KAMUOYUNA AÇIK BİLGİ NOTU

TÜRKİYE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VAKFI

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI

KARBONSUZLAŞTIRILMASI ZOR SEKTÖRLERDE YENİ NESİL YAKIT TEKNOLOJİLERİ

DERİN ANALİZ RAPORU ÖZET

Mayıs 2025

TÜRKİYE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VAKFI

www.ttgv.org.tr
MERKEZ
ANKARA
Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent Ankara
Telefon: 0312 265 02 72
Faks: 0312 265 02 62

Dr. E. Serdar Gökpınar
Dr. Burak Baykal
Dr. Cemil Kanat Sarısoy
Sevtap Gökçe

Bu çalışma TTGV tarafından yaptırılmıştır. Çalışmanın tümü ya da bir bölümü TTGV'nin izni olmadan kopya edilemez ancak kaynak göstermek kaydı ile alıntı yapılabilir.

Bu kitapçık içerisinde yer alan tasarımlar, yazılar, logolar, grafikler de dahil olmak üzere, tüm yazılı ve görsel materyale ilişkin her türlü mali, manevi ve ticari haklar yahut bunları kullanma yetkisi TTGV'ye aittir. Sözü edilen içeriğin kişisel ve ticari olmayan kullanım dışında herhangi bir amaçla kullanılması, kopyalanması, işlenmesi, herhangi bir şekil veya yöntemle, tamamen veya kısmen, doğrudan veya dolaylı, geçici veya sürekli olarak çoğaltılması, kiralanması, ödünç verilmesi, satışa çıkarılması veya diğer yollarla dağıtılması kesinlikle yasaktır.

Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5 inci maddesinin ikinci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir.

1.

Giriş

Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV), 2023 yılından itibaren, iklim değişikliğinin getirdiği uluslararası gerekliliklere uyum sağlamak ve Türkiye sanayisinin küresel rekabet gücünü artırmak amacıyla odağını iklim teknolojilerine yöneltmiştir. Bu doğrultuda, ölçeklenebilir ve etkisi yüksek yenilikçi iklim teknolojilerinin geliştirilmesi ve sahada uygulanması amacıyla üç fazlı bir destek modeliyle "Öncül Proje Programı" hayata geçirilmiştir. Program; Öncül Tohum, Öncül Demo ve Öncül Yatırım destek fazları ile kapsamlı bir yapıdadır.

Öncül Tohum ve Öncül Demo programlarında erken aşama teknoloji sahipleri ve girişimlere yönelik teknoloji kıymetlendirme ve pazara çıkış odaklı destek veren özgün hızlandırma metodolojileri uygulanırken; Öncül Yatırım programında ise ülkemizde bilinen uygulamalardan farklı, türünün ilk örneği iklim teknolojisi çözümlerine yatırım yaparak uygulanabilirliğini göstermek ve ölçeklenme süreçlerini hızlandırmak hedeflenmiştir.

Bu kapsamda Öncül Yatırım programında, ilk olarak TTGV tarafından belirlenen öncelikli iklim teknolojisi özelinde derin analiz çalışması yürütülmektedir. Bu süreçte, kapsamlı bir literatür taramasının yanı sıra, yurt içi ve yurt dışındaki paydaşlarla bir araya gelinerek teknolojinin mevcut durumu değerlendirilmekte ve sektörel ihtiyaçlar detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Derin analiz çalışması sonucunda, teknoloji hakkında temel bilgileri, paydaş yaklaşımlarını ve yatırım yapılabilirliğine dair değerlendirmeleri içeren bir bilgilendirme raporu hazırlanmaktadır.

Derin analiz raporu kapsamında, erken aşama teknoloji potansiyeli taşıyan çalışmalar yapan araştırmacılar ile ürün/hizmet demosu geliştirebilecek girişimler de belirlenmekte

ve bu araştırmacılara/girişimlere Öncül Proje Programı'nın "Öncül Tohum ve Demo" fazları kapsamında destek sağlanmaktadır. Programın "Öncül Yatırım" fazında ise, derin analiz çalışması yapılan ilgili iklim teknolojisinin – ticari ölçekte ya da ticari ölçek öncesinde – türünün ilk örneği olarak sahada uygulanması yoluyla kapasite artışı sağlanması, sektörün gelişimine katkıda bulunulması, yerlileştirme ve sanayileşme fırsatlarının tetiklenmesi hedeflenmektedir.

TTGV Öncül Proje Yatırım Programı kapsamında, VI. Derin Analiz konusu olarak "Karbonsuzlaştırılması Zor Sektörlerde Yeni Nesil Yakıt Teknolojileri" seçilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan TTGV uzman çalışma takımı tarafından; havacılık, denizcilik, ağır yük taşımacılığı ve enerji yoğun sanayiler arasında olan demir-çelik ve kimya-petrokimya gibi fosil yakıtlara yüksek bağımlılığı bulunan sektörlerde biyoyakıt ve sentetik yakıt teknolojilerinin emisyon azaltımı kapsamındaki potansiyeli incelenmiştir. Derin analiz çalışması süresince hem Türkiye'de hem de uluslararası ölçekte faaliyet gösteren 120'den fazla uzman, akademisyen ve sektör temsilcisi ile birebir veya çevrimiçi görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu görüşmelerde yeni nesil yakıt teknolojilerinin teknik, ekonomik, yasal ve çevresel boyutları tartışılmıştır.

Derin Analiz çalışması, küresel ve yerel bağlamda yeni nesil yakıt teknolojilerinin uygulanabilirliğini değerlendirirken üç temel unsura odaklanmaktadır. İlk olarak, dünya genelindeki enerji dönüşüm hedefleri doğrultusunda karbonsuzlaştırılması zor sektörlerdeki kritik ihtiyaçların analiz edilmesi amaçlanmaktadır. İkinci olarak, yeni nesil biyoyakıtlar ile sentetik yakıt teknolojilerinin teknik, ekonomik, yasal ve çevresel açılardan incelenmesi, ardından Türkiye'deki mevcut durum masaya yatırılarak bu sektörlerde ortaya çıkabilecek fırsatlar ve rekabet avantajı sağlayabilecek alanların tespit edilmesi hedeflenmektedir. Son olarak da bu teknolojilerin iş modellerine entegrasyonu için potansiyel senaryolar oluşturularak ekosistem paydaşlarıyla etkileşim sağlanması amaçlanmaktadır.

Tekno-ekonomik bir perspektif ışığında yürütülen bu çalışma, biyoyakıt ve sentetik yakıt teknolojilerindeki gelişmeler, politika ve mevzuat çerçeveleri, yatırım ekosistemleri ve piyasa dinamikleri dahil çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Bu sayede söz konusu teknolojilerin mevcut altyapıya nasıl entegre edilebileceği, hangi yatırım fırsatlarını sunabileceği ve hangi ölçeklenebilir iş modellerinin geliştirilebileceği ortaya konulmaktadır. Geniş versiyondan türetilmiş olan elinizdeki bu özet rapor, karbonsuzlaştırılması zor sektörlerin enerji dönüşüm süreçlerinde biyoyakıtlar ve sentetik yakıtların barındırdığı potansiyel, uygulanabilirlik koşulları ve olası iş modellerini derinlemesine inceleyerek, bu alandaki yatırımlara yön verecek stratejik bir rehber niteliği taşımaktadır.

Aşağıda bu calışmada elde edilen sonuçlara dair özet bulgu ve değerlendirmeler yer almaktadır.

1. Biyoyakıt üretim teknolojilerinin seçiminde, üretim verimini ve yakıtın kalitesini de doğrudan etkileyen ham madde (biyokütle) faktörü oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Kullanılan ham maddenin nem içeriği, kimyasal kompozisyonu (selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriği), yağ, şeker ve nişasta içeriği, tercih edilecek biyokimyasal veya termokimyasal dönüşüm teknolojisini belirlemektedir. Örneğin; ham maddenin yüksek nem içeriğine sahip olması, ekstra kurutma maliyetleri sebebiyle geleneksel termokimyasal teknolojilerin (piroliz ve gazlaştırma) maliyetlerini yükseltmekte ve verimini düşürmektedir. Islak biyokütle olarak tabir edilen bu tarz ham maddelerin Hidrotermal Karbonizasyon (HTC), Hidrotermal Sıvılaştırma (HTL) ve Hidrotermal Gazlaştırma (HTG) gibi farklı sıcaklık ve basınçlarda, su içinde biyokütlenin katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülmesine dayanan teknolojilerle işlem görmesi gerekmektedir. Ayrıca 1. nesil biyodizel veya geleneksel biyodizel olarak tabir edilen FAME (Yağ Asidi Metil Esterleri) için ham maddenin yağ içeriği çok önemlidir. Kanola, soya, ayçiçek, palm yağı gibi yüksek yağ içeriğine sahip biyokütleler için transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi yapılabilirken, yağ içeriği düşük ham maddeler ve orman/tarım atıkları gibi biyokütleler için lignoselülozik fermantasyon/fermantasyon veya termokimyasal dönüşüm teknolojileri daha uygundur. Uzun yıllardır kullanılan Piroliz gibi daha konvansiyonel teknolojilerden çok Hidrotermal Gazlaştırma/Sıvılaştırma ve biyokütle tabanlı Fischer-Tropsch (FT) prosesi gibi dönüşüm teknolojileri daha gelişime açık teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Mikroalgler ve deniz yosunları gibi yeni nesil biyokütlelerin biyoyakıtlara dönüşümünde lipit ekstraksiyonu veya alg fermantasyonu gibi yöntemler kullanılarak biyodizel ve biyometan üretimi yapılmaktadır. Henüz çok erken aşama bir teknoloji olsa da genetik olarak modifiye edilmiş mikroorganizmalardan da sentetik biyoloji metodları veya yapay fotosentez (artificial photosynthesis) gibi yöntemlerle de biyoyakıt üretilmektedir. Genel bir değerlendirme yapıldığında kullanılacak biyokütle türlerine göre seçilen biyoyakıt üretim teknolojilerinin her birinin sağladığı farklı teknik ve ekonomik avantajlar ya da dezavantajlar bulunmaktadır. Bu noktada elde edilecek biyoyakıtın kalite parametrelerini (setan sayısı, aromatik içeriği, vb.) ve kullanım alanlarını belirleyerek ham madde ve teknoloji seçimi yapılmalıdır.
2. Sentetik yakıt üretim teknolojilerinin seçiminde ise kullanılacak karbon kaynağı (noktasal kaynaktan/doğrudan havadan yakalanan CO_2, biyojenik CO_2, atıklar vb.) ve hidrojen üretim yönteminin (elektroliz ve buhar reformlama) seçimi önemlidir. Elektroliz ve sentez

süreçlerinin enerji tüketimi değerlendirilerek, enerji girdisiyle elde edilen yakıt miktarının oranı optimize edilmelidir. Ayrıca üretilen sentetik yakıtın yaşam döngüsü analizi (LCA) yapılarak ve karbon azaltım potansiyeli ve enerji verimliliği en yüksek teknolojiler tercih edilmelidir. Tüm bunlara ek olarak zaten günümüz koşullarında yüksek yatırım maliyetlerine sahip olan elektroyakıtlar gibi sentetik yakıtların üretiminde ilk yatırım ve operasyon maliyetlerini yükseltecek (Doğrudan hava yakalama "DAC" veya hidrojen üretiminde katı oksit "SOEC" elektrolizörler gibi) ve henüz ölçeklenmemiş teknolojilerden kaçınmak gerekebilir. Ayrıca, PtL gibi teknolojiler kullanılarak üretilecek e-yakıtlarda yenilenebilir enerjiyi sağlayacak GES ve RES gibi altyapıların kapasite faktörleri ve enerji depolama sistemlerinin verimlilikleri de sentetik yakıt üretimini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyecek faktörlerdir. Bu kapsamda ülkemizde güneş ve rüzgar potansiyelleri ve karbon kaynakları ile su kaynaklarına yakınlıkları dikkate alınarak PtL tesislerinin kurulabileceği doğru lokasyonların belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

3. TTGV tarafından daha önce hazırlanan "Ekonomik Değer Yaratma Potansiyeline Sahip Karbon Yakalama Kullanım Depolama (KYKD) ve Karbondioksit Giderim (KDG) Çözümleri" raporunda da belirtildiği gibi CO_2 depolama çözümleri, iklim hedefleri doğrultusunda KYKD projelerinin en kritik aşaması olarak kabul edilmektedir. Ancak ülkemizde uygun depolama alanları ile ilgili emre amade kapasitenin yetersizliği ve potansiyel kapasitenin henüz tespit edilememiş olması noktasal kaynaklardan yakalanacak CO_2'nin en azından bir kısmının yerinde kullanım (on-site utilisation) senaryolarını en hızlı uygulanabilir seçenek olarak ön plana çıkarmaktadır. Özellikle karbon emisyonlarını değerlendirmek ve katma değerli ürünlere çevirmek isteyen bazı sektörler için yakalanacak CO_2'nin SAF, metanol ve etanol gibi yüksek katma değerli kimyasallara çevrilmesi özel sektörün karbon yakalama-kullanım ve depolama (CCUS) teknolojilerine geçiş maliyetlerinin bir kısmını sübvanse edeceği için ekonomik açıdan anlamlı olacaktır. Bu tarz bir yatırım planı, emisyonları olan birçok Türk şirketinin temel faaliyet alanı dışında kalmasına rağmen emisyon yoğun petrokimya, çimento, cam-seramik, demir-çelik gibi bazı endüstriler için orta-uzun vadede anlamlı bir yatırım fırsatı olarak değerlendirilebilir.

