

başlangıç, daha yüksek esneklik ve dolayısıyla güneş ve rüzgâr gibi dinamik ve aralıklı enerji üretim sistemleri ile daha iyi bir bağlantıya sahip olma avantajları bulunmaktadır. PEM elektrolizör'ler esnek cihazlar olabilir ve geleneksel alkalin ünitelere göre daha düşük hücre voltajlarında, daha yüksek akım yoğunluklarında, daha yüksek sıcaklıklarda ve basınçlarda çalışabilir, bu da daha yüksek verimliliğe yol açabilmektedir [16], [34].

Hidrojen üretimini e-metanol sentezi bölümündeki sonraki kullanımından ayırmak için 200 bar'da çalışan geçici bir hidrojen depolama sisteminin benimsenmesi düşünülmüştür. Depolama sistemi, hidrojenin yenilenebilir elektrik birkaç saat boyunca kullanılamazsa bile mevcut olmasını sağlamak üzere ön optimizasyonun bir sonucu olarak boyutlandırılmıştır. Bu, daha yüksek sermaye ve işletme maliyetlerini beraberinde getirmiştir. Oksijen depolaması düşünülmemiştir oksijenin silindirlere sıkıştırılması ve satılması öngörülmüştür.

Tablo 4.1. Madde ve sistemin özellikleri [16]

	kg/kmol
CO ₂	44,010
H ₂	2,016
CH ₃ OH	32,042
H ₂ O	18,015
O ₂	31,999

Bu çalışmada PEM elektroliz sürecini simüle etmek üzere, Zhao ve Brouwer tarafından Aspen-Plus ortamında geliştirilen özel bir model referans alınmıştır [16], [35]. CO₂ salınımı 56089 ton/yıl olan fabrika için gerekli değerler Zhao ve Brouwer tarafından geliştirilen sistem referans alınarak hesaplanmıştır [16]. Bu sistem için deiyonize 10200 kg/saat su kullanılması gerektiği hesaplanmıştır (Tablo 4.2). PEM'in çalışma basıncına ve sıcaklığına kadar pompalanır ve ısıtılır. Su elektroliz reaksiyonu sürecin ürünleri olan hidrojen ve oksijen daha sonra ayrılır ve depolanır. Hidrojen üretim sisteminin temel özellikleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca, PEM elektrolizörlerin teknolojik gelişimi de dikkate alınmıştır. Ömürlerinin sonunda, yığınların daha iyi performans gösteren yeni yığınlarla değiştirilmesi öngörülmüştür [36]. Ayrıca, yığının performansının zaman içinde kötüleştiği göz önüne alındığında, yığın, gerekli hidrojen üretimini ömrünün sonuna kadar sağlamak için boyutlandırılmıştır. Sistemin enerji ve malzeme akışları ilgili tablolarda gösterilmiştir.

4.1. Hidrojen ve Oksijen Üretimi

Zhao ve Brouwer tarafından geliştirilen çalışma [16] referans alınmıştır. Fabrikanın yılda 24 saat çalıştığı kabul edildiğinde 7884 saat/yıl bu fabrikanın çalıştığı hesaplanmıştır.

56089 ton CO₂/yıl salınımı yapıyorsa saatte 7114,3 kg/saat CO₂ salınımı yapmakta olduğu hesaplanmıştır.

$$\text{Saatlik CO}_2 \text{ salınımı} = \frac{\text{Toplam yıllık CO}_2 \text{ salınımı}}{\text{Çalışma saati}} = \frac{56089 \cdot 10^3}{7884} = 7114,3 \text{ kg/saat} \quad (4.1)$$

$$\text{Reaksiyona girmeyen CO}_2 = 7114,3 \cdot 0,036 = 256 \text{ kg/saat} \quad (4.2)$$

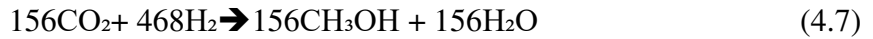
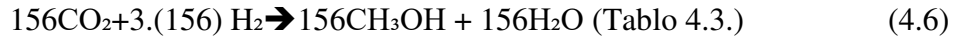
(0,036 CO₂'nin reaksiyona girmedeği kabul edilmiştir.)

$$\text{Reaksiyona giren CO}_2: 7114,3 - 256 = 6858 \text{ kg/saat} = 156 \text{ kmol/saat} \quad (4.3)$$

$$\text{Reaksiyona giren H}_2 = \frac{\text{CO}_2 \frac{\text{kg}}{\text{saat}} (6858) \cdot 3 \text{H}_2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} (6)}{\text{CO}_2 \text{kg/mol} (44)} = 942 \text{ kg/saat} = 468 \text{ kmol/saat} \quad (4.4)$$

$$468/3 = 156 \text{ kmol/saat (H}_2\text{O'nun mol sayısı elde edilir.)}$$

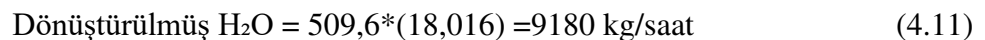
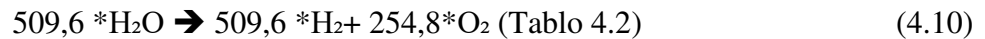
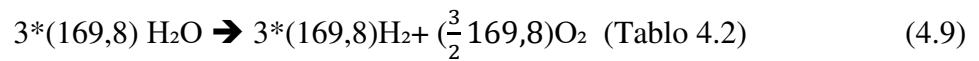
Metanol Sentez Süreci:



Zhao ve Brouwer tarafından yapılan çalışma [16] referans alındığında H₂ üretimi ve reaksiyona giren H₂ oranı hesaplanmıştır. Buradan PEM için gerekli hidrojeni hesaplayarak süreçte kullanılması gereken H₂O ve üretilen O₂ miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

PEM de için üretilmesi gereken H₂ buradan 1027 kg/saat = 509.6 kmol/saat çıkar.

PEM Süreci:



$$\text{Sisteme giren H}_2\text{O} = 9180/0,9 = 10200 \text{ kg/saat} \quad (4.12)$$

$$\text{Dönüştürülmemiş H}_2\text{O} = 10200-9180= 1020 \text{ kg/saat} \quad (4.13)$$

Tablo 4.2. PEM elektrolizinden elde edilen maddelerin üretim miktarı [16]

Madde	kg/saat	kmol/saat	t/yıl
Deiyonize Su	10200	566,2	80417
Dönüştürülmemiş H ₂ O	1020	56,6	8042
Dönüştürülmüş H ₂ O	9180	509,6	72375
H ₂ Üretimi	1027	509,6	8099
O ₂ Üretimi	8153	254,8	64276
Bazı kabuller			
Kapasite faktörü	0,9		
Yıllık işletme saati	7884 saat/yıl		
Su Dönüşüm Verimliliği	0,9		
Kimyasal Ayrışma ve Analiz (%)	96,4	%v MeOH	
	3,6	%v CO ₂	

Tablo 4.3. Metanol sentez süreci [16]

	kg/saat	kmol/h	t/yıl
CO ₂ Girişi (Yakalanan)	7114		56089
CO ₂ Çıkışı	256		2019
Reaksiyona Giren CO ₂	6858	156	54070
Reaksiyona Giren H ₂	942	468	7430
CH ₃ OH (Üretilen Metanol)	4993	156	39367
H ₂ O (Soğutma Suyu)	2807	156	22134
Su Tüketimi (resirkülasyon hariç)			58283

Tablo 4.4. Hidrojen üretim sistemi [16]

Yığın (stack) Özellikleri	
Herhangi bir bölümdeki hücre sayısı	150
Aktif alan (cm ²)	700
Akım yoğunluğu (A/cm ²)	2
Gerilim (V/hücre)	1,9
Bozulma hızı (mV/1000 saat)	1,5
Yığın ömrü (saat)	60000
Yığın elektroliz kapasitesi (kg/saat H ₂ O)	69,2