4. Biyokütle temelli HVO (Hidrojenle İşlenmiş Bitkisel Yağ) ve HEFA (Hidroişlenmiş Esterler ve Yağ Asitleri) gibi halihazırda pazara hâkim biyoyakıtların 2035 yılına kadar global yenilenebilir dizel ve global SAF pazarlarını domine etmesi beklenmektedir. Özellikle biyodizel üretiminde kullanılan geleneksel bitkilere (kanola, ayçiçeği, soya ve palm yağı) alternatif olarak pelemir (Cephalaria syriaca) gibi yağlı tohumlu özgün ve az bilinen

bitki türlerinin mümkünse tarıma elverişli olmayan arazilerde yetiştirilmesi ölçeklenebilir ham madde arayışına katkı sağlayacağından HVO ve HEFA üretimi için kritik önem arz etmektedir. Ayrıca "HVO Sınıf III" olarak bilinen hayvansal yağların ve toplanması oldukça güç olan orman atıklarının daha yaygın kullanımının yolları da araştırılmalıdır. Bu noktada Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) gibi ulusal veritabanlarının sürekli güncellenmesi de oldukça önemlidir. Büyük potansiyeline karşın gıda arz güvenliği nedeniyle yakın gelecekte yakıt üretimi için kullanılan biyo-ham madde (bio-feedstock) ve biyokütle arzında yaşanması kuvvetle muhtemel darboğazlar, kullanılmış yemeklik yağ (UCO) ve palmiye yağı değirmen atık suyu (POME) gibi kritik ham maddelerde yapılan tağşiş ve sahtecilik (uluslararası ISCC sertifikasyonu olmayan ham maddelerin global piyasalara sokulması) girişimleri, solar panellerin tarıma elverişli ekili alanları zamanla tehdit etmesi gibi kronik sorunların çözülememesi halinde 2035 yılından önce de sentetik yakıtlara geçişin hızlanması öngörülmektedir.

5. Bugün için farklı biyolojik kökenli ham maddelerden, petrol rafinerilerine entegre halde jet yakıtı üretilmesi (co-processing) gibi seçenekler SAF olarak kabul edilse de yakın gelecekte bu üretim yönteminin petrokimya süreçlerine entegre halde yürütülmesi nedeniyle SAF olarak kabul edilmeme riski oldukça yüksektir. Avrupa-Orta Doğu ve Afrika bölgesinde planlanan 32 adet Güçten sıvıya (PtL) sentetik SAF tesis yatırımına karşın yalnızca 4 adet Co-Processing SAF (halihazırda operasyonel 13 Co-processing tesis bulunuyor) üretim tesisi yatırım planı olması bu tespiti destekler niteliktedir. Ülkemizde Tüpraş ve DB Tarımsal Enerji SAF uretimi yapacağını acıklamıştır. Bununla birlikte, henüz ülkemizde güçten sıvıya (Power-to-Liquid) PtL veya alkolden jet yakıtına (alcohol-to-jet) AtJ gibi sentetik yakıt uretimi konusunda acıklanmış bir üretim ve yatırım planlaması bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu alanda yapılacak öncül girişimler ülkemizde ilk defa yapılacak türünün ilk örneği kritik bir yatırım olabilir. 100-250 yolcu kapasiteli ve 2.5 saatin altındaki orta menzilli uçuşlarla, 250 yolcunun üzerindeki kapasitelerde ve 2.5 saatin üzerindeki uzun menzilli uçuşlar toplamda sivil havacılık kaynaklı sektörel emisyonların %75'lik kısmını oluşturmaktadır. Küresel PtL pazarının, 2023-2031 yılları arasında %51,1 ile büyümesi[1], AtJ pazarının ise 2025-2034 yılları arasında %18,2 ile büyümesi öngörülmektedir[2]. Sivil havacılık sektörünün 2050 yılına kadar dekarbonizasyonu için sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımından başka ikinci bir alternatif bulunmamaktadır. 2035 yılından itibaren uçaklarda kullanılacak SAF'ın en az %5'lik kısmının sentetik yakıtlardan olması zorunluluğu da dikkate alındığında PtL

veya AtJ teknolojilerinin mevcut diğer teknolojilere göre hızla ölçeklenebileceği tahmin edilmektedir.

6. Türkiye, jeopolitik konumu sayesinde doğu ve batı arasındaki enerji transferinde TANAP ve Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattı gibi projelerle stratejik bir enerji köprüsü olarak konumlanmaktadır. Bununla birlikte güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları açısından iyi bir potansiyele sahip olan ülkemiz, özellikle Avrupa enerji koridorlarına yakınlığı nedeniyle farklı yakıtların ve enerji taşıyıcılarının (SAF, Hidrojen, Metanol, Amonyak, Biyometan, DME, vb.) taşınması konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Bu durum son yıllarda Avrupa'nın enerji bağımsızlığı konusunda duyduğu endişelerin artması ile birlikte daha da kayda değer hale gelmektedir. Enerji arzını çeşitlendirmeyi amaç edinen Avrupa Birliği, şimdilik kuzeydeki AB ülkelerinin rüzgâr enerjisi ve karbon depolama kapasitelerine güvense ve güneyinde bulunan Fas, Mısır ve Cezayir gibi ülkelere yatırım yapsa da SAF gibi niş yakıtlara erişim için ülkemizdeki potansiyeli değerlendirebileceği düşünülmektedir. Yapılan tahminlerde artan taleple birlikte küresel SAF arzının 2035 yılına kadar 20 milyon tonu aşması beklenmektedir[3]. Avrupa için kritik öneme sahip bir pazar olan ARA (Antwerp-Rotterdam-Amsterdam) liman ağı, Avrupa'nın SAF piyasasını yönetmektedir. 2030 yılında en büyük SAF üretim merkezleri haline gelecek Kuzey Amerika ve Asya (Singapur, Japonya) gibi uzak pazarlardan Avrupa'ya SAF getirmenin yüksek maliyeti ve ortaya çıkaracağı ek emisyon düşünüldüğünde Türkiye'nin sağlayacağı potansiyel SAF arzının Avrupa'daki alıcılar için oldukça kritik olacağı değerlendirilmektedir.

7. Türkiye'nin enerji arzı hala büyük ölçüde kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlara (%82) bağımlıdır ve kullanılan fosil yakıtların önemli bir bölümünü (%27'sini) kömür oluşturmaktadır. Bununla birlikte ülkemizdeki kömür rezervlerinin büyük ölçüde linyit türü kömürlerden oluştuğu bilinmektedir. Taş kömürünün aksine, linyit rezervlerimizin çok büyük bir kısmı düşük kalorifik değere sahiptir ve genellikle termik santrallerde elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Düşük kalorifik değere sahip yerli linyitlerimizin katma değerli kimyasallara ve yakıtlara dönüşmesi için yapılacak çalışmalar ülkemiz açısından stratejik öneme sahip olsa da global yatırım trendlerinin Coal-to-Liquid (CtL) teknolojisinden çıktığı göz önüne alındığında bu alanda yeni tematik konuların çalışılması gerekmektedir. Bu kapsamda Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) sistemlerinin entegrasyonu, biyokütle ile ortak gazlaştırma, modüler CtL tesisleri gibi güncel araştırma konularının dikkate alınması

gerekmektedir. Ülkemizde kömür rezervlerimizin daha etkin kullanımını araştırmak amacıyla bu tarz çalışmalar yapılmıştır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Enerji Enstitüsü yürütücülüğünde, yerli linyit kömürleri ve biyokütle kaynaklarını kullanarak benzin ve dizel gibi sıvı yakıtlar ve nafta gibi değerli kimyasalları elde etmek üzere 2009-2016 yılları arasında aktif olarak yürütülen TRIJEN (Biyokütle ve Kömür Karışımlarından Sıvı Yakıt Üretimi) projesi CBtL (Coal&Biomass-to-Liquid) teknolojisinin örneklerindendir. Kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen sentez gazı (karbonmonoksit ve hidrojen karışımı), özel katalizörler kullanılarak sıvı yakıtlara ve diğer kimyasal ürünlere dönüştürülmüştür. Büyük bir yatırımla başlatılan bu projenin sonuçlarının endüstriyel kullanım amacıyla vakit kaybetmeden hızlı bir şekilde ticari ölçeğe geçirilmesi ve geliştirilen katalizörlerin farklı alanlarda kullanımının da önü açılarak ticarileşmesi önemlidir.

8. YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) gibi mekanizmaların 10 yıllık destek süresi sonunda sonlanması ile birlikte özellikle 2015 yılında kurulmaya başlayan ilk biyogaz tesislerimizin ürettikleri elektriği şebekeye yeterli karlılıkla satamadıkları gözlenmektedir. Bu tesislere YEKDEM desteğinin verildiği yıllara oranla destek sonrası karlılık ciddi düşüş göstermektedir. Bu noktada gelişen teknolojiyle birlikte üretilen biyogazın yükseltilmesi (upgrade) sonucu elde edilen biyometan, daha yüksek bir verimlilikle üretildiğinden çok daha katma değerli bir ürün haline gelmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri de biyogaz tesislerinde kullanılan gaz motorlarının ilk yatırım, bakım ve işletme maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Bu nedenle biyogaz tesislerinin devamlılıklarını sağlayabilmeleri için zamanla Membran/PSA teknolojileri veya biyometanizasyon gibi yeni nesil teknolojilere geçiş yapması ve üreteceği biyometanı doğrudan doğalgaz şebekesine satabilmesi gerekmektedir. Örneğin; 2021 yılı öncesinde YEKDEM desteği alan ve biyogaz çevrim verimi yaklaşık 2 kWh elektrik/m^3 olan bir biyogaz tesisi, ürettiği 1 m^3 biyogaz için yaklaşık 16 TL/m^3 elektrik satış geliri sağlarken bu rakam YEKDEM desteği olmadan piyasa takas fiyatları dikkate alınarak yaklaşık 4,5 TL/m^3 seviyelerine kadar düşebilmektedir (2025 Mart ayı fiyatlarına göre). Buna karşın böyle bir tesis ürettiği biyometanı sisteme gaz olarak satabilirse 2025 yılı Nisan ayı fiyatlarına göre yaklaşık 12 TL/m^3 biyometan geliri sağlayabilmektedir. Ancak bugün için mevzuatlarımız ve idari düzenlemeler biyogaz tesislerinin doğalgaz şebekesine biyometan satışına izin vermemektedir. Ülkemizde toplam 116 biyogaz tesisi bulunduğu ve bu konudaki yeni yatırım potansiyeli dikkate alındığında doğalgaz şebekesine

besleme yapmak üzere gerekli yasal düzenlemelerin yapılmasının biyogaz ve biyokütle sektörünün sürdürülebilirliğine önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

9. Yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle elektro yakıt (e-yakıt) yatırımlarını en çok uzun süreli alım garantileri (off-take) ve üretilecek son ürünün (metanol, etanol, amonyak, kerosen, e-SAF vb.) pazar payı doğrudan etkilemektedir. Bu noktada ülkemizdeki doğru paydaşlarla kurulacak çok taraflı bir off-take yapısı olası bir yatırımının daha hızlı ve sağlıklı bir şekilde olgunlaşmasını sağlayabilir. Arz ve talebin belirsiz olduğu veya birden fazla talep tarafının oluşmadığı durumlarda yeşil hidrojen üretimi için gerekli elektrolizör yatırımlarının ve yüksek maliyetli karbon yakalama ünitelerinin kurulumu için gerekli yatırımların yapılamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle ülkemizde sentetik yakıt kullanıcısı havayolu şirketlerinin ve uluslararası havalimanlarımızın SAF projeksiyonları yaparak talep yaratması ve SAF yol haritalarını belirlemesi ülkemizdeki e-SAF yatırımlarını hızlandırması açısından kritiktir. Onikinci kalkınma planında net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda havayolu sektöründe sürdürülebilir havacılık yakıtları üretimine ve kullanımına yönelik çalışmaların destekleneceği belirtilmektedir. Bu noktada kamunun sağlayacağı destekler ve öncü platformların yönlendirmeleri de süreci hızlandırmaktadır. Örneğin; Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından hazırlanan taslak SAF yönetmeliğinin en kısa sürede yürürlüğe girmesi piyasaların oluşumunu hızlandırıcı ve yatırımcıların ilgisini çekici rol oynayacaktır. Benzer şekilde "Türkiye Sürdürülebilir Havacılık Platformu" tarafından SAF'ın benimsenmesine yönelik öneri niteliğinde hazırlanan yol haritası çalışması da ilgili tüm paydaşların eşgüdümlü ilerlemesi açısından oldukça önemli bir çalışmadır. Ayrıca uluslararası sivil havacılık için zorunlu olan karbon dengeleme ve azaltım sistemi olan CORSIA kapsamında, özellikle uzun menzilli uçuşlar için sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanımının artacağı ve bu yakıtlara yönelik yatırım ihtiyacının daha da hızlanacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte, ülkemizde sürdürülebilir yakıtların izlenebilirliği için uluslararası sertifikasyonlara (ör. ISCC, RSB) uyumlu bir yerli sertifikasyon ve izleme sisteminin geliştirilmesi, yatırım süreçlerinin hızlandırılması açısından önem taşımaktadır. Bu dönüşüm sürecinde, bu gibi alternatif yakıtların karbon avantajlarını doğrulayacak ulusal MRV (İzleme-Raporlama-Doğrulama) sistemlerinin oluşturulması da güvenilir bir karbon piyasasının gelişimi açısından gereklidir.

10. Denizcilik sektöründe alternatif yakıtların kullanımı son yıllarda IMO'nun (Uluslararası Denizcilik Örgütü) 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını %50 azaltma hedefleri ile

daha da hızlanmıştır. Buna karşın havacılık sektöründe yaşanan kararlı sürdürülebilirlik hareketinin bir benzeri bu sektörde yaşanmamakta, alternatif yakıtlara ve elektrifikasyona geçiş beklenenden daha yavaş gerçekleşmektedir. Bunun en önemli sebebi denizcilik sektöründe sivil havacılıktaki kadar sıkı regülasyonların ve yaptırımların olmamasıdır. Kısa vadede kullanılacak çözümler olarak biyodizel ve HVO gibi yenilenebilir dizel yakıtlar tercih edilmekte, Metanol yükselen bir teknoloji olarak yaygınlaşmaktadır. Uzun vadede kullanılacak bir çözüm olarak da yeşil amonyak kullanımı bazı güvenlik kaygıları ile birlikte sektörde değerlendirilmekte ve bu kapsamda motor/altyapı teknolojileri henüz yeni geliştirilmektedir. Hidrojenli veya elektrikli deniz araçları da daha çok kısa mesafeli rotalar ve niş kullanımlar (römorkör, feribot, vb.) için daha küçük bir grup olarak değerlendirilmektedir. Küresel ölçekte hizmet veren gemicilik firmalarından bazıları, "Book&Claim" sistemine dayalı rezervasyon modeli ile farklı sektörlerdeki müşterilerine kapsam 3 emisyonlarında azaltım imkânı sağlayabilmektedir. Sürdürülebilir yakıtların bu şekilde fiziksel olarak tedarik zincirinde taşınmasına gerek olmadan, bu yakıtların çevresel faydalarının belgelenmesi (ISCC, RSB, GLEC) ve denizcilik firmalarından lojistik hizmeti alan müşterilere talep ettikleri miktarda rezerv edilmesi ile satılması mümkündür. Gelecekte kapsam 3 emisyonların takip mekanizmalarının daha da artması ile birlikte lojistik hizmeti alan birçok şirketin taşımadan kaynaklı emisyonlarını azaltmak amacıyla bu sistemi tercih etmesi beklenmektedir. Denizcilik sektöründe sürdürülebilir yakıtların kullanımı konusunda itici bir güç olacak bu ticari yöntem daha da teşvik edilerek yaygınlaştırılabilir.

11. Karayolunda kullanılan binek ve hafif ticari araçlarda yaşanan elektrikli araç dönüşümü tüm hızıyla devam ederken uzun mesafeli ağır yük taşımacılığında kullanılan ağır ticari araçların elektrifikasyonu günümüzün batarya ve şarj teknolojileri ile oldukça zorlu bir hal almaktadır. Bugün için uzun menzil sağlaması beklenen yüksek kapasiteli bataryaların ek maliyetleri, uzun mesafeli lojistikte şarj altyapısının yetersizliği nedeniyle uzayan rotalar ve ihtiyaç duyulan uzun şarj sürelerini beklemenin yarattığı zaman kayıpları, ticari faaliyetlerde verimsizliklere yol açmaktadır. Bununla birlikte ağır ticari araçlarda kullanılacak bataryaların ağırlığı arttıkça, aracın yük kapasitesi azalmakta ve lojistik operasyonlardaki ekonomik verim düşmektedir. Bu noktada HVO (Hydrotreated vegetable oil) gibi daha düşük emisyonlu yenilenebilir dizel yakıtlar, geleneksel biyodizelin (FAME) aksine dizel motorlarda bazı küçük değişikliklerle veya hiç değişiklik yapmadan kullanılabildiğinden

(drop-in yakıt) uzun bir süre daha %100 HVO uyumlu dizel motora sahip binek, hafif ticari ve ağır ticari araçlarda elektrifikasyona geçişte iyi bir alternatif olarak kullanılacaktır. Bu bağlamda ülkemizde de sürdürülebilir HVO üretimini desteklemek amacıyla HVO'nun temel girdisi olan atık yağların toplanmasını kolaylaştıracak yeni iş modelleri ve toplumsal farkındalığı arttırıcı girişimlerin artırılması, yasal düzenlemelerle kayıt dışı toplama ve kullanımın önüne geçilmesi gerekmektedir.

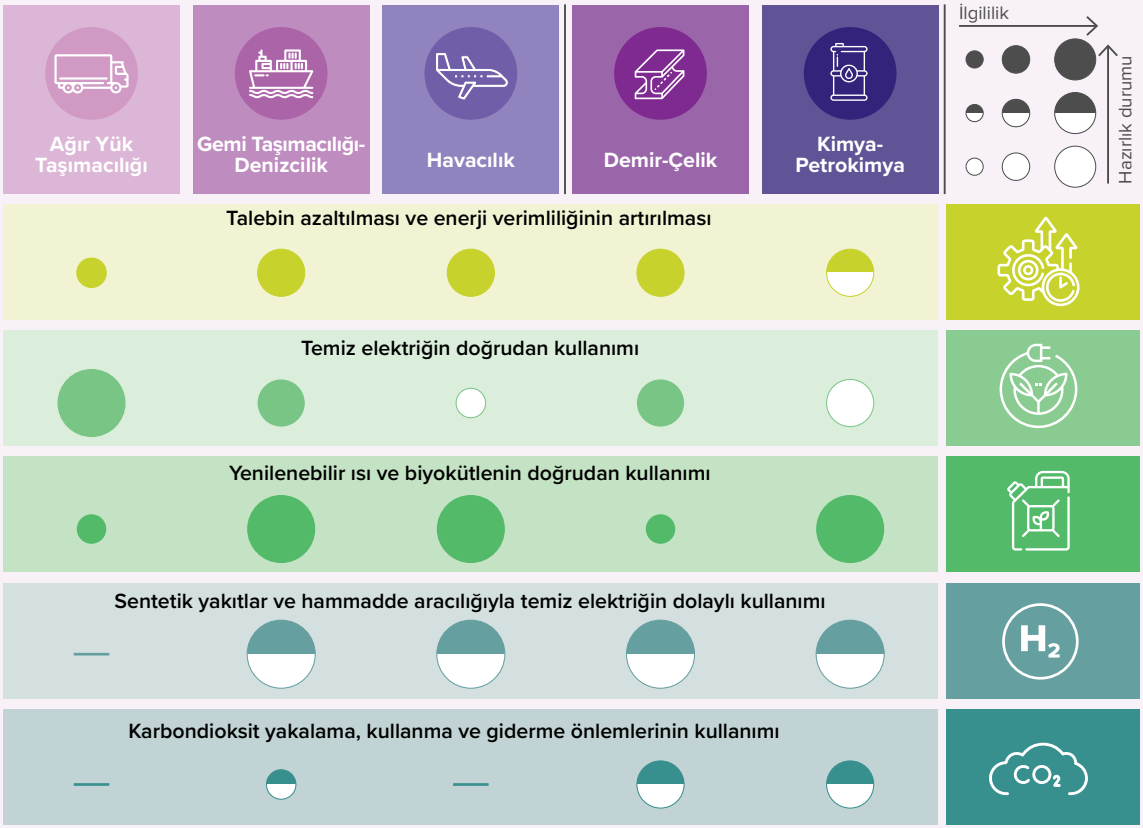
12. Türkiye'nin yeni nesil yakıtlar alanındaki potansiyeli uluslararası yatırımcılar tarafından da dikkatle izlenmektedir. Uluslararası düzeyde TTCL ve Honeywell gibi firmalarının Türkiye'de SAF tesisi projelerinde görev alması,[4] Neste ve TotalEnergies[5] gibi büyük üreticilerin Türkiye'deki havayolu şirketleriyle iş birliği olanaklarını değerlendirmesi, bu ilgiyi somutlaştırmaktadır. Ayrıca Japonya merkezli Mitsubishi Corporation Türkiye'yi potansiyel pazar olarak tanımlaması, e-yakıtlar özelinde ülkenin bölgesel bir oyuncu olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Argus, ICF ve IEA World Energy Outlook gibi kaynaklarda da Türkiye, düşük karbonlu yakıtlar açısından büyüyen bir talep ve üretim potansiyeline sahip gelişen pazarlar arasında görmektedir.

Sonuç olarak, biyoyakıtlara gösterilen ilgi önümüzdeki 10 yıllık süreçte artış eğilimi gösterse de biyolojik kökenli ham madde arzında yaşanabilecek sorunlar ve kullanılan girdilerin (atık yağ gibi) lojistiğinde yaşanabilecek zorluklar sonucunda biyoyakıtların orta-uzun vadede pazar payını sentetik yakıtlarla paylaşması beklenmektedir. Gıda arz güvenliğini ve biyolojik çeşitliliği olumsuz etkilemeyecek şekilde yapılacak her türlü enerji tarımcılığı uygulaması biyoyakıt üretiminin sürdürülebilir olmasını sağlasa da artan güneş ve rüzgâr enerjisi kapasitesi ve gelişen teknolojilerle birlikte fiyat avantajının bir süre sonra sentetik yakıtlara geçmesi beklenmektedir. Avrupa Birliği'nin hazırladığı Refuel EU gibi regülasyonlardaki zorunluluklarda bu beklentiyi doğrular şekilde sentetik yakıtlara geçişi desteklemektedir. Ancak hem CCUS teknolojilerinin yüksek maliyetleri hem yeşil hidrojene erişimde yaşanan zorluklar bugün için sentetik yakıt tesis yatırımlarının önündeki en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla sentetik sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) gibi gelecek yıllarda yoğun talep görmesi beklenen alternatif yakıtlara geçişi kolaylaştıracak mekanizmaların hızlı bir şekilde anlaşılması ve üretim konseptlerinin doğrulanması oldukça kritiktir.

2.

Karbonsuzlaştırılması Zor Sektörler

Enerji dönüşümü, elektrik üretimi, ulaşım ve ısıtma-soğutma gibi sektörlerin karbonsuzlaşmasını gerektirirken; bazı sektörler teknolojik sınırlamalar, yüksek maliyetler, altyapı ve jeopolitik hassasiyetler nedeniyle çok daha zor ve pahalı bir dönüşüm süreci içerisinde bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında söz konusu “karbonsuzlaştırılması zor sektörler”; ağır yük taşımacılığı, denizcilik (gemi taşımacılığı), havacılık, demir-çelik ve kimya-petrokimya olarak ele alınmıştır.



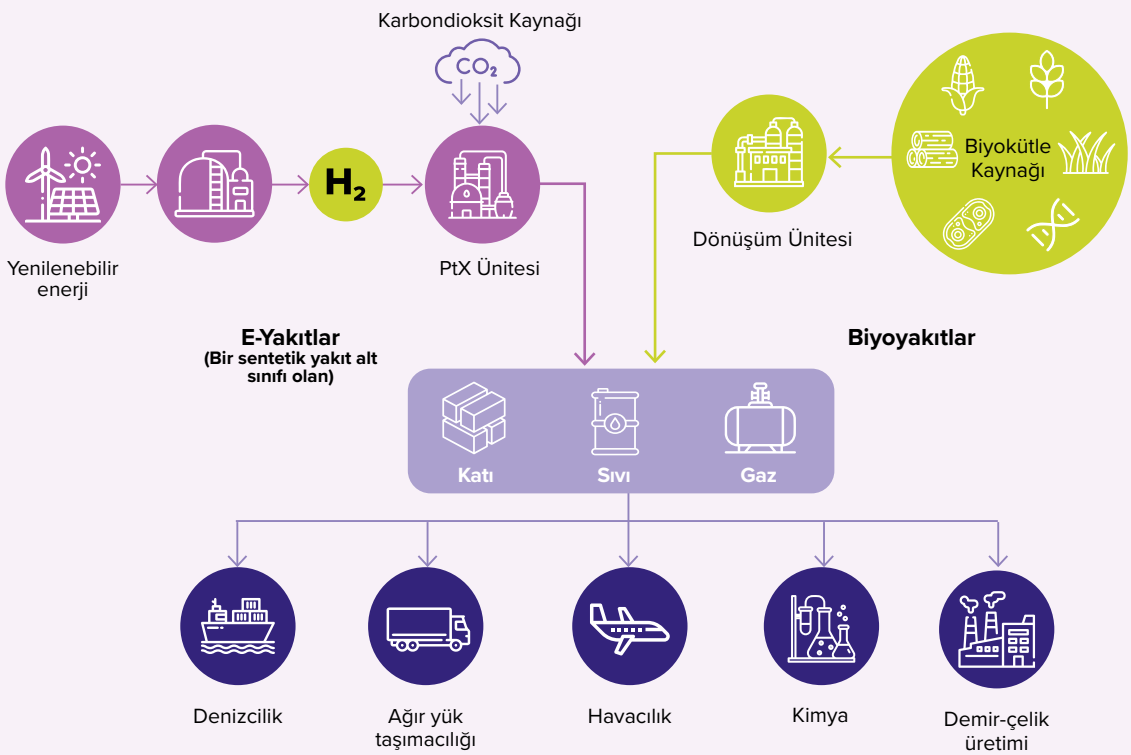
Not: Artan daire boyutu, her sektörün karbonsuzlaşma çabalarına yönelik göreceli önemini göstermektedir; yani, daha büyük daireler daha yüksek bir önem derecesini, daha küçük daireler ise daha düşük bir önem derecesini ifade etmektedir. Dairelerin doluluk durumu, teknoloji hazırlık seviyesini göstermektedir; dolu daireler teknolojinin uygulanmaya hazır olduğunu, boş daireler ise yeterli hazırlık seviyesine ulaşmadığını belirtmektedir. Kesikli çizgiler ise ihmal edilebilir veya önem derecesinin neredeyse hiç olmadığını göstermektedir.