Tablo 4.4.(Devam) Hidrojen üretim sistemi [16]

PEM elektroliz cihazı	
Su dönüşüm verimliliği (%)	0,9
Stack (yığın) sayısı	148
Hidrojen üretim basıncı (bar)	30
İşletme sıcaklığı (°C)	80

Genel olarak, istenen hidrojen debisine eşit olan 1027 kg/saat hidrojen akışını elde etmek için saatte 10200 kg deiyonize su gerekmektedir, bu da yaklaşık 8153 kg/saat oksijen üretimine yol açmaktadır. Bu hidrojen üretimi, özgül güç tüketimi 57,3 kWh/kgH₂ olan PEM elektrolizör gerektirir. (Tablo 4.2-Tablo 4.5)

Tablo 4.5. Hidrojen üretimi için sistemdeki enerji ve madde akışı [16]

Stack (yığın) güç tüketimi	51,7 kWh/kgH ₂
Tesis dengesi güç tüketimi	5,5 kWh/kgH ₂
Toplam tesis özgül güç tüketimi	57,3 kWh/kgH ₂
Deiyonize su akış hızı	10200 kg/h
Ortalama hidrojen akış hızı	1027,2 kg/h
Ortalama oksijen akış hızı	8152,8 kg/h
Dönüşmemiş su akış hızı	1020 kg/h
Elektrolizör gücü	58841,1 kW

4.2. CO₂ Yakalama İşlemi

Referans alınan çalışmada [16] CO₂ yakalama işlemi, amine bazlı çözücüler kullanılarak kimyasal absorpsiyon yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. CO₂ yakalama bölümü, metanol sentezi süreci tarafından gereken CO₂ akışını sağlamak üzere [16] çalışma referans alınarak boyutlandırılmıştır (7114,3 kg/saat).

30% monoetanolamin (MEA) çözeltisi kullanan bir yakalama sisteminden %90 çıkarılma verimliliği varsayılarak, ilave işlem optimizasyonu olmaksızın, amin rejenerasyonu için gerekli enerji her kg CO₂ desorbe için 3,5 MJ/kgCO₂ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, adsorpsiyon sistemi işlemi sırasında, çözümün bozulmasını telafi etmek için periyodik olarak yeni bir adsorbe eden çözüm eklenmesi gerektiği belirlenmiştir. Çözücü tüketimi genellikle ton CO₂ adsorbe başına 0,5 ile 3,0 kg arasındadır, bu çalışmada 1,5 kg/tCO₂ makyaj değeri kullanılmıştır [16].

CO₂ yakalama sisteminin başlıca özellikleri Tablo 4.6, Tablo 4.7'de gösterilmiştir, enerji ve malzeme akışları Tablo 4'te rapor edilmiştir. Sistemden çıkan karbondioksitin geçici olarak -24 °C'de ve 20 bar'da sıvı fazda bir 16,5 m³ tankta depolandığı varsayılmıştır.

Tablo 4.6. CO₂ yakalama sistemi detayları [16]

Çözücü	
Çözücü Türü	MEA
Sulu Çözeltideki Konsantrasyon	30 %wt
Adsorpsiyon Bölümü	
CO ₂ Uzaklaştırma Verimliliği	0,9 %
Çözücü Takviyesi	1,5 kg/tCO ₂
Rejenerasyon Bölümü	
Termal Vektör	steam
CO ₂ Çıkış Basıncı	1,2 bar

Tablo 4.7. CO₂ yakalama sistemi için malzeme akışı ve enerji tüketimi [16]

Bacalardaki gaz akış hızı	37565,8 kg/saat
Ayrılan CO ₂ akış hızı	7114,3 kg/saat
Çözücü tüketimi	10,7 kg/saat
Gerekli elektrik gücü (b)	67,9 kW
Çözücü rejenerasyonu için özgül termal tüketim	3,5 MJ/kgCO ₂
Rejenerasyon için termal güç	6837,6 kW _{th}
Eşdeğer kaçırılan elektrik gücü (c)	1141,4 kW

4.3. Yeşil Metanol Sentez Süreci

Yeşil metanol, CO₂ katalitik hidrojenasyonu kullanılarak adiyabatik sabit yatak katalitik reaktörde üretilir. Katalizörlerin başlıca bileşenlerinin Cu ve Zn olduğu, ayrıca Al, Zr, Cr, Si, B, Ga gibi çeşitli katkı maddelerini içerdiği belirtilmektedir.

Tablo 4.3, Tablo 4.8'den 4.11'e metanol sentez reaktör ve madde akışı belirtilmektedir.

Tablo 4.3. *Metanol sentez süreci* [16]

	kg/saat	kmol/h	ton/yıl
CO ₂ Girişi (Yakalanan)	7114		56089
CO ₂ Çıkışı	256		2019
Reaksiyona Giren CO ₂	6858	156	54070
Reaksiyona Giren H ₂	942	468	7430
CH ₃ OH (Üretilen Metanol)	4993	156	39367
H ₂ O (Soğutma Suyu)	2807	156	22134
Su Tüketimi (resirkülasyon hariç)			58283

Tablo 4.8. *Metanol sentez bölümünde enerji ve madde akışı* [16]

Giriş hidrojen akış hızı	1027	kg/saat
Giriş CO ₂ akış hızı	7114	kg/saat
Resirkülasyon akış hızı		
Üretilen metanol akış hızı	4993	kg/saat
Çıkış CO ₂ akış hızı	256	kg/saat
Soğutma suyu akış hızı	2807	kg/saat
Reaktöre katılan katalizör miktarı	2877	kg
Güç emilimi: hidrojen kompresörü (d)	386	kW
Güç emilimi: CO ₂ kompresörleri (e)	487	kW
Güç emilimi: resirkülasyon kompresörü (f)	145	kW

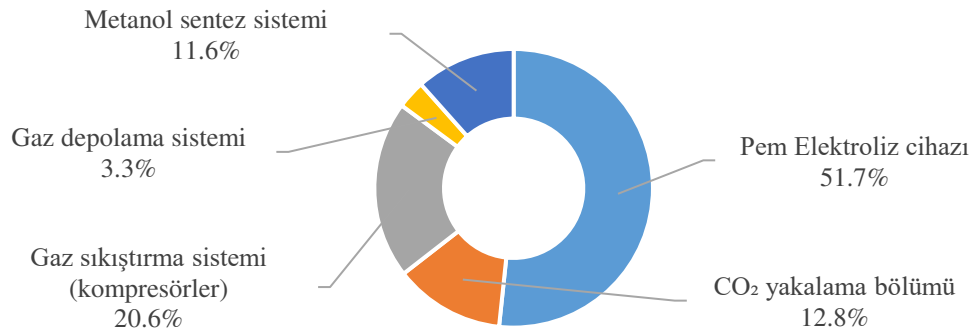
Tablo 4.9. *Süreç parametreleri* [16]

Kapasite faktörü	0.9	
Yıllık işletme saati	7884	saat/yıl
Nominal boyut (metanol)	4993	kg/saat
Tesis üretkenliği (metanol)	39367	t/yıl
Oksijen üretimi	64276	t/yıl
Yakalanan karbondioksit	56089	t/yıl
Hidrojen üretimi	8099	t/yıl
Güç tüketimi (PEM, aşınma hariç)	463903	MWh/yıl
Güç tüketimi (diğer kullanıcılar)	17556	MWh/yıl
Su tüketimi (PEM)	80417	t/yıl
Su tüketimi (resirkülasyon hariç)	58283	t/yıl
Çözücü tüketimi (CO ₂ yakalama)	84134	kg/yıl
Katalizör tüketimi (reaktör)	719	kg/yıl
Azot tüketimi	77578	kg/yıl

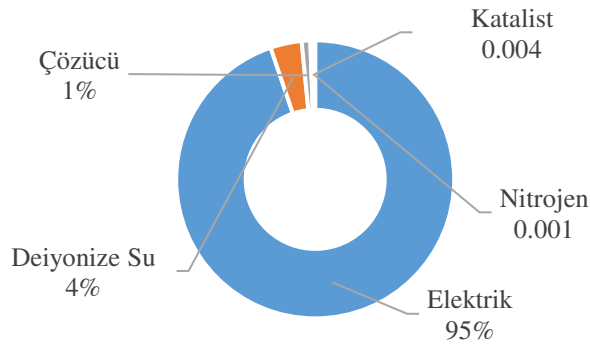
Tablo 4.9’da sistemden elde edilen malzeme akışı verilmiştir. (t/yıl: ton/yıl)

Tablo 4.10. Tahmini yatırım maliyeti [16]

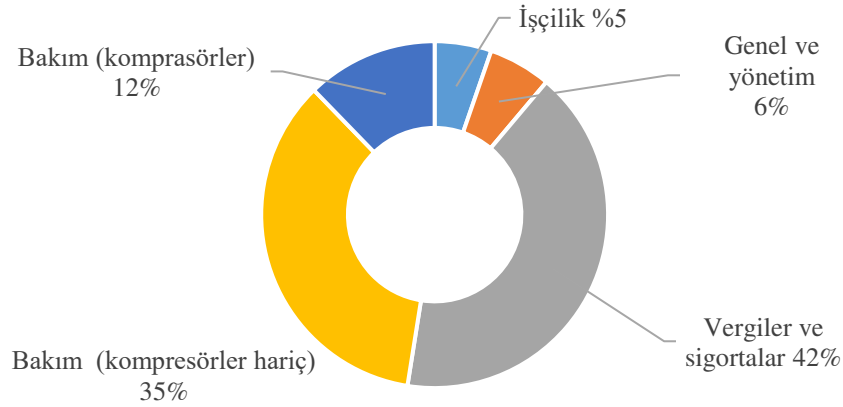
	Maliyet (k€)
- PEM _ Katı Polimer Elektroliz Cihazı	53982,09
- CO ₂ yakalama bölümü	13392,2
- Gaz sıkıştırma sistemi kompresörler	21559,38
- Gaz depolama sistemi	3424,31
- METANOL sentez sistemi	12103,17
Tesisin temel yapım maliyeti (BEC)	104461,1
- Mühendislik, Satın Alma ve İnşaat	8354,137
Mühendislik, Satın Alma ve İnşaat Maliyetleri	112815,3
- Proje ve Süreç Güvenceleri	15665,24
Toplam Tesis Maliyeti (TPC)	128480,5
- Alan Hazırlığı	2086,074
-İzin Ücretleri	15665,24
Toplam inşaat ve devreye alma sürecindeki tüm yatırım maliyetleri (TOC) (g)	146231,8



Şekil 4.2. Yapılan harcamaların dağılımı



Şekil 4.3. Yapılan harcamaların dağılımı



Şekil 4.4. Yapılan harcamaların dağılımı

Tablo 4.11. Metanol üretimi için gerekli seviyelendirilmiş enerji ve maddelerin birim maliyetleri [16]

	Birim Maliyet	Yıllık Maliyet
Enerji (Rüzgâr)	44,49 €/MWh	21422 k€/yıl
Enerji (Güneş)	72,65 €/MWh	34979 k€/yıl
Deiyonize su	10 €/m ³	583 k€/yıl
Solvent (MEA)	1,9 €/kg	160 k€/yıl
Katalist	95,24 €/kg	69 k€/yıl
Nitrojen	0,2783 €/kg	22 k€/yıl

Tablo 4.12. Toplam operasyon ve bakım maliyetleri [16]

	Yıllık Maliyet
İşçilik	374,4 k€/yıl
Genel ve yönetim	413,2788 k€/yıl
Vergiler ve sigorta	2922,472 k€/yıl
Bakım (kompresörler hariç)	2489,513 k€/yıl
Bakım (kompresörler)	865,9176 k€/yıl
Toplam Gider	7065,5 k€/yıl

$$\text{İhtiyaç Duyulan Güç} = \text{Elektrolizör (a, Tablo 4.5)} + \text{CO}_2 \text{ yakalama (b+c, Tablo 4.7)} + \text{Metanol Sentez (d+e+f, Tablo 4.9)} = 61,1 \text{ MW} \quad (4.14)$$

4.4. Yeşil Metanol Maliyet Analizi

4.4.1. Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi ile üretilen yeşil metanolün maliyet analizi

Yeşil metanol üretiminde, enerji ihtiyacını rüzgâr enerjisiyle karşılamak, sürdürülebilir bir geleceğe doğru atılmış önemli bir adımdır. Rüzgâr enerjisinin kullanılması, metanol üretim sürecini çevre dostu ve karbon salınımını azaltan bir yöne evirmekte, yeşil metanol üretimini rüzgâr enerjisi kullanarak yaptığımızda aşağıda yapılan hesaplamalar ortaya çıkmaktadır. İhtiyaç duyulan güç 61.1MW olduğu için bu enerjiyi sağlayacak rüzgâr santrali kurulumu hesaplamaları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 4.13. Rüzgâr türbini santrali kurulumu için gerekli girdiler [16, 34]

İhtiyaç Duyulan Güç (MW)	61.1
Rüzgâr Türbini Kapasitesi (MW)	3,0
Verimlilik	30%
Toplam Kapasite (MW)	203,6
Gereken Rüzgâr Türbini Adedi	68
Rüzgâr Türbini Fiyatı (k€)	3000
İlk Yıl Rüzgâr Türbini Bakım Maliyeti (k€/yıl)	60
Toplam Yatırım (k€)	204000
Yıllık Sağlanan Enerji (MWh/yıl)	481459

$$\text{Toplam Kapasite} = \frac{\text{İhtiyaç Duyulan Güç}}{\text{Verimlilik}} \quad (4.15)$$

$$\text{Gereken Rüzgâr Türbini Adedi} = \frac{\text{Toplam Kapasite}}{\text{Rüzgâr Türbini Kapasitesi}} \quad (4.16)$$

$$\text{Toplam yatırım} : \text{Rüzgâr Türbini Fiyatı} * \text{Adet} \quad (4.17)$$

$$\text{Yıllık Bakım Maliyeti} = \text{Toplam türbin yatırım maliyeti} * 2\% \text{ olarak alınmıştır.} \quad (4.18)$$

$$\text{Yıllık Sağlanan Enerji (MWh/yıl)} = \text{İhtiyaç Duyulan Güç} * 0,9 * 24 \text{ saat} * 365 \text{ gün} \quad (4.19)$$

(Rüzgâr türbininin 24 saat çalıştığı düşünülmektedir, kapasite faktörü: 0,9)

Sistemin 20 yıl çalışacağı göz önüne alınarak hesaplamalar yapıldığında,

Metanol üretimi: 39367 ton/yıl (Tablo 4.3)

Tablo 4.14. Rüzgâr türbini santrali kurulumu için gerekli yatırım girdileri ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti

Tesis toplam yatırım maliyeti	204000	k€
Kredi kullanım oranı	0,75	
Nakit ödeme	51100	k€
Kredi kullanım miktarı	153000	k€
Faiz oranı	5,26%	
Iskonto oranı	5,00%	
Enflasyon	2,00%	
Taksit sayısı	10	yıl
Kredi taksiti	20065,15	k€/yıl
Toplam kredi geri ödemesi	200651,5	k€/yıl
Toplam bakım	4080	k€/yıl
Yıllık sağlanan enerji	481459	MWh/yıl
Metanol üretim miktarı	39367	ton/yıl
Rüzgâr enerjisi birim fiyatı ($LCOE_{Rüzgâr}$)	44,49	€/MWh