Şekil 1. Karbonsuzlaştırılması Zor Sektörlerdeki Kilit Teknoloji Yolları ve Hazırlık Seviyesi [7]

Son yıllarda, karbonsuzlaştırılması zor sektörlerin dönüşümü için geliştirilen teknolojilerde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Şekil 1, bu sektörler için hangi teknoloji yollarının hem etki potansiyeli hem de hazırlık seviyesi açısından öne çıktığını göstermektedir. Ağır yük taşımacılığında doğrudan elektrifikasyon en yüksek ilgi ve ticarileşme hızını sergilerken, denizcilik ve havacılıkta ana çözüm teknolojileri biyoyakıt ve e-yakıtlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Demir-çelik ve kimya-petrokimya sektörlerinde hidrojen bazlı süreçler ile CCUS teknolojileri ön plandadır. Demir-çelik sektöründe hidrojen bazlı doğrudan indirgeme (DRI) yönteminin ticari ölçekli tesislere doğru hızla ilerlemesi[6] ve öncül elektrikli buhar krakingi (e-cracking) projelerinin kimya sektöründe deneme aşamasına gelmesi, bu ilerlemeler

arasında sayılabilir.[7] Bununla birlikte, söz konusu teknolojilerin hızla yaygınlaşması için gerekli altyapı yatırımları, ölçek ekonomileri ve politika teşvikleri henüz tam anlamıyla devreye girmemiştir.

Doğrudan elektrifikasyon; elektrik ark ocaklarının çelik üretiminde yaygınlaşması, elektrikli ağır yük kamyonlarının ticarileşmesi ve düşük-orta sıcaklık endüstriyel süreçlerde ısı pompalarının kullanımı gibi çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. Dolaylı elektrifikasyon ise, hidrojen ve türevlerinin yenilenebilir kaynaklardan üretimini (yeşil hidrojen, e-yakıtlar vb.) içermekte ve özellikle demir-çelik, denizcilik, havacılık ve kimya sektörlerinde emisyon azaltımına katkı sunmaktadır.[8] Bu çerçevede Şekil 2, e-yakıtlar (sentetik yakıtların alt sınıfı) ile biyoyakıtların yenilenebilir kaynaklardan başlayarak çeşitli son kullanım alanlarına uzanan üretim ve dağıtım akışlarını şematik olarak özetlemektedir.



Şekil 2. Karbonsuzlaştırılması Zor Sektörlerde E-Yakıt ve Biyoyakıtların Üretimden Nihai Kullanıma Akış Şeması

Biyoyakıtlar ve sentetik yakıtlar, bu sektörlerde elektrifikasyonun uygulanamadığı kısımlarda tamamlayıcı bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Biyoyakıtlar, özellikle havacılık ve denizcilik gibi uzun menzilli veya yüksek enerji yoğunluklu uygulamalarda geleneksel fosil yakıtları ikame ederek kısa ve orta vadede emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel Şekil 3'te 2030-2040-2050 yılları baz alınarak detaylandırılmıştır. Otomotiv sektöründeki elektrikli araç dönüşümünün hızlanmasıyla beraber, bu alanda kullanılan biyoyakıtların uzun dönemde havacılık ve denizcilik sektörlerine kayacağı öngörülmektedir.[9] Kimya ve petrokimya sektöründe ise, sürdürülebilir biyo-ham madde ve sentetik kaynaklı karbon kullanımı, fosil tabanlı ham madde ihtiyacını düşürerek karbon ayak izini küçültmektedir.

Yakıt türü	Yakıt	Havacılıkta talep (EJ)				Denizcilikte talep (EJ)			
		2023	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050
Biyoyakıtlar	Denizcilik biyoyakıtları	-	-	-	-	0.0 ↑	0.6 ↑	1.3 ↑	1.7
	Biyokerosen	0.0 ↑	1.2 ↑	3.9 ↑	6.1	-	-	-	-
Sentetik yakıtlar	Amonyak/metanol	-	-	-	-	0.0 ↑	1.2 ↑	3.9 ↑	8.9
	Sentetik kerosen	0.0 ↑	0.4 ↑	3.3 ↑	6.8	-	-	-	-
Fosil yakıtlar	Kerosen	13.1 ↑	13.2 ↓	9.1 ↓	3.7	-	-	-	-
	Deniz yakıt yağı	-	-	-	-	9.4 ↓	9.1 ↓	5.7 ↓	0.5

Şekil 3. Havacılık ve denizcilik sektörlerinde düşük karbonlu yakıtlara oluşacak talep (Deloitte)

Bu dönüşüm yollarına ek olarak enerji verimliliği, döngüsel ekonomi ilkelerinin benimsenmesi, davranışsal ve süreçsel değişiklikler ile CO_2 yakalama, kullanım ve depolama (CCUS) teknolojileri de karbonsuzlaştırılması zor sektörlerin net-sıfır hedefine yaklaşmasını hızlandırabilir. Ancak CCUS gibi teknolojilerin ölçek ekonomisine ulaşabilmesi için hem teknik hem de ekonomik koşulların iyileştirilmesi gerekmektedir.

Politik ve toplumsal düzeydeki artan farkındalık, hükümet ve özel sektör girişimlerini harekete geçirmiştir. Breakthrough Agenda, Mission Innovation, Climate Club gibi inisiyatifler ve ABD'nin Enflasyon Azaltma Yasası (Inflation Reduction Act) ya da AB'nin Fit for 55 Paketi kapsamındaki RefuelEU Aviation ve FuelEU Maritime düzenlemeleri gibi politikalar, karbonsuzlaştırılması zor sektörlerde dönüşümün hızlandırılmasına yönelik

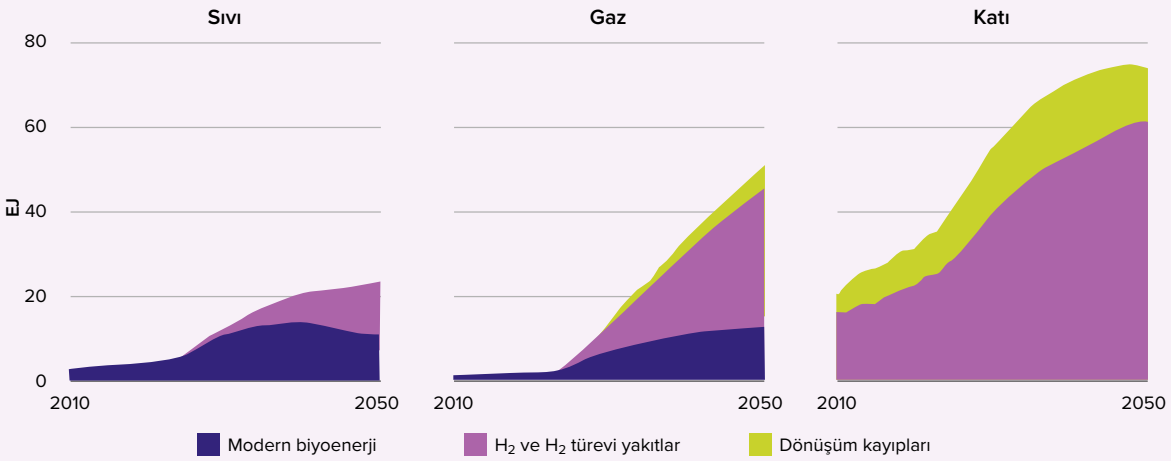
çabaları temsil etmektedir. Öte yandan, mevcut girişimler ve projeler artış gösterse de, orta vadede söz konusu sektörlerin net-sıfır emisyon yolunda belirlenen hedeflere ulaşabilmesi için daha da güçlü politika araçlarına, uygun finansman modellerine ve uluslararası iş birliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çerçevede, karbonsuzlaştırılması zor sektörlerde enerji arzı, altyapı ve teknoloji entegrasyonunun çok boyutlu ele alınması gerekmektedir. Her sektörün kendine özgü gereksinimleri ve potansiyel çözümleri bulunmakla birlikte, ortak payda, yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı yükselişi ve yeni nesil yakıt teknolojilerinin giderek daha rekabetçi hâle gelmesidir. Yine de fosil temelli sistemlerle arasındaki maliyet farkı, kapsamlı ve sürdürülebilir bir dönüşüm için politikalar ve teşvik mekanizmalarıyla kapatılmak durumundadır. Bu dönüşümün hızı ve başarısı, özellikle küresel tedarik zincirlerinin yeniden yapılandırılması, altyapı yatırımları ve ölçek ekonomilerinin devreye alınmasına bağlıdır.

3.

Yeni Nesil Yakıt Teknolojilerine Genel Bakış

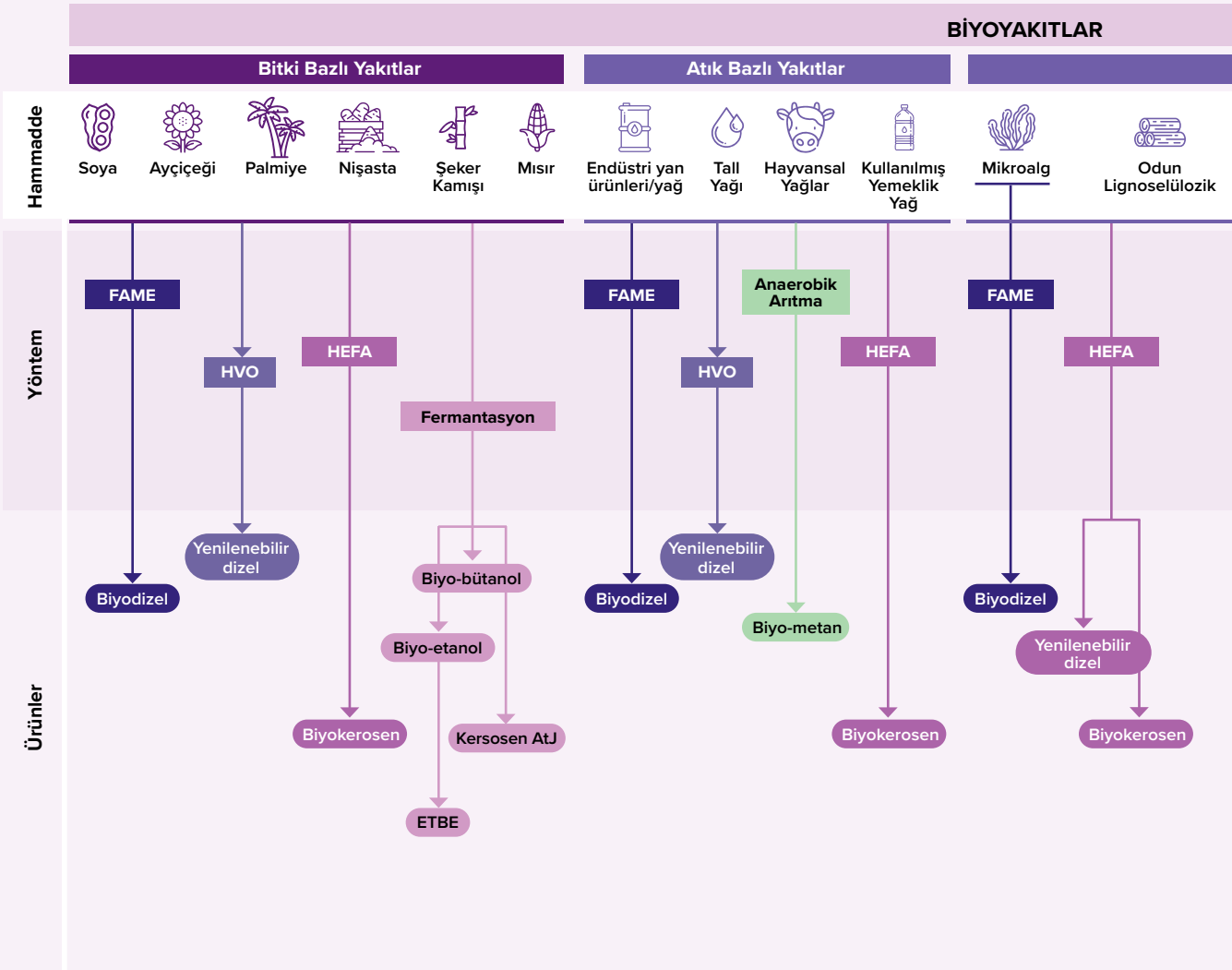
Düşük veya sıfır karbon emisyonunu hedefleyen, yenilenebilir kaynaklardan gelişmiş üretim teknolojileri ile üretilen, mevcut yakıt altyapılarına uyumlu (drop-in fuels) veya küçük adaptasyonlarla mevcut altyapıda kullanılabilir durumdaki spesifik bir yakıt grubu **"yeni nesil yakıtlar"** olarak tanımlanabilir. IEA NZE Senaryosu göre bu yakıtların arzının 2050 yılına kadar hızla artması beklenmektedir. Şekil 4'te aktarıldığı üzere, düşük emisyonlu hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlara yönelik talep, 2010'lu yıllarda düşük bir başlangıç seviyesinde olmasına rağmen 2030'a kadar yıllık ortalama %80 oranında ve 2030-2050 yılları arasında ise yaklaşık %9 büyüme oranı ile ivmenelerek artacağı tahmin edilmektedir. Diğer taraftan, çoğunlukla sanayide kullanılan modern katı biyoenerjiye olan talep, 2050 yılına kadar kademeli biçimde genişleyecek ve bu durumda arz portföyündeki payının artacağı öngörülmektedir.[10]