Taksit tutarı: $\frac{Faiz \cdot (1 - Faiz)^{Taksit Sayısı}}{(1 - Faiz)^{Taksit Sayısı} - 1}$ bu formül ile hesaplanmıştır.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4.20)$$

LCOE: Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti

I_t : t yılındaki yatırım harcamaları

M_t : t yılındaki operasyon ve bakım harcamaları

F_t : t yılındaki yakıt harcamaları

E_t : t yılında üretilmiş elektrik enerjisi

n: Öngörülen sistem ömrü, t: zaman

Yapılan hesaplamalarla rüzgâr türbini santralinde üretilen seviyelendirilmiş elektrik maliyeti; $LCOE_{Rüzgâr}$: **44,49 €/MWh'dir.**

Tablo 4.15. Metanol tesisi kurulumu için gerekli yatırım girdileri

Tesis inşaat süresi	1,00 yıl
Tesis çalışma ömrü	20,00 yıl
Tesis kurulum maliyeti	146231,83 k€
Kredi kullanım oranı	0,75
Nakit ödeme	36557,96 k€
Kredi borcu	109673,87 k€
Faiz oranı	0,05
Iskonto oranı	0,05
Enflasyon	0,02
Taksit sayısı	10,00 yıl
Kredi taksiti	14383,16 k€/yıl
Toplam kredi geri ödemesi	143831,57 k€/yıl
Elektrik tüketimi (LCOE _{rüzgar} kullanılmıştır.)	21422 k€/yıl

LCOM (Seviyelendirilmiş metanol maliyeti) hesabı:

$$LCOM = \frac{\sum_{t=0}^{20} \frac{(CC_t + OC_t) - (RO_t + E_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{20} \frac{P_t}{(1+r)^t}} \quad (4.21)$$

CC_t : yatırım maliyeti

OC_t : toplam operasyonel maliyetler

RO_t : sistemde üretilen oksijen satış geliri

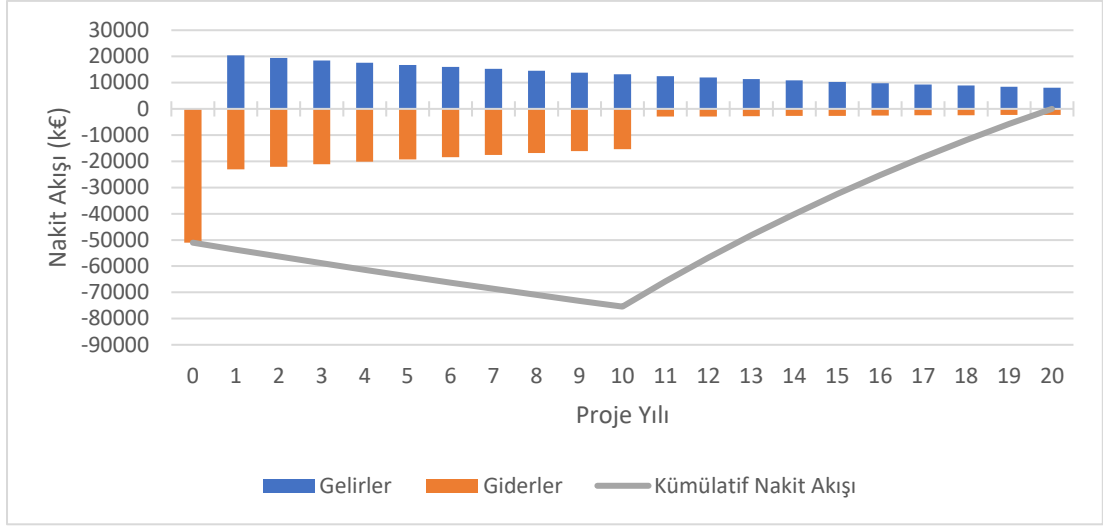
E_t : sistemde üretilen karbondioksit geliri

P_t : metanol üretimi

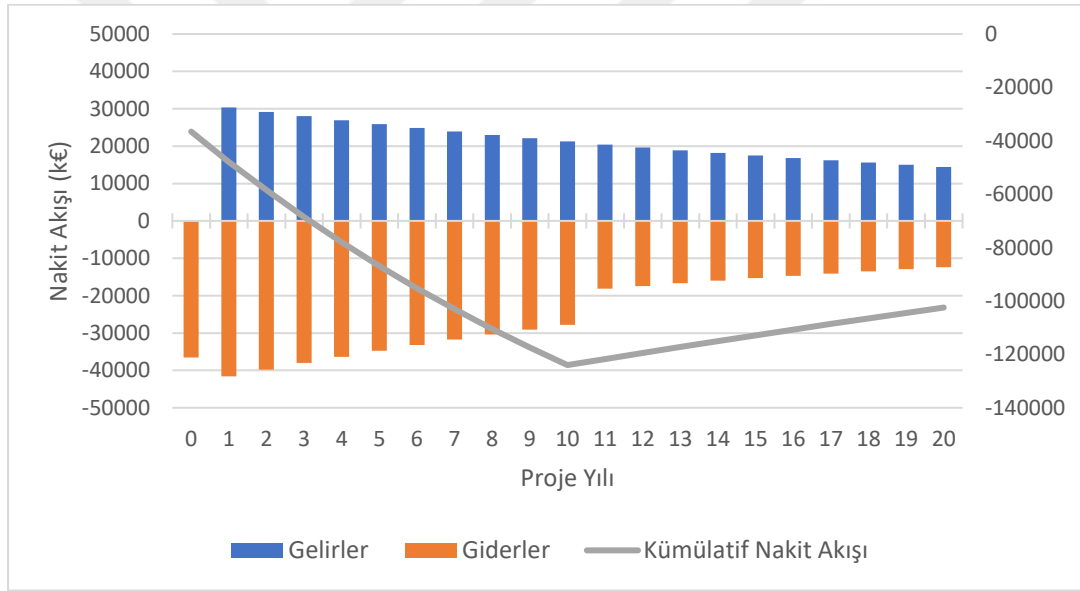
t : yıl

r : Iskonto oranı

Seviyelendirilmiş metanol maliyeti ($LCOM_{Rüzgar}$) = **658,84 €/t**



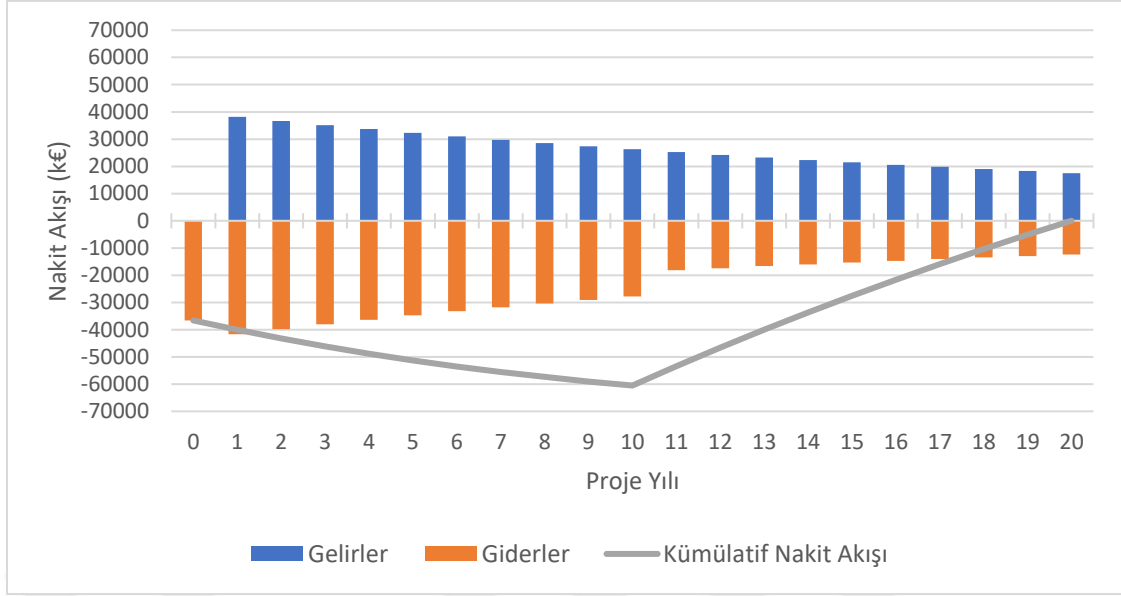
Şekil 4.5. Rüzgâr türbini santrali kurulumu için nakit akışı