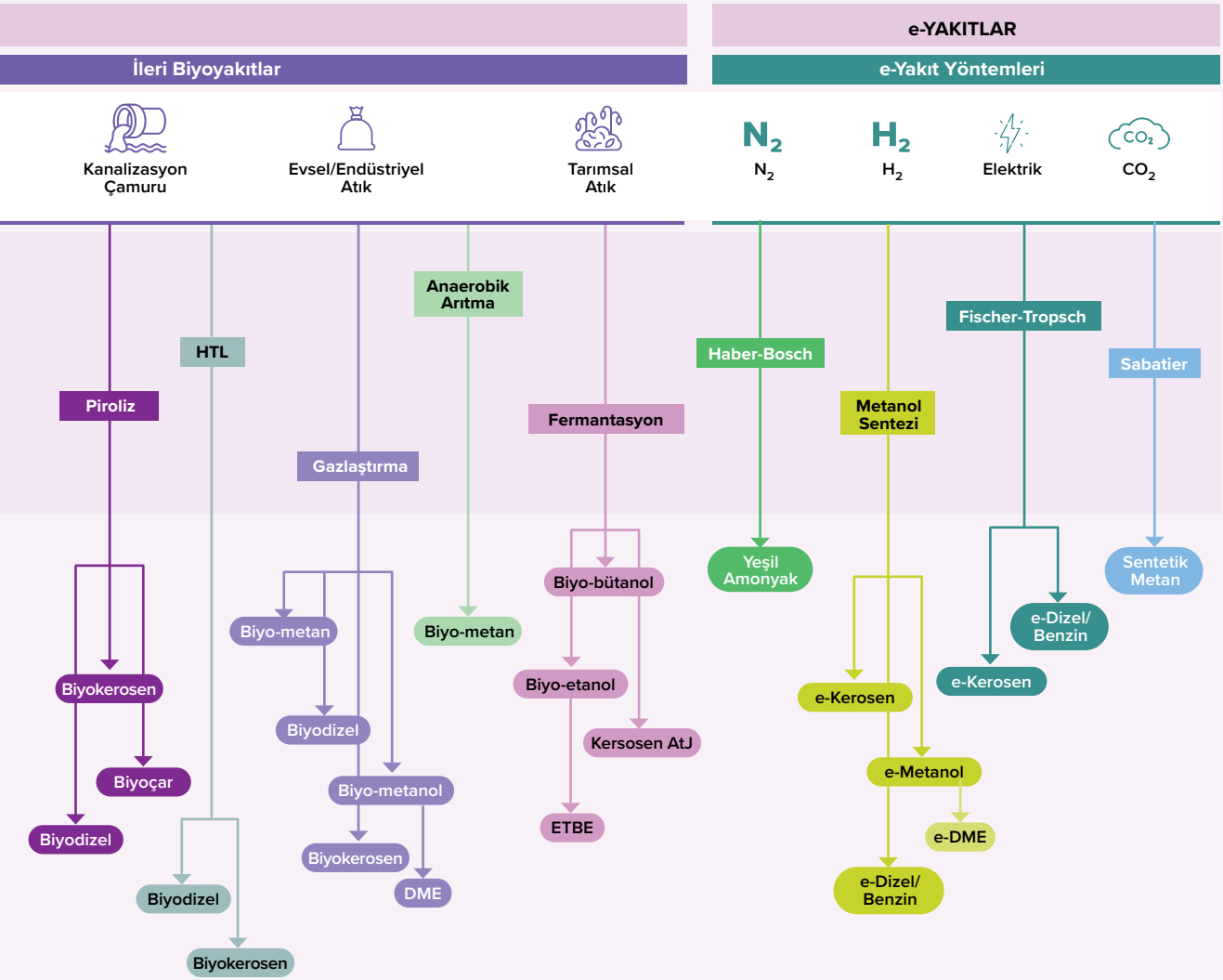


Şekil 4. IEA NZE Senaryosu'nda Düşük Emisyonlu Yakıt Talebi, 2010-2050 [10]

Modern sıvı biyoyakıt talebinin ise 2040 yılına kadar %200 oranında bir artış göstermesi öngörülmektedir. Gelecek yıllarda içten yanmalı motorlu otomobillerin kademeli olarak devreden çıkmasıyla karayolu taşıtlarındaki harmanlama gereksiniminin azalması ve bu düşüşün denizcilik ve havacılıkta süregelen talep artışını dengelemesi beklenmektedir. Biyogaz ve biyometan gibi gaz hâlindeki yakıt formlarında ise 2030 yılında, özellikle elektrik sektöründe, enerji sisteminin değerli bir bileşeni hâline geleceği tahmin edilmektedir. Bu durum, Rusya-Ukrayna savaşının ardından doğal gaza maliyet-etkin en ideal seçeneği sunması sebebiyle stratejik öneme sahiptir. 2050 yılı itibarıyla yeni nesil tekniklerle üretilen biyogaz; esnek elektrik üretiminde, endüstriyel ısı ve hidrojen üretiminde ve denizcilik yakıtlarında düşük maliyetli temiz gaz ihtiyacını karşılayacağı için çeşitli roller üstlenecektir.

Bu küresel projeksiyonlar ışığında, bu çalışma kapsamında yeni nesil yakıt teknolojileri çerçevesinde; kısa, orta ve uzun vadede hem ticari başarı potansiyeli hem de dekarbonizasyon kapasitesi yüksek olabilecek 12 (on iki) farklı üretim yöntemi detaylı olarak incelenmiş ve Şekil 5'te bu yöntemler aktarılmıştır. Çalışmada ele alınan üretim yöntemleri, mevcut teknolojik gelişmeler, ekonomik fizibilite, ölçeklenebilirlik ve politika destek mekanizmaları gibi çok yönlü kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

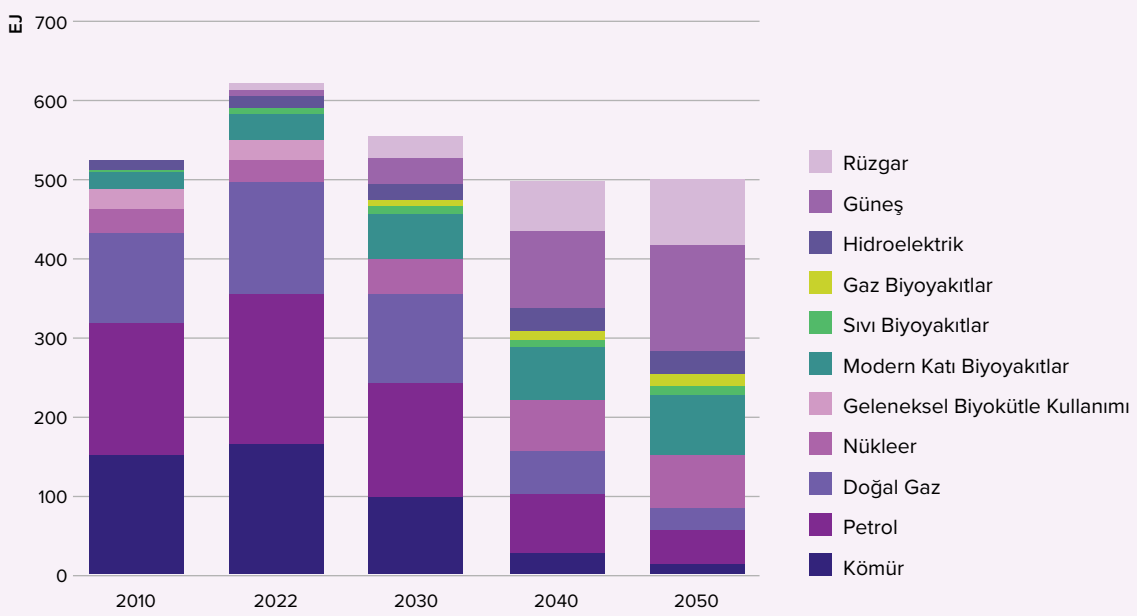

BİYOYAKITLAR
Bitki Bazlı Yakıtlar
Atık Bazlı Yakıtlar
Hammadde
Soya
Ayçiçeği
Palmiye
Nişasta
Şeker Kamışı
Mısır
Endüstri yan ürünleri/yağ
Tall Yağı
Hayvansal Yağlar
Kullanılmış Yemeklik Yağ
Mikroalg
Odun Lignoselülozik
Yöntem
FAME
HVO
HEFA
Fermantasyon
Anaerobik Arıtma
Ürünler
Biyodizel
Yenilenebilir dizel
Biyo-bütanol
Biyo-etanol
Biyokerosen
Kersosen AtJ
ETBE
Biyo-metan



Şekil 5. Yeni Nesil Yakıt Teknolojileri: Ham madde,Yöntem ve Ürün

3.1. Biyoyakıt Teknolojileri

Biyoyakıtlar, canlı organizmalardan elde edilen organik maddelerden üretilen yakıtlar olarak tanımlanmaktadır. Yani odun, tarımsal atıklar, yağlı tohumlar veya organik atıklar gibi biyokütle kaynaklarından fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçlerle elde edilen katı, sıvı veya gaz halindeki yanıcı maddeler biyoyakıt olarak adlandırılır.[11] Yüzyıllardır insanlar odun ve kuru hayvan gübresi gibi biyokütleyi ısınma ve pişirme için yakıt olarak kullanmışlardır. Yıllar içerisinde geleneksel yöntemlerle kullanılan bu biyokütleler, zamanla yerini daha verimli ve çevreye daha az zararlı modern biyoyakıtlara bırakmaktadır. Bugün dünya enerji arzının %6'sından fazlasını sağlayan en büyük yenilenebilir enerji kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Aşağıdaki şekilde (Şekil 6) biyokütle enerji kaynağının toplam enerji arzı içerisindeki payı aktarılmıştır.



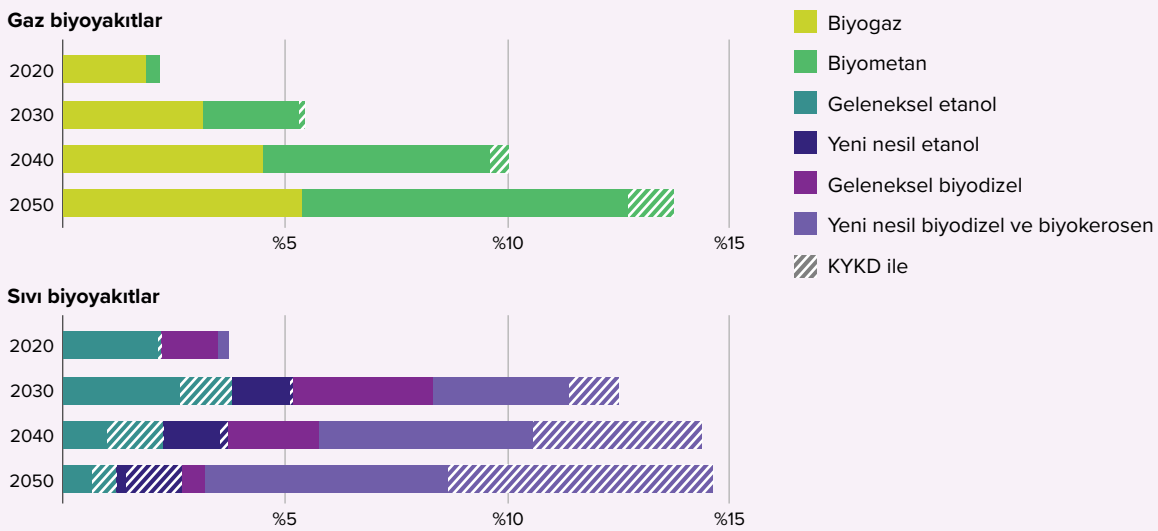
Şekil 6. Küresel Toplam Enerji Arzının Kaynak Bazında Değişimi (2010 – 2050, EJ) [10]

Modern biyokütle kavramı yukarıda aktarıldığı üzere biyokütlenin geleneksel kullanımından daha ileri teknoloji uygulamalarını, örneğin bitkisel yağlardan dizel motor yakıtı üretmeyi veya organik atıklardan biyogaz üretmeyi içermektedir. Bu kapsamda, biyoyakıtlar doğru koşullarda üretildiğinde, karbon döngüsünün bir parçası oldukları için karbon nötr kabul edilebilmektedirler. Yani yakıtın yanmasıyla atmosfere verilen CO_2, bitkilerin büyümesi esnasında atmosferden emilmiş CO_2'nin tekrar kullanımıdır. Ayrıca, BECCS teknikleri kullanıldığında biyoyakıtlar karbon negatifte olabilmektedirler. Elbette bu denge, tarım, arazi kullanımı ve işleme süreçlerindeki emisyonlara bağlı olup her biyoyakıt tam olarak karbon nötr değildir. Bu tanımlar ve karbon döngüsündeki dengeler göz önüne alındığında, biyoyakıtların günümüzdeki payı ile gelecek döneme ilişkin büyüme beklentilerini de yakından incelemek önem kazanmaktadır.

Günümüzde yol taşımacılığı, elektrik üretimi ve ısınma sektörlerinde önemli bir yere sahip olan biyoyakıt kullanımının 2050'ye kadar katlanarak büyümesi beklenmektedir. Bu beklentinin kök nedenine bakıldığında, dünya genelinde enerji arzının çeşitlendirilmesi, ham petrol fiyatlarındaki dalgalanmaların etkilerini hafifletme, biyoyakıt üretim maliyetlerindeki düşüş ve artan çevre bilinci gibi pek çok etmen yer almaktadır. Bazı bölgelerde uygulanan kalkınma politikaları da biyoyakıtlara olan ilgiyi destekleyen ek bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde küresel biyoyakıt üretiminin yaklaşık %80'ini Brezilya ve Amerika Birleşik Devletleri gerçekleştirmektedir.