Şekil 4.6. Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında metanol tesisi kurulumu için öngörülen nakit akışı

(Fosil metanol mevcut piyasa değeri = 450 €/t)

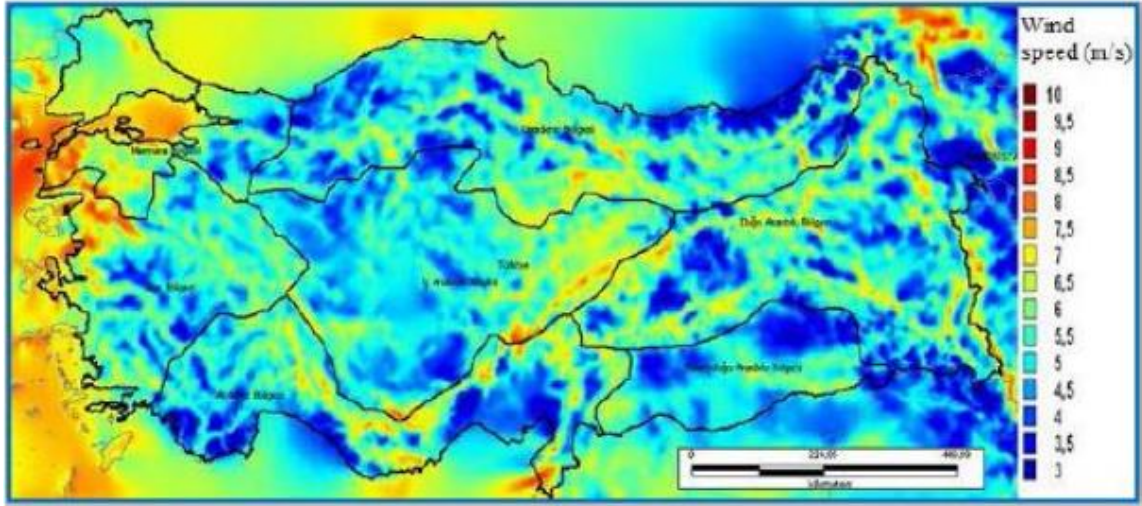
Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında 20 yıl çalışması ön görülen metanol tesisinin net bugünkü değeri -157750 k€ olarak hesaplanmıştır. Mevcut piyasa değerinde satılması tesisin zarar edeceğini göstermektedir. Nakit akışı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Rüzgâr enerjisi kullanılan metanol tesisinin nakit akışı

Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen seviyelendirilmiş metanol maliyeti
 $LCOM_{Rüzgar} = 658,84 \text{ €/t' dir.}$

20 yıl çalışması ön görülen metanol tesisinin net bugünkü değeri sıfır olacak şekilde seviyelendirilmiş metanol maliyeti hesaplanmıştır. Nakit akışı Şekil 4.5. ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli haritası (Yer seviyesinden 50 m yüksekte) [39]

REPA'ya (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası) göre, Türkiye'nin en etkileyici bölgeleri Batı Bölgesi ve Marmara Bölgesi olup rüzgâr hızının 50 metre

yükseklikte 7 m/s'den yüksek olduğu bölgelerde üretilen 48000 MW'lık bir potansiyelden 130 milyar KWh elektrik elde edilebilir [39].

Tablo 4.16. Yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgâr hızları [39]

Rüzgâr Kaynak Derecesi	Rüzgâr Sınıfı	50m. Yükseklikteki Rüzgâr Hızı (m/s)	50m. Yükseklikteki Rüzgâr Güç Yoğunluğu (W/ m ²)
Zayıf	1	<5,5	<200
Düşük	2	5,5- 6,5	200 – 300
Orta	3	6,5 – 7,0	300 – 400
İyi	4	7,0 – 7,5	400 – 500
Harika	5	7,5– 8,0	500 – 600
Mükemmel	6	8,0 – 9,0	600 – 800
Sıra dışı	7	> 9,0	> 800

4.4.2. Güneş panelinden elde edilen elektrik enerjisi ile üretilen yeşil metanolün maliyet analizi

Günümüzde sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme çabaları, yeşil metanol üretimi için enerji sağlama yöntemlerini de dönüştürmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisinin kullanılması, yeşil metanol üretim sürecini daha çevre dostu ve enerji verimli hale getirme potansiyelini sunmaktadır. Bu başlıkta, güneş enerjisiyle yeşil metanol üretimini değerlendirmek ve aşağıdaki yapılan hesaplamalar üzerinden bu yöntemin ekonomik etkilerini analiz etmek amaçlanmaktadır.

Tablo 4.17. Güneş paneli santrali kurulumu için gerekli girdiler [16, 34]

İhtiyaç Duyulan Güç (MW)	61,1
Güneş Paneli Kapasite (W/m ²)	550
Verimlilik	6,67%
Toplam Kapasite (MW)	916
Gereken Güneş Paneli (m ²)	1665486,8
Güneş Paneli Fiyatı (€/m ²)	200
Güneş Paneli Bakım Maliyeti (€/m ² /yıl)	4
Toplam Yatırım (k€)	333097
Yıllık Sağlanan Enerji (MWh/yıl)	481459

$$\text{Toplam Kapasite} = (\text{İhtiyaç Duyulan Güç}) / \text{Verimlilik} \quad (4.22)$$

$$\text{Gereken Güneş paneli Adedi} = (\text{Toplam Kapasite}) / (\text{Güneş Paneli Kapasitesi}) \quad (4.23)$$

$$\text{Toplam yatırım} = \text{Güneş Paneli Fiyatı} * \text{Adet} \quad (4.24)$$

$$\text{Yıllık Bakım Maliyeti} = \text{Toplam güneş paneli yatırım maliyeti'nin } 2\%' \text{si olarak alınmıştır.} \quad (4.25)$$

$$\text{Yıllık Sağlanan Enerji (MWh/yıl)} = \text{İhtiyaç Duyulan Güç} * 0,9 * 24 \text{ saat} * 365 \text{ gün} \quad (4.26)$$

(Kapasite Faktörü: 0,9 alınmıştır.)