Bu çerçevede Şekil 7'de belirtildiği üzere, 2020 yılında biyoenerjinin yaklaşık %10'u sıvı biyoyakıtlar yoluyla yol taşımacılığına, %6'sı ise biyogaz/biyometan şeklinde güç ve ısı üretimine tahsis edilmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın Net Sıfır Emisyon senaryosu 2050 itibarıyla, sıvı biyoyakıt üretiminin yaklaşık dört kat, biyogaz/biyometan üretiminin ise altı kat artmasını öngörmektedir.[12]

NZE'deki biyoyakıt üretiminin tür ve teknolojiye göre küresel dağılımı



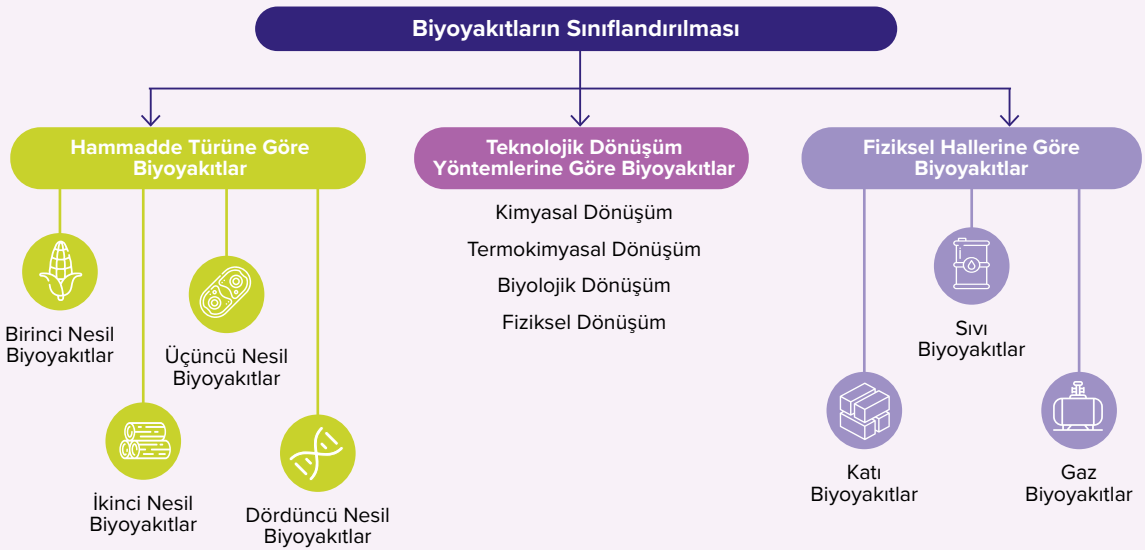
Sıvı biyoyakıt üretimi, sürdürülebilir biyokütle tedarik zincirlerinin geliştirilmesi sayesinde 2020-2050 yılları arasında dört kat artarken, biyogaz üretiminin aynı dönemde altı katına çıkacağı öngörülmektedir.

Notlar: EJ = eksajul; CCUS = karbon yakalama, kullanım ve depolama. Geleneksel etanol, gıda amaçlı enerji bitkilerinin kullanıldığı üretimi ifade etmektedir. Yeni nesil etanol, atık ve artıklar ile marjinal ya da tarıma elverişsiz arazilerde yetiştirilen gıda dışı enerji bitkilerinden elde edilen üretimi ifade etmektedir. Geleneksel biyodizel, gıda amaçlı enerji bitkileri kullanılarak FAME yöntemiyle üretilen biyodizeli kapsamaktadır. Yeni nesil biyodizel ise atıklar, artıklar ve marjinal/tarıma elverişsiz arazilerde yetiştirilen gıda dışı enerji bitkileri kullanılarak biyokütle bazlı Fischer-Tropsch ve HEFA yöntemleriyle üretilen biyodizeli içermektedir. Biyometan ise biyogazın yükseltilmesi (rafine edilmesi) ve biyokütle gazlaştırmaya dayalı tekniklerle elde edilen metanı ifade etmektedir.

Şekil 7. Net Sıfır Emisyon Senaryosu (NZE) Biyoyakıt Dağılımı ve 2050 Projeksiyonu [12]

3.1.1. Biyoyakıt Kapsamındaki Temel Teknolojik Yollar

Biyoyakıt üretimi, kullanılan ham maddeler ve dönüşüm teknolojileri açısından oldukça çeşitlidir. Biyoyakıtlar fiziksel hâlde katı, sıvı veya gaz formda bulunabilir. Bu sınıflandırma, biyoyakıtın kullanım şekline ve işlenme derecesine göre yapılmaktadır. Katı formdaki biyokütlenin doğrudan yakıt olarak kullanılmasıyla veya hafif işlenmesiyle elde edilen yakıtlar katı biyoyakıt olarak adlandırmaktadır. Sıvı halde ve genellikle taşıt motorlarında kullanılabilen yakıtlar ise sıvı biyoyakıtlardır. Gaz formundaki biyoyakıtların başlıca örnekleri biyogaz ve ondan türetilen biyometandır.[13]



Şekil 8. Biyoyakıtların Sınıflandırılması

Diğer bir sınıflandırma ise ham madde türlerine ve sürdürülebilirlik düzeylerine göre biyoyakıtların birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü nesil olarak ayrılmasıdır.[14] Bu çerçevede, biyoyakıtların sınıflandırılması Şekil 8'de şematik olarak özetlenmektedir.

- **Birinci nesil biyoyakıtlar**, ilk geliştirilen ve yaygınlaşan biyoyakıt türlerini ifade etmektedirler. Ham madde olarak gıda amaçlı yetiştirilen tarımsal ürünler kullanılır ve dolayısıyla "gıda tabanlı biyoyakıtlar" olarak da bilinmektedirler.
- **İkinci nesil biyoyakıtlar** ise gıda amaçlı olmayan, lignoselülozik biyokütle olarak adlandırılan ham maddelerden üretilen yakıtlardır. Lignoselülozik biyokütle; odun, tarımsal bitki sapı ve samanları, orman artıkları, çimen, enerji bitkileri, kentsel atıklar veya sanayi selüloz atıkları gibi selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriği yüksek maddelerdir. İkinci nesil biyoyakıtların temel amacı, gıda zincirine girmeyen atık ve artık malzemeleri veya özel yetiştirilen selülozik bitkileri kullanarak yakıt üretmektir.
- **Üçüncü nesil** terimi genellikle alg tabanlı yakıtları tanımlamak için kullanılmaktadır. Mikroalgler ve bazı makroalgler, fotosentez yoluyla büyüyen ve yağ, karbonhidrat veya diğer enerji içeriği yüksek bileşenlerce zengin biyokütle üreten organizmalardır.

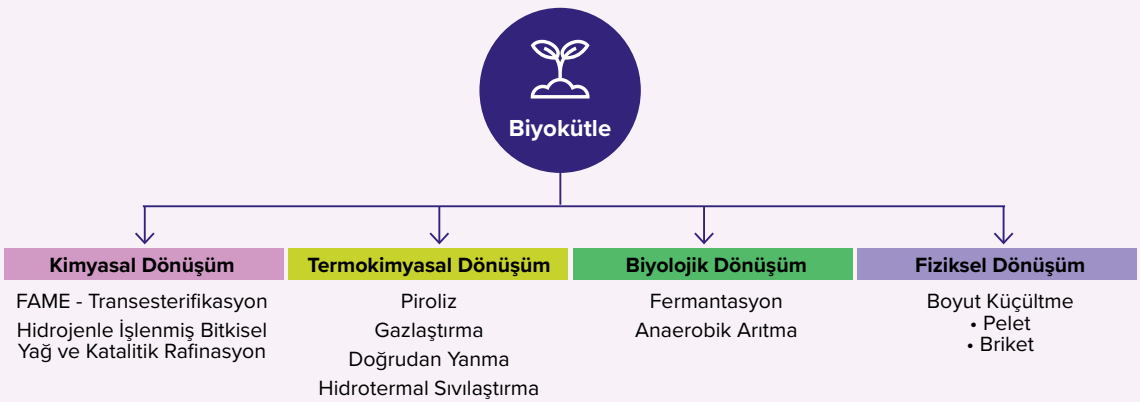
Üçüncü nesil biyoyakıt yaklaşımda, alg gibi hızlı büyüyen ve tarım arazisi gereksinimi düşük organizmalar kullanılarak yakıt üretimi hedeflenmektedir. Literatürde en yeni ve en ileri biyoyakıt konseptleri dördüncü nesil başlığı altında toplanmaktadır.

- **Dördüncü nesil biyoyakıtlar**, üretimleri sırasında net negatif karbon emisyonu sağlamayı veya yenilikçi biyoteknolojik yöntemler kullanmayı hedeflemektedir. Bu kavrama giren iki ana yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan ilki, biyoyakıt üretimi sırasında karbon yakalama ve depolama uygulayarak atmosfere salınan CO_2'nin tutulması, ikincisi ise genetik mühendislik ve sentetik biyoloji ile tasarlanmış organizmalar kullanarak, doğrudan CO_2'yi karbon kaynağı olarak tüketen biyoyakıt üretim sistemleri geliştirmektir. Birinci yaklaşım, biyokütle kullanan bir enerji santraline CCS entegre ederek net karbon negatif enerji (BECCS) elde etmeyi içerir. İkinci yaklaşım ise laboratuvarda tasarlanmış mikroorganizmalar veya algler vasıtasıyla, atmosfere açık sistemlerde CO_2'nin doğrudan yakıt bileşenlerine dönüştürülmesidir.[14] Aşağıda şekilde farklı nesil biyoyakıt sınıflarına giren örnek biyokütle ham maddeleri verilmiştir.

Şekil 9. Farklı nesil biyoyakıtlardan ham madde kaynaklarına örnekler

Yukarıdaki sınıflandırma çerçevesinde, biyoyakıt teknolojilerinin gelişiminin doğrusal olmayabileceğini vurgulamak da önem taşımaktadır. Örneğin, bazı kaynaklar atık yemeklik yağlardan üretilen biyodizeli ikinci nesil kategorisinde değerlendirirken, teknik olarak süreç birinci nesil biyodizel teknolojisine benzemektedir. Bu nedenle nesil kavramı, mutlak teknik kategorilerden ziyade bir rehber olarak görülmektedir. Önemli olan, biyoyakıt üretiminde kullanılan ham maddenin sürdürülebilirliği ve teknolojinin hazırlık seviyesidir. Bu kapsamda, bahsi geçen bu farklı biyoyakıt türlerinin nasıl üretildiği yani dönüşüm teknolojilerini değerlendirmek gerekmektedir.

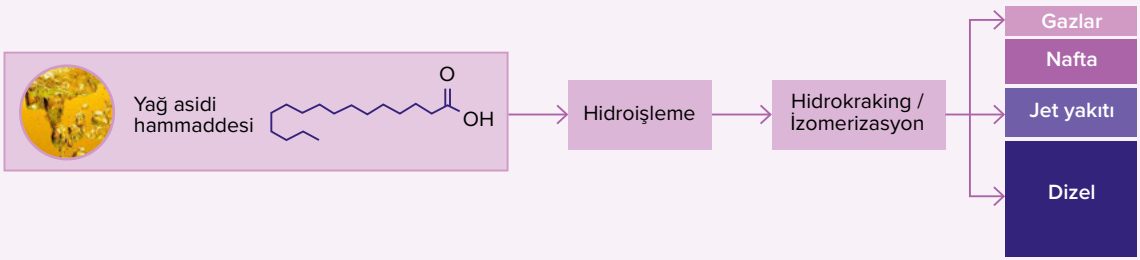
Biyoyakıt üretimi, kullanılan ham maddenin kimyasal bileşimine ve elde edilmek istenen yakıt türüne göre farklı teknolojik dönüşüm yolları gerektirir. Genel olarak biyokütleden yakıt elde etmek için dört temel teknoloji yolu bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; Şekil 10'da gösterildiği üzere kimyasal dönüşüm, termokimyasal dönüşüm, biyolojik dönüşüm ve fiziksel dönüşüm yöntemleridir.[15]



Şekil 10. Biyokütleden Yakıt ve Enerji Üretiminde Dönüşüm Yollarına Örnekler

Kimyasal dönüşüm, biyokütlenin veya biyokütleden türetilmiş ara ürünlerin, kimyasal reaksiyonlar ve katalizörler yardımıyla hedeflenen yakıtlara dönüştürülmesidir. Bu yöntemde genellikle yüksek sıcaklıklar olmaksızın, kimyasal reaksiyon ortamında daha seçici dönüşümler gerçekleştirilir. Kimyasal biyoyakıt üretim yöntemleri arasında, bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel (FAME) üretiminin temel kimyasal yolu olan

Transesterifikasyon (Ester Değişimi) Reaksiyonu ve Hidrojenle İşlenmiş Bitkisel Yağ ve Katalatik Rafinasyon yer almaktadır. Bu kimyasal dönüşüm yollarının TRL seviyesi 9 düzeyindedir. Şekil 11'de üretim akış şeması verilen HVO süreci, transesterifikasyondan daha pahalı ve yüksek teknoloji gerektiren bir yöntem olsa da, elde edilen ürünün yakıt kalitesi çok yüksektir. HVO dizel yakıtı, petrodizele %100 ikame olabilecek bir drop-in yakıttır, karışım limiti olmaksızın mevcut dizel altyapısında kullanılabilmektdir.

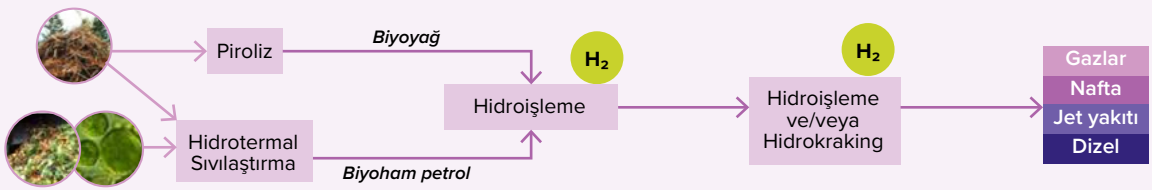


Şekil 11. HVO Üretim Süreci ile Yenilenebilir Dizel/Jet Yakıtı Üretim Akış Şeması

Küresel ölçekte HVO üretimi son yıllarda hızla artmaktadır; özellikle Avrupa'da bazı petrol rafinerileri (ENI – İtalya, Total – Fransa gibi) tesislerini biyoyakıt rafinerilerine çevirmiştir. Finlandiyalı Neste şirketi, yılda yaklaşık 3 milyon ton kapasiteyle dünyanın en büyük HVO dizel üreticilerindendir.[16] 2020'lerde ABD'de de yenilenebilir dizel, Kaliforniya'nın düşük karbon yakıt standardı sayesinde büyük ivme kazanmıştır. IEA verilerine göre 2020'de yaklaşık 9 milyon ton olan küresel HVO üretim kapasitesinin bu sene sonu itibariyle (2025 yılı) üç kat artması beklenmektedir.[17] Bu artış trendi, HVO'nun kimyasal dönüşüm teknolojisi olarak önem kazandığını göstermektedir. Türkiye'de henüz ticari ölçekte HVO üretim tesisi bulunmamaktadır. Biyoyakıtlarda kimyasal dönüşüm kavramı, yukarıda belirtilen yöntemlere ilave olarak bazı özel süreçleri de kapsamaktadır. Fischer-Tropsch Sentezi, bir katalitik kimyasal sentez olup sentez gazı (CO + H_2 karışımı) üzerinden uzun zincirli hidrokarbon yakıtlar elde edilmesini sağlamaktadır. BtL (biomass-to-liquid) yakıt üretimi sürecinde kullanılan FT sentezini kimyasal bir dönüşüm olarak sınıflandırmak mümkündür çünkü bu sentezin kilit adımı, kimyasal katalizör (demir veya kobalt bazlı) üzerinde CO ve H_2'nin polimerize olarak C_5-C_{15} arası hidrokarbon zincirlerine dönüşmesidir. Günümüzde tam ticari ölçekte bir FT-BtL tesisi bulunmamaktadır. Türkiye'de bu alanda ticari ölçekte

henüz bir üretim tesisi bulunmamaktadır. Kimyasal dönüşüm yolları özellikle sıvı biyoyakıt üretiminin önemli bir parçasıdır ve biyodizel, HVO gibi yakıtlar sayesinde günümüzde milyonlarca tonluk piyasa hacmi bulunmaktadır. Türkiye'de kimyasal dönüşüm denince ilk akla gelen biyodizel üretimi olsa da, önümüzdeki dönemde HVO ve kimyasal katalitik ileri süreçlerin de devreye girmesi olasıdır. Bu yöntemlerin başarısı, uygun katalizörlerin geliştirilmesi, yan ürünlerin değerlendirilmesi ve ölçek ekonomisine bağlı maliyet optimizasyonuna dayanacaktır.

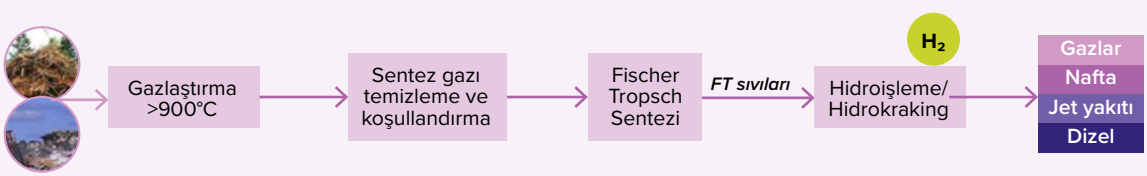
Termokimyasal dönüşüm, biyokütlenin ısı enerjisi yardımıyla kimyasal olarak daha basit yakıtlara veya ara ürünlere parçalanması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemlerde yüksek sıcaklık ve bazen yüksek basınç uygulanarak biyokütledeki büyük moleküller (selüloz, lignin, yağ vb.) daha küçük hidrokarbonlara, gaza veya kömüre dönüştürülür. Başlıca termokimyasal yöntemler arasında doğrudan yanma, piroliz, gazlaştırma, hidrotermal sıvılaştırma ve karbonizasyon yer almaktadır.[18] Bu rapor kapsamında ele alınan yöntemler arasında, biyokütlenin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak termal parçalanma işlemi olarak geçen piroliz yöntemi bulunmaktadır. Piroliz teknolojisi üzerinde uzun yıllardır çalışılmakta olup TRL seviyesi pilot ile demo arasında değişmektedir. Finlandiya'da Fortum şirketi, bir tesiste talaştan hızlı piroliz yağı üreterek yakıt olarak satmıştır. ABD'de Ensyn ve İspanya'da BTG şirketleri benzer şekilde piroliz yağı üretme girişimlerinde bulunmuştur. Tam ticari yaygınlık kazanmamakla birlikte, piroliz gelecekte biyorafineri konseptinin bir parçası olabilecektir. Türkiye'de piroliz alanında çalışmalar akademik çalışmalar ve teknoloji girişimleri ölçeğinde mevcuttur.



Şekil 12. Piroliz ve HTL tabanlı biyokütleden sıvı yakıta üretim sürecinin akış şeması

Bu rapor kapsamında diğer bir termokimyasal yöntem olarak, özellikle ıslak biyokütle (nemli atıklar, kanalizasyon çamuru, alg biyokütlesi gibi) için geliştirilmiş bir termokimyasal dönüşüm yolu olan HTL teknolojisi incelenmiştir. HTL'de biyokütle, su ile birlikte yüksek basınç ve sıcaklıkta işlem görerek doğrudan bir biyoyağ fazına dönüştürülmektedir. Bu teknoloji de öne çıkan avantaj, beslenen ham maddenin kurutulmasını gerektirmemesidir. Bu nedenle, alg veya gıda atıkları gibi %80-90 nem içeren biyokütleler direkt dönüştürülebilmektedir. ABD'deki Pacific Northwest National Lab (PNNL) ve şirket ortakları, kanalizasyon arıtma çamurundan petrol benzeri bir yağ üreten pilot bir HTL sistemini test etmişlerdir. Danimarka merkezli Steeper Energy şirketi, Norveç'te bir tesiste orman atıklarından HTL yağı üretmeyi planlamaktadır. Shell bünyesinde geliştirilen IH^2 teknolojisi ise katalitik bir hidrotermal sıvılaştırma varyantıdır ve Hindistan'da demo ölçekli bir tesis kurulmuştur.[19] HTL, Türkiye'de de merak uyandıran bir konudur. Henüz sanayi ölçeğinde bir tesis bulunmamakla birlikte, ancak ileride özellikle belediye atık çamurlarının enerji geri kazanımında değerlendirilebilecek bir yöntem olarak potansiyel taşımaktadır. Şekil 12'de pirolizi sürecinin üretim şeması aktarılmıştır.

Diğer bir termokimyasal dönüşüm yöntemi ise, biyokütlenin kontrollü bir oksijen veya hava ortamında, tam yakma gerçekleşmeyecek şekilde kısmi yanmaya tabi tutularak sentez gazı üretme süreci olan gazlaştırmadır. Gazlaştırma yönteminin avantajı, katı bir yakıtı sentez gazı formuna çevirerek çok yönlü kullanım imkânı sunmasıdır. Sentez gazı, içten yanmalı gaz motorlarında veya gaz türbinlerinde elektrik üretmek için kullanılabilmektedir. Alternatif olarak, Fischer-Tropsch prosesi (Şekil 13'de detaylandırılan) ile sıvı biyoyakıt üretimi ya da katalitik metanizasyon ile sentetik yenilenebilir metan (SNG) üretimi mümkündür. Ayrıca sentez gazından metanol, DME, hatta hidrojen üretimi de yapılabilmektedir.



Şekil 13. Gazlaştırma/Fischer–Tropsch Tabanlı "Biyokütleden Sıvı Yakıt" (BtL) Sürecinin Akış Şeması

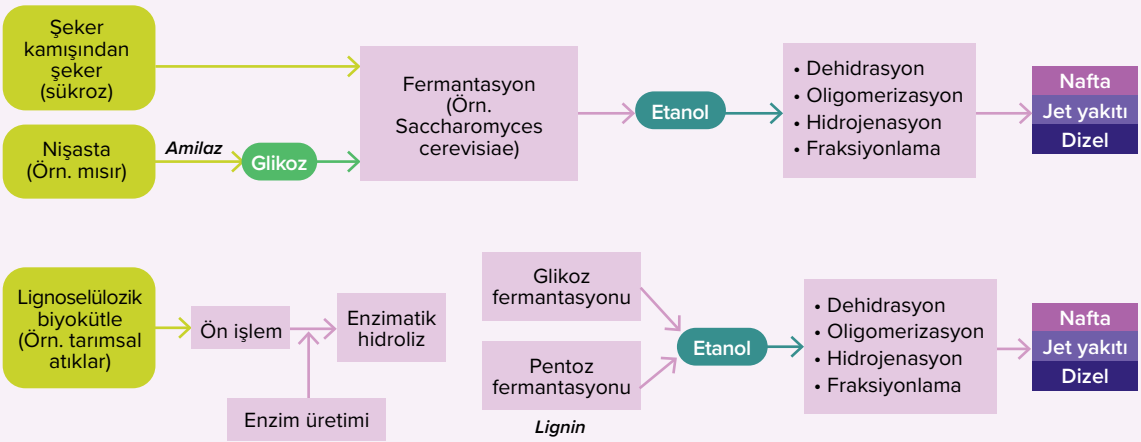
Ancak, yüksek sıcaklık işlemleri, malzeme ve tasarım zorlukları, sentez gazı temizleme adımları gibi konular yatırım ve işletme maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle dünyada az sayıda tam ölçekli biyokütle gazlaştırma tesisi kurulmuştur. Geçmişte, İsveç'te Värnamo adlı entegre bir gazlaştırma-dizel sentez pilot tesisi işletilmiştir. Günümüzde Güney Afrika (Sasol) ve Çin'de bazı tesisler kömür gazlaştırmadan elde edilen sentez gazını Fischer-Tropsch ile yakıta çevirmekte, ancak biyokütle payı çok düşüktür. Biyokütle gazlaştırmaunun TRL seviyesi 6-8 civarında kabul edilebilmektedir.[20] Ülkemizde sanayi ölçeğinde örnek bulunmamaktadır. Yukarıda aktarılan bu termokimyasal yöntemlerin ekonomik olabilmesi için ölçek ve süreklilik önemli olduğundan, tedarik zinciri ve yatırım maliyeti iyi analiz edilmelidir. Tablo 1'de rapor kapsamında detaylı analiz edilen termokimyasal dönüşüm yöntemlerinin hazırlık seviyesi ve türünün ilk örneği tesis maliyetlerini aktarmaktadır.

Tablo 1. Termokimyasal Dönüşüm Yöntemlerinden Bazıları: Hazırlık Seviyesi ve Sermaye Maliyetleri[21]

Teknoloji	Teknoloji Hazırlık Seviyesi	Maliyet
Piroliz	Süreç ve tasarıma bağlı olarak TRL 6-9.	• Yıllık 20 milyon L yağ üretim kapasiteli bir piroliz tesisi için yatırım maliyeti yaklaşık 25 milyon €.
HTL (Hidrotermal Sıvılaştırma)	Süreç ve tasarıma bağlı olarak TRL 6-8.	• Günlük 110 ton üretim kapasiteli bir tesis (atık çamura dayalı) için yatırım maliyeti yaklaşık 93,3 milyon $.[22]
Biyokütleden Sıvıya - Gazifikasyon (BtL)	Gösterim-pilot ölçeklerde TRL 6-8.	• Gazifikasyon yoluyla sentetik yakıt üretim maliyeti 0,6-1,7 €/kg aralığındadır, bu fark ham maddeye kaynaklıdır. • Biyometan ve metanol üretimi için CAPEX 2 000-3 000 €/kW ürün çıkışı şeklindedir. • FT-yakıtlar için CAPEX 2 600-4 500 €/Kw ürün şeklindedir. Aynı teknoloji ile H_2 üretiminin sermaye maliyeti, 50 MW kapasiteli bir tesis için yaklaşık 65 milyon € seviyesindedir.[23]

Türkiye gibi tarım ülkelerinde, termokimyasal yöntemler özellikle bol bulunan tarımsal artıkların enerjiye dönüştürülmesi için caziptir. Bu yöntemlerin ekonomik olabilmesi için ölçek ve süreklilik önemli olduğundan, tedarik zinciri ve yatırım maliyeti iyi analiz edilmelidir.

Bu rapor kapsamında ele alınacak olan son dönüşüm yöntemi ise mikroorganizmaların veya enzimlerin yardımıyla biyokütlenin istenen yakıtlara dönüştürülmesini içeren biyolojik dönüşümdür. Bu yöntem genellikle daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmekte ve biyokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. En yaygın biyolojik dönüşüm yöntemleri fermentasyon ve anaerobik arıtmadır. Fermantasyon, şeker veya nişasta içeren biyokütlelerin, mikroorganizmalar vasıtasıyla etanol veya diğer alkollere dönüştürülmesi sürecidir. Aşağıdaki şekilde örnek akış şeması aktarılmıştır.