Güneş panelinin verimliliği hesaplanırken :

Pil verimliliği: 20% , güneşlenme süresi oranı: 33% alınarak ; panel verimliliği 6,67% olarak alınmıştır. Sistemin 20 yıl çalışacağı göz önüne alınarak hesaplamalar yapıldığında,

Tablo 4.18. Güneş paneli santrali kurulumu için gerekli yatırım girdileri ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti

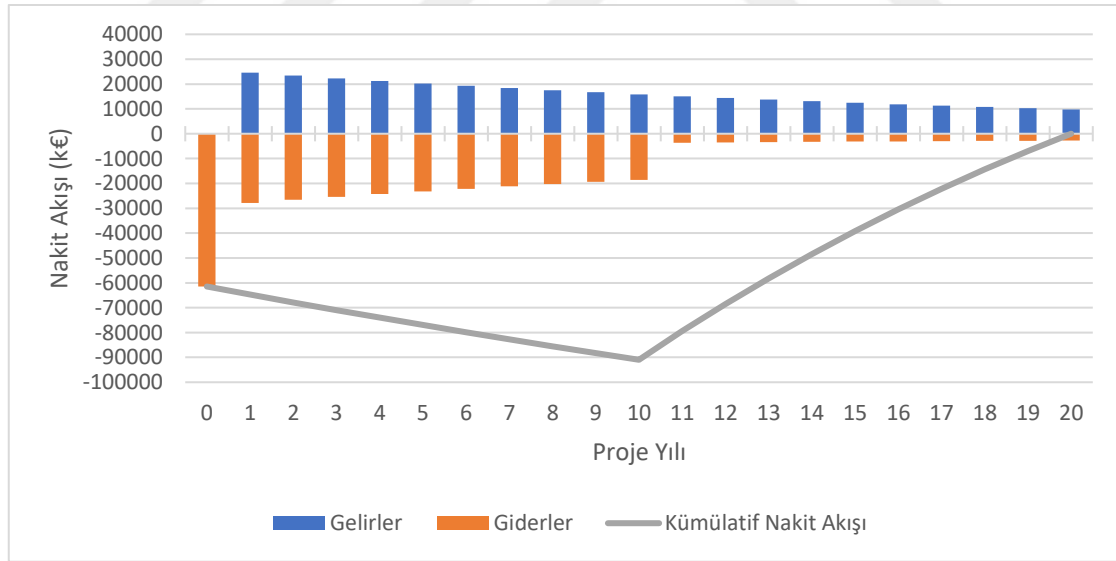
Tesis toplam yatırım maliyeti	333097,38 k€
Kredi kullanım oranı	0,75
Nakit ödeme	83274,34 k€
Kredi kullanım miktarı	249823,03 k€
Faiz oranı	0,05
Iskonto oranı	0,05
Enflasyon	0,02
Taksit sayısı	10 yıl
Kredi taksiti	32762,99 k€/yıl
Toplam kredi geri ödemesi	327629,89 k€/yıl
Toplam bakım	6661,95 k€/yıl
Yıllık sağlanan enerji	481458,90 MWh/yıl
Metanol üretim miktarı	39367,00 t/yıl
Güneş enerjisi birim fiyatı (LCOE _{Güneş})	72,65 €

Yukarıda belirtilen LCOE formülü ile yapılan hesaplamalarla güneş paneli santralinden üretilen seviyelendirilmiş elektrik maliyeti; **LCOE_{Güneş} : 72,65 €/MWh'dir.**

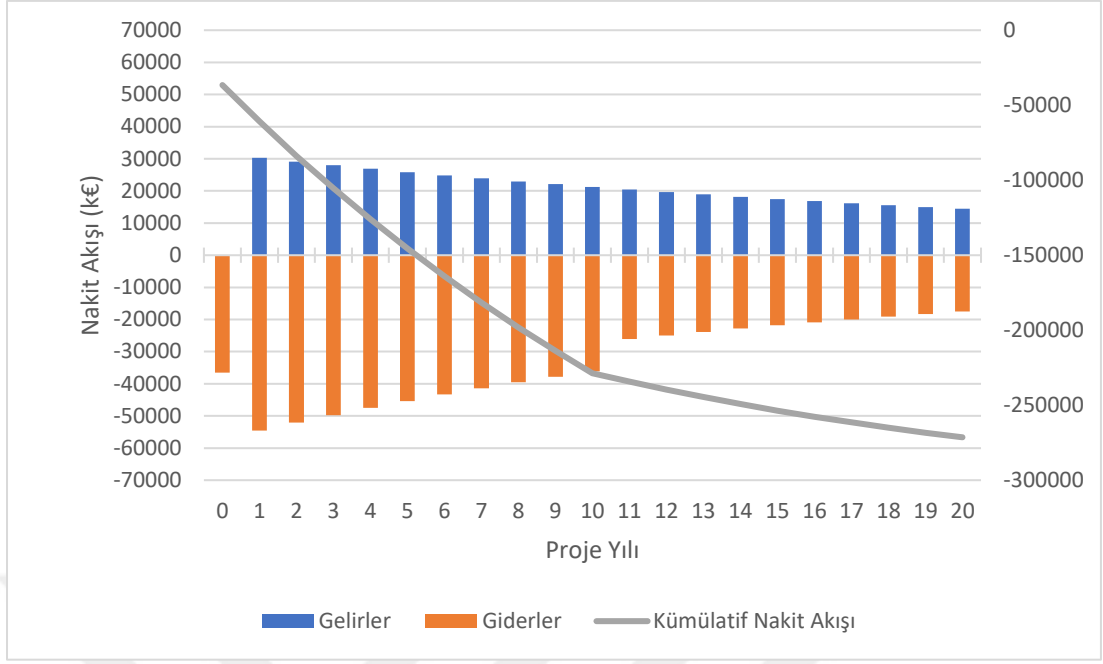
Tablo 4.19. Metanol tesisi kurulumu için gerekli yatırım girdileri

Tesis inşaat süresi	1 yıl
Tesis çalışma ömrü	20 yıl
Tesis kurulum maliyeti	146231,83 k€
Kredi kullanım oranı	0,75
Nakit ödeme	36557,96 k€
Kredi borcu	109673,87 k€
Faiz oranı	0,05
Iskonto oranı	0,05
Enflasyon	0,02
Taksit sayısı	10 yıl
Kredi taksiti	14383,16 k€/yıl
Toplam kredi geri ödemesi	143831,57 k€/yıl
Elektrik tüketimi (LCOE _{Güneş} kullanılmıştır.)	34979,00 k€/yıl

Güneş enerjisi kullanılarak üretilen seviyelendirilmiş metanol maliyeti LCOM formülü ile **LCOM_{Güneş} : 1003,21 €/t** hesaplanmıştır.



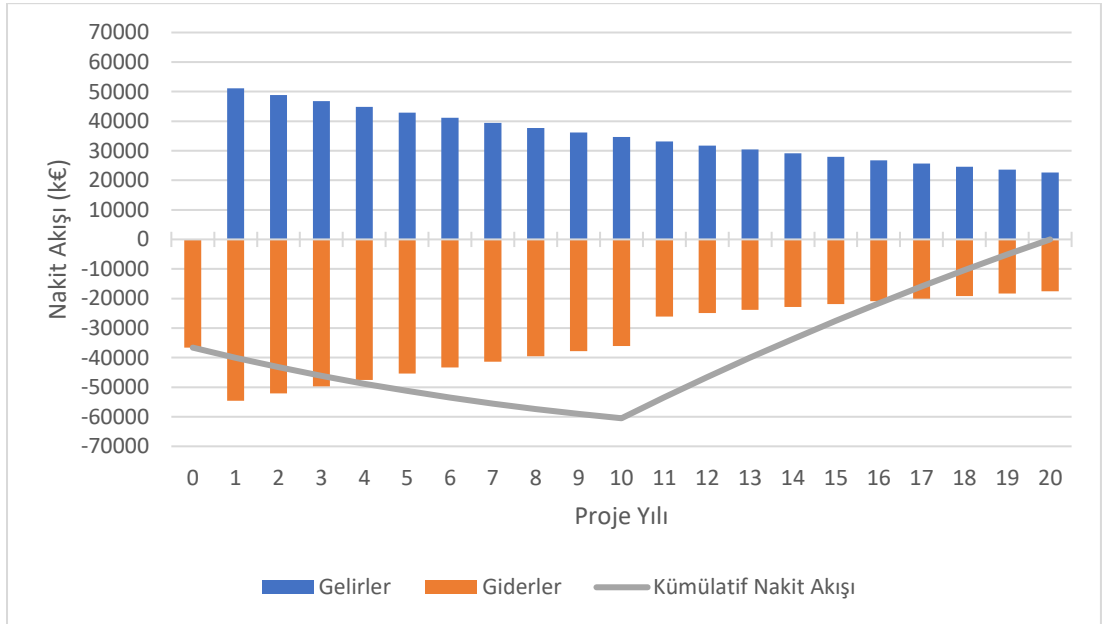
Şekil 4.9. Güneş paneli santrali kurulumu için nakit akışı



Şekil 4.10. Güneş enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında metanol tesisi kurulumu için öngörülen nakit akışı

(Fosil metanol mevcut piyasa değeri = 450 €/t olarak alınmıştır.)

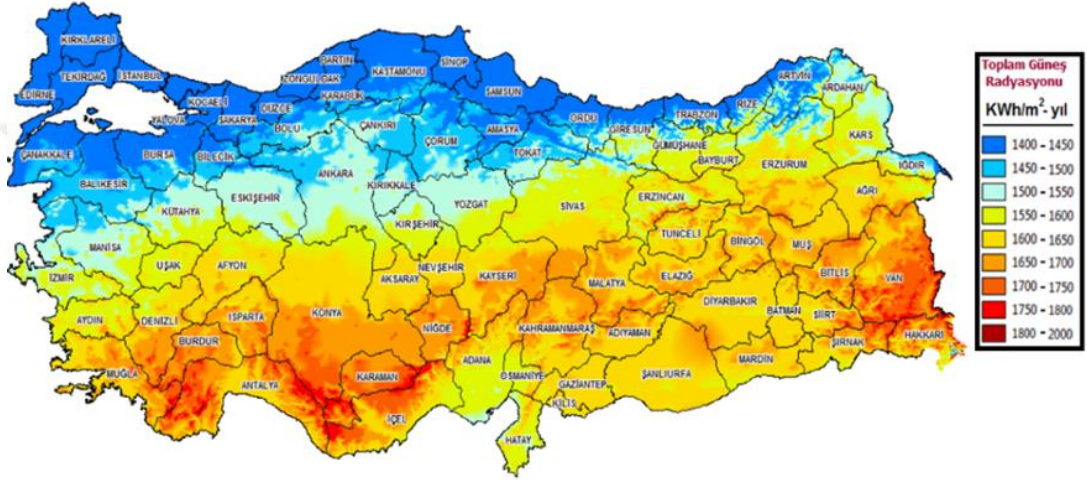
Güneş enerjisi kullanılarak üretilen metanol; mevcut piyasa değeri ile satıldığında 20 yıl çalışması ön görülen metanol tesisinin net bugünkü değeri -271400 k€ olarak hesaplanmıştır. Mevcut piyasa değerinde satılması tesisin zarar edeceğini göstermektedir. Nakit akışı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Güneş enerjisi kullanılan metanol tesisi için nakit akışı

Güneş enerjisi kullanılarak üretilen seviyelendirilmiş metanol maliyeti;
($LCOM_{Güneş}$) = 1003,21 €/t.

20 yıl çalışması ön görülen metanol tesisinin net bugünkü değeri sıfır olacak şekilde güneş enerjisi kullanılarak üretilen seviyelendirilmiş metanol maliyeti hesaplanmıştır. Nakit akışı Şekil 4.9. ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli haritası [40]

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yıllık CO₂ salınımı 56089 ton olan bir fabrikanın CO₂'i kullanılarak güneş ve rüzgâr enerjisi ile yeşil hidrojen ve yenilenebilir metanol üretiminin teknik ve ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Tesis yeşil hidrojen ve yakalanan karbon dioksit kullanarak saatte 4993 kg yenilenebilir metanol üretmeyi amaçlamaktadır. Hidrojen, su elektrolizi kullanılarak yenilenebilir elektrik ile üretilirken, karbondioksit fabrikanın bacalarındaki egzoz gazından amine tabanlı bir CO₂ absorpsiyon sistemi kullanılarak ayrılmaktadır. Referans alınan [16] makale ile gerçekleştirilen süreç modellemesi sonucunda elde edilen verilerle süreç optimizasyonu yapılmış yenilenebilir enerji ile elde edilen metanol maliyetleri için detaylı bir ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Süreç optimizasyonu sonrasında, ticari ölçek deneyimlerinden elde edilen sermaye ve işletme maliyetleri temel alınarak ve 20 yıl ömür süresi varsayılarak detaylı bir ekonomik analiz yapılmıştır. Güneş enerjisiyle elde edilen metanolün ton başına seviyelendirilmiş maliyeti LCOM 1003,21 €/ton, LCOE 72,65 €/MWh, rüzgâr enerjisiyle elde edilen metanolün ton başına maliyeti LCOM 658,84 €/ton, LCOE 44,49 €/MWh olarak hesaplanmıştır. Ancak, fosil yakıtlardan elde edilen metanolün ton başına maliyeti sadece 450 €'dir. Bu verilere göre, şu anda güneş ve rüzgâr enerjisi ile üretilen metanol, fosil yakıtlardan elde edilen metanol ile rekabet etme seviyesine ulaşmamış olduğu görülmektedir. Fosil yakıtların daha düşük maliyeti, hâlâ enerji üretiminde rekabet avantajına sahip olduklarını göstermektedir. Ancak, gelecekteki Avrupa CO₂ salınımı üzerindeki ceza politikalarının etkisiyle orta vadeli bir gelecekte rekabetçi olabileceği öngörüsü desteklenmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, yenilenebilir metanol üretimi konusunda ekonomik rekabetin, su elektrolizi ve CO₂ yakalama teknolojilerinin yeni ve gelişmekte olan teknolojiler olduğu daha verimli elektroliz, yenilenebilir enerji teknolojileri ve enerji politikaları gibi faktörlere bağlı olarak şekilleneceğini göstermektedir.

CO₂ salınımı azaltma ve enerji depolama kabiliyetleri ile dikkatleri üzerine çeken yeşil metanol üretimindeki teknolojik gelişmeler ile birlikte önümüzdeki yıllarda fosil yakıtların yerini alabileceğine işaret etmektedir. İncelediğim araştırmalarda 2035 yılında taşıtlarda metanol kullanımına geçilmesi hedeflenmektedir. Gerekli araştırmalar yapılarak bu yönde çalışmalara hız kazandırılması önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Bos, M., Kersten, S., Brilman, D., (2019). Wind power to METANOL: Renewable METANOL production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture. *Applied Energy* Volume 264, 15 April 2020, 114672.
- [2] Rivera-Tinoco, R., Farran, M., Bouallou, C., Auprêtre, F., Valentin, S., Millet, P., Ngameni, J.R. (2015). Investigation of power-to-METANOL processes coupling electrolytic hydrogen production and catalytic CO₂ reduction. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 41, Issue 8, 2 March 2016, Pages 4546-4559.
- [3] Pérez-Fortes, M., Schöneberger, J., Aikaterini Boulamantia, C., Tzimas, E. (2015). METANOL synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy* Volume 161, 1 January 2016, Pages 718-732.
- [4] Zucker A., González-Aparicio I., Pérez-Fortes M., Tzimas E. (2017). Opportunities of Integrating CO₂ Utilization with RES-E: a Powerto-METANOL Business Model with Wind Power Generation. *Energy Procedia* Volume 114, Pages 6905-6918.
- [5] Mar Pérez-Fortes, Jan C. Schöneberger, Aikaterini Boulamanti, Evangelos Tzimas. (2016). METANOL synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy* Volume 161, Pages 718-732.
- [6] M. Rivarolo, D. Bellotti, L. Magistri, A.F. Massardo. (2016). Feasibility study of METANOL production from different renewable sources and thermo-economic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 41, Issue 4, Pages 2105-2116.
- [7] A.K. Sayah, A.K. Sayah. Wind-hydrogen utilization for METANOL production: An economy assessment in Iran. (2011). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 15, Issue 8, Pages 3570-3574
- [8] D. Bellotti, M. Rivarolo, L. Magistri, A.F. Massardo. (2017). Feasibility study of METANOL production plant from hydrogen and captured carbon dioxide. *Journal of CO₂ Utilization* Volume 21, Pages 132-138
- [9] Konstantin Rauchle, Ludolf Plass, Hans-Jürgen Wernicke, and Martin Bertau. METANOL for Renewable Energy Storage and Utilization. (2016). *Energy Technology* Volume 4, Issue 1.
- [10] Yu Gu, Danfeng Wang, Qianqian Chen, Zhiyong Tang.(2022) Techno-economic analysis of green METANOL plant with optimal design of renewable hydrogen production: A case study in China. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 47, Issue 8, Pages 5085-5100.
- [11] Konstantinos Atsonios, Kyriakos D. Panopoulos, Emmanuel Kakaras. (2015) Investigation of technical and economic aspects for METANOL production through CO₂ hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 41, Issue 4, Pages 2202-2214.