Şekil 14. Şeker/Nişasta ve Lignoselülozik Biyokütleden Etanol Kökenli Hidrokarbon Yakıt (Nafta-Jet Yakıtı-Dizel) Üretim Akış Şeması

Biyoyakıt bağlamında en yaygın olanı etanol fermantasyonudur. Fermantasyon, birinci nesil biyoetanol üretiminde tamamen ticarileşmiş bir yöntemdir (TRL 9). İkinci nesil biyoetanolde ise fermantasyon öncesi adımlar eklendiğinden süreç karmaşıklaşmaktadır. Ancak, fermantasyon adımı temelde aynıdır. Türkiye'de fermantasyonla yakıt üretimi denince, şeker fabrikalarında üretilen melas bazlı etanol akla gelmektedir. Ülkemizde Konya, Eskişehir ve Ankara gibi tarım bölgelerinde yakıt sanayi için etanol üreten tesisler mevcuttur. Fermentasyon kapsamında, genetik mühendislik alanında yapılan çalışmalarla, örneğin *Zymomonas mobilis* gibi bakteriler veya genetiği değiştirilmiş mayalar kullanarak daha yüksek verimli, hatta pentoz şekerlerini fermente edebilen mikroplar geliştirilmiştir. Bu

sayede lignoselülozik ham maddelerin içindeki hemiselüloz şekerlerini de yakıta çevirmek hedeflenmektedir. Diğer bir yöntem ise anaerobik arıtmadır. Bu yöntemde, organik atıkların, oksijensiz ortamda mikroorganizma tarafından parçalanarak biyogaz oluşturması sürecidir. Besleme materyali olarak hayvan gübresi, gıda atıkları, arıtma çamuru, tarım atıkları gibi yüksek organik içerikli ve ıslak atıklar kullanılmaktadır. Elde edilen biyogaz, jeneratörlerde yakılıp elektrik üretmek için hemen kullanılabimekte veya depolanıp istenen yerde yakıt olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, küresel uygulamlarda biyogaz uygun ekipmanla arıtılıp %96 CH_4 içeren biyometana kadar yükseltilebilmektedir. Biyometan sıkıştırılarak CNG tüplerine doldurulup araç yakıtı olabilmekte ya da doğalgaz şebekesine verilebilmektedir. Biyogaz üretiminin önemli bir yan çıktısı da sindirim artığı olan, besince zengin yarı katı maddedir. Bu madde, kurutularak veya işlenerek organik gübre olarak tarımda kullanılabilir. Böylece döngüsel bir süreç sağlanmış olmaktadır.

Türkiye'de biyogaz teknolojisi son on yılda ciddi atılım yapmıştır. Biyogaz üretimi TRL 9 seviyesinde bir teknolojidir. Teknolojideki yenilikler çift aşamalı reaktörler ve kuru fermetasyon teknikleri gibi daha çok verimliliği artırmak veya biyogazın arıtılması (membran ayırma sistemleri, PSA vb.) yönündedir. Avrupa Birliği'nin REPowerEU planında biyometan üretimini 2030'a kadar 10 kat artırma hedefi belirlemesi, biyogaz teknolojisinin stratejik önemini göstermektedir.[24] Görüldüğü üzere, fermantasyon ve anaerobik sindirim halihazırda olgun ve yaygın teknolojilerken, enzimatik ve sentetik biyoloji tabanlı yeni yöntemler ufukta belirmektedir. Türkiye için biyolojik dönüşüm yöntemleri, özellikle tarım ve hayvancılık atıklarının değerlendirilmesi açısından kıymetlidir. Büyükbaş hayvan çiftliklerinin yaygın olduğu bölgelerde biyogaz tesisleri hem çevre koruma hem enerji üretimi sağlamaktadır. Şeker fabrikaları gibi mevcut sanayiler, yan ürün melası etanole çevirerek katma değer yaratmaktadır. İleride, lignoselülozik etanol veya biyobütanol gibi teknolojiler ticari olgunluğa eriştiğinde, Türkiye gibi geniş tarım arazilerine sahip ülkeler bu alanda da fırsatlar bulabilir. Ancak bunun için, Ar-Ge yatırımları ve pilot projelerle bilgi birikimi oluşturulması kritik önem taşır. Son olarak, biyokütlenin kimyasal bileşimini değiştirmeden yalnızca fiziksel özelliklerini (boyut, yoğunluk, nem) iyileştirmeye odaklanan fiziksel/ mekanik dönüşüm yöntemleri de sektörde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Öğütme-kurutma sonrasında uygulanan peletleme ve briketleme bu başlık altında yer almaktadır (Şekil 15).

Şekil 15. Fiziksel Dönüşüm Yöntemlerine Örnekler

Öte yandan, patent başvuruları, teknolojik yeniliklerin ve ticarileşme çabalarının bir göstergesi olarak, hangi biyoyakıt üretim yollarının ve ham madde kaynaklarının endüstride ve akademik dünyada yoğun ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Tablo 2, 2000–2025 döneminde biyoyakıt teknolojileri alanında en çok patent başvurusu yapılan teknoloji yollarını ve ham madde kaynaklarını özetlemektedir. Bu veriler, WIPO, Espacenet ve PATSTAT gibi güvenilir kaynaklardan elde edilerek derlenmiştir.

Tablo 2. 2000–2025 döneminde biyoyakıt teknolojileri alanında en çok patent başvurusu yapılan teknoloji yolları ve ham maddeler

Teknoloji Yolu	Ham madde	Yaklaşık Patent Başvuru Sayısı
Mikroalglerden Biyodizel	Mikroalgler	315
Mısır Sapından Biyoetanol	Mısır sapı	280
Atık Yemek Yağından Biyodizel	Atık yemek yağı	240
Tarımsal Atıklardan Selülozik Etanol	Tarımsal atıklar	300
Lignoselülozik Biyokütleden Fischer-Tropsch Gazlaştırma	Lignoselülozik biyokütle	350
Kentsel Katı Atıklardan Biyogaz/Biyometan	Kentsel katı atık	210

Bu tablo, mikroalglerden biyodizel üretiminden, tarımsal atıklardan selülozik etanol üretimine ve lignoselülozik biyokütleden Fischer-Tropsch gazlaştırma teknolojilerine kadar, biyoyakıt teknolojilerinde patent başvurusu açısından öne çıkan alanları göstermektedir. Veriler, teknolojinin gelişim potansiyeli ve ticari uygulama ölçeklerinin artmasıyla yatırımcılar, araştırmacılar ve politika yapıcılar için önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca, patent başvuru sayılarındaki artış, ilgili teknolojilerin ticarileşme potansiyelinin ve küresel ölçekte benimsenmesinin artacağına dair olumlu bir işaret olarak değerlendirilebilir.

3.2. Sentetik Yakıt Teknolojileri

Hidrokarbon türevi yakıtların veya amonyak, metanol, dimetil eter (DME) gibi değerli kimyasalların, ham petrolün rafine edilmesi yerine farklı kimyasal reaksiyonlarla yapay olarak sentezlenmesi sonucu "sentetik yakıtlar" kavramı ortaya çıkmıştır. Sentetik yakıt üretiminin temel amacı fosil yakıt kullanımını tamamen ortadan kaldırmak değil, sürdürülebilir olmayan bu konvansiyonel yakıtları sürdürülebilir alternatifleri ile tamamlamak ya da uzun vadede minimum fosil yakıt kullanımı için gerekli en ideal alternatif yakıt seçeneğini sunmaktır. Bununla birlikte fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve enerji arz güvenliği konusunda duyulan küresel endişeler de farklı tarihsel dönemlerde sentetik yakıt gibi petrole bağımlılığı azaltacak alternatif yakıt arayışını tetiklemiştir. Özellikle II. Dünya Savaşı öncesi başlayan sentetik yakıt geliştirme yarışı 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri ile daha da hızlanmıştır. Yeni nesil sentetik yakıt üretimi, birinci ve ikinci nesil biyoyakıtların aksine biyokütle üretimi için gerekli geniş tarım arazileri veya yoğun tarımsal sulama kaynaklı aşırı su tüketimi gerektirmediğinden,[25] gıda arz güvenliği ve tarım arazilerinin kullanımı konusunda tehdit oluşturmaz.[26] Bu yönüyle sentetik yakıtlar, küresel enerji ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir bir alternatif sunarken, sürdürülebilir gıda arzı ve arazi rekabeti konusunda biyoyakıtların yaratacağı tehditleri de azaltma potansiyeline sahiptir.

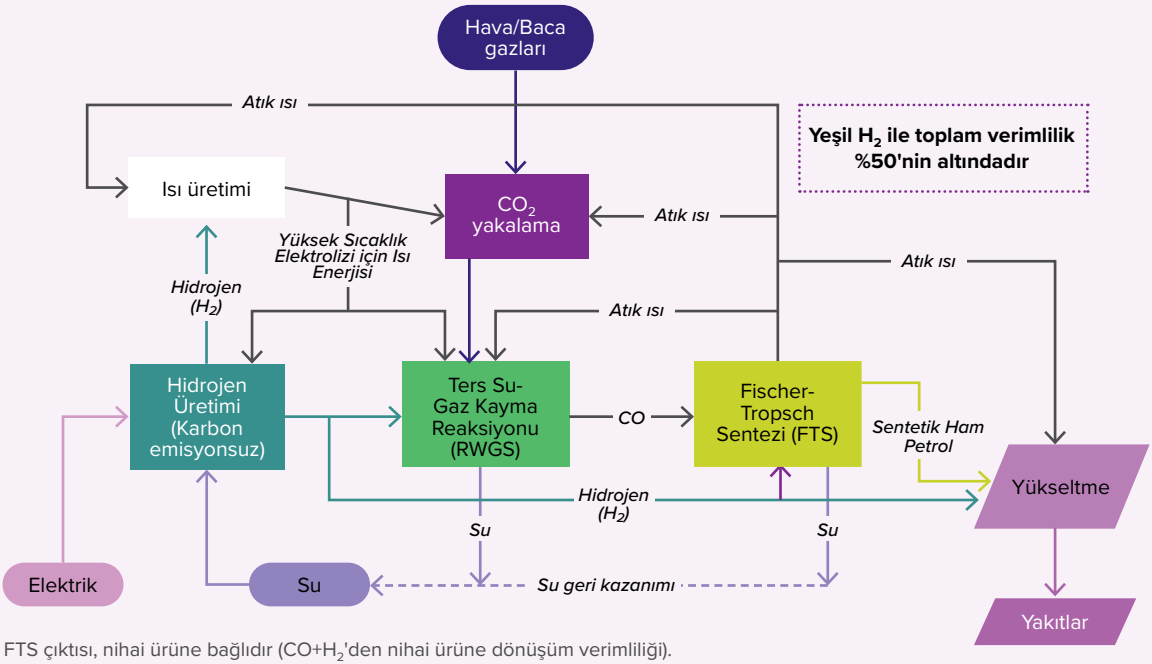
Üretim süreçlerindeki çeşitlilik ve kullanılan kaynakların (girdilerin/ham maddelerin) birbirinden farklı olması sentetik yakıtların uluslararası literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmasına neden olmaktadır. Bu sınıflandırma Tablo 3'de aktarılmıştır. Konuya sentetik yakıtların teknolojik gelişimi ve sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında kaynak bazlı ve üretim sürecine dayalı sınıflandırmaların daha yaygın kullanıldığı söylenebilir. Bu şekilde sentetik yakıtların karbon ayak izi, enerji verimlilikleri ve ölçeklenebilirliği daha iyi takip edilebilmektedir. Dolayısıyla daha kapsayıcı olması adına sentetik yakıt kavramı, "girdi/ham madde türüne" veya "üretim proseslerinin türüne" göre aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Biyojenik karbon içeren biyokütle temelli sentetik yakıt üretim teknolojileri (gazlaştırma ve piroliz gibi) bu raporun madde 3.1 "Biyoyakıtlar'' başlığı kapsamında incelendiği için aşağıdaki tabloda "Girdi/Ham madde Türüne Göre" sınıflandırmaya dahil edilmemiştir*.

Tablo 3: Sentetik Yakıtların Sınıflandırılması

SENTETİK YAKITLAR	
Girdi/Ham madde Türüne Göre*	**Üretim Proseslerinin Türüne Göre**
1. Karbon Yakalama Sonucu Elde Edilen Yenilenebilir Karbon Temelli (DAC veya noktasal kaynaktan)	1. Dolaylı Dönüşüm Prosesleri (Indirect)
2. Doğalgaz Temelli (Gas-to-Liquids)/GtL	2. Doğrudan Dönüşüm Prosesleri (Direct)
3. Kömür Temelli (Coal-to-Liquids)/CtL	3. Karbon İçermeyen Yakıtlara Dönüşüm Prosesleri (RFNBO olarak Amonyak ve Hidrojen eldesi)

Son yıllarda yenilenebilir enerji kullanımının etkisiyle sentetik yakıt üretim konseptlerinde yaşanan değişimle birlikte "Güçten Sıvıya" (Power-to-Liquid: PtL) veya diğer ismiyle elektro yakıt (e-fuel) üretimi gibi karbon nötr çözümler, *Kömürden Sıvıya* (Coal-to-Liquids/CtL) ve *Gazdan Sıvıya* (Gas-to-Liquids/GtL) teknolojilerinin yerini almaya başlamıştır ve yeni yatırımlar bu teknolojiye doğru kaymaktadır. Argus firması tarafından 2025 yılı Şubat ayında yayınlanan "SAF Kapasite Haritasında" dünya genelinde 4 tane PtL tesisi faaliyette olduğu ve yeni kurulacak 47 tane PtL tesisinin yatırım planlamasının yapıldığı belirtilmiştir.[27]