- [12] Hank C., Gelpke S., Schnabl A., White R., Full J., Wiebe N., Smolinka T., Schaadt A., Henning H., and Hebling C. (2018). Economics & carbon dioxide avoidance cost of METANOL production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide power-to-METANOL. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/se/c8se00032h> (Erişim tarihi: 01.12.2023)
- [13] Boreum L., Changgwon C., Heehyang K., Ayeon K., Yong-Uk S., Junaid H., Hankwon L. (2021). Economic Parity Analysis of Green METANOL Synthesis Using Water Electrolysis Based on Renewable Energy
- [14] Prof. Michael Bowker. (2019). METANOL Synthesis from CO₂ Hydrogenation. ChemCatChem, 11, 4238–4246, Wiley Online Library. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cctc.201900401> (Erişim tarihi : 01.12.2023).
- [15] Matzen M., Alhajji M., Demirel. (2015). Chemical storage of wind energy by renewable METANOL production: Feasibility analysis using a multi-criteria decision matrix. Energy Volume 93, Part 1, Pages 343-353. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215012530> (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- [16] Sollai S., Porcu A., Tola V., Ferrara F., Pettinau A. (2023). Renewable METANOL production from green hydrogen and captured CO₂: A techno-economic assessment. Journal of CO₂ Utilization Volume 68, 102345. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982022004644> (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- [17] Tozlu A. (2022). Techno-economic assessment of a synthetic fuel production facility by hydrogenation of CO₂ captured from biogas. International Journal Of Hydrogen Energy, 47 (5): 3306–3315 (2022). International Journal of Hydrogen Energy Volume 47, Issue 5, Pages 3306–3315. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920346012> (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- [18] Nguyen T., Zondervan E. (2019). METANOL production from captured CO₂ using hydrogenation and reforming technologies_ environmental and economic evaluation. Journal of CO₂ Utilization Volume 34, Pages 1-11 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982019300320> (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- [19] Battaglia, P., Buffo, G., Ferrero, D., Santarelli, M., and Lanzini, A. (2021). METANOL synthesis through CO₂ capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment. Journal Of CO₂ Utilization, 44. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982020310374/> (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- [20] Ma, Q., Chang, Y., Yuan, B., Song, Z., Xue, J., and Jiang, Q. (2022). Utilizing carbon dioxide from refinery flue gas for METANOL production: System design and assessment. Energy, 249: 123602.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222005059>
(Erişim tarihi: 01.12.2023)

- [21] Nikolaidis P., Poullikkas A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67(2017)597–611.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305366>
(Erişim tarihi: 01.12.2023)
- [22] Clarke R., Giddey S., Badwal S. (2010). Stand-alone PEM water electrolysis system for fail safe operation with a renewable energy source. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 35, Issue 3, Pages 928-935.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319909018709>
- [23] Nejadian M., Ahmadi P., Houshfar E. (2023). Comparative optimization study of three novel integrated hydrogen production systems with SOEC, PEM, and alkaline electrolyzer. *Fuel*, volume 336, 126835.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122036596>
- [24] Yodwong B., Guilbert D., Phattanasak M., Kaewmanee W., Hinaje M., Vitale G. (2020). Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control: A Short Review. *Carbon-Based Materials for Hydrogen Production, Storage and Conversion C*, 6(2), 29. <https://www.mdpi.com/2311-5629/6/2/29>
- [25] Razmi A., Sharifi S., Gholamian E., Arabkoohsar A., Shahbakhti M. (2023). Green hydrogen. *Future Grid-Scale Energy Storage Solutions Mechanical and Chemical Technologies and Principles*, Pages 573-619.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323907866000066>
- [26] Kaya M. (2021). Modelling of a solid oxide water electrolyzer and investigation of the cell performance on different working conditions. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 36:4 (2021) 2109-2119
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1483520>
- [27] Emam A. , Hamdan M., Abu-Nabah B., Elnajjar E.. (2023). Enhancing alkaline water electrolysis through innovative approaches and parametric study. *International Journal of Hydrogen Energy*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923059736>
- [28] Panigrahy B., Narayan K., Ramachandra B. (2022). Green hydrogen production by water electrolysis: A renewable energy perspective. *Materials Today: Proceedings* Volume 67, Part 8, Pages 1310-1314.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322060709>.
- [29] Yu-Da Hsiao, Chuei-Tin Chang. (2023). Expandable neural networks for efficient modeling of various amine scrubbing configurations for CO₂ capture. *Chemical Engineering Science* Volume 281, 119191.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250923007479>.
- [30] Kangkang Li, Wardhaugh Leigh, Paul Feron, Hai Yu, Moses Tade. (2016). Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA) based CO₂ capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements. *Applied Energy* Volume 165, 1, Pages 648-659.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360261915016827>.

- [31] Mavd P.R. Teles, Mads Valentin Bram, Hamid Reza Shabani, Sajjad ShojaMajidabad , Jesper Liniger , Xiaoti Cui. (2024). Optimization and 3E analysis on variable operational conditions of a large, medium and small size Green METANOL Plant. Energy Conversion and Management Volume 300, 117870. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423012165>
- [32] Quirina I. Roode-Gutzmer, Doreen Kaiser, Martin Bertau. (2019). Renewable METANOL Synthesis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaAChemBioEng Rev2019,6, No. 6, 209–236. [https:// www. researchgate. net/publication /337716604_Renewable _METANOL_Synthesis](https://www.researchgate.net/publication/337716604_Renewable_METANOL_Synthesis).
- [33] Hobson C., Márquez C. (2019). Renewable METANOL. <https://www.METANOL.org/wp-content/uploads/2019/01/> (Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [34] Falcao D., Pinto R. (2020). A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners, Journal of Cleaner Production Volume 261, 121184. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620312312>.
- [35] Zhao L., Brouwer J. (2015). Dynamic operation and feasibility study of a self-sustainable hydrogen fueling station using renewable energy sources, Int. J. Hydrog. Energy 40, 3822–3837. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.044>.
- [36] Peterson D., Vickers J., DeSantis D. (2020). DOE hydrogen and fuel cells program record 19009: Hydrogen production cost from PEM electrolysis. US DepartmentofEnergy.https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19009_H2_producti on_cost_ pem_electrolysis_2019.pdf.
- [37] <https://sbsolar.com.tr/gunes-paneli/>(Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [38] https://www.thewindpower.net/turbine_en_33_vestas_v90-3000.php (Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [39] http://www.sgfenjerji.com/turkiye_elektrik_enerjisi_2.html (Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [40] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes/>(Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [41] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1247-vestas-v112-3.45> (Erişim tarihi: 21.12.2023)
- [42] https://assets-global.website.files.com/64c38ca9b1a2e59bd5b7d64a/65685f899e0de7ff6b56c02e_ ENERCON%20E-138%20EP3%20en.pdf (Erişim tarihi: 21.12.2023)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID ID : 0009-0007-5124-774X

Adı Soyadı : Gülay H. Keskin

Yabancı Dil: : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi

- Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü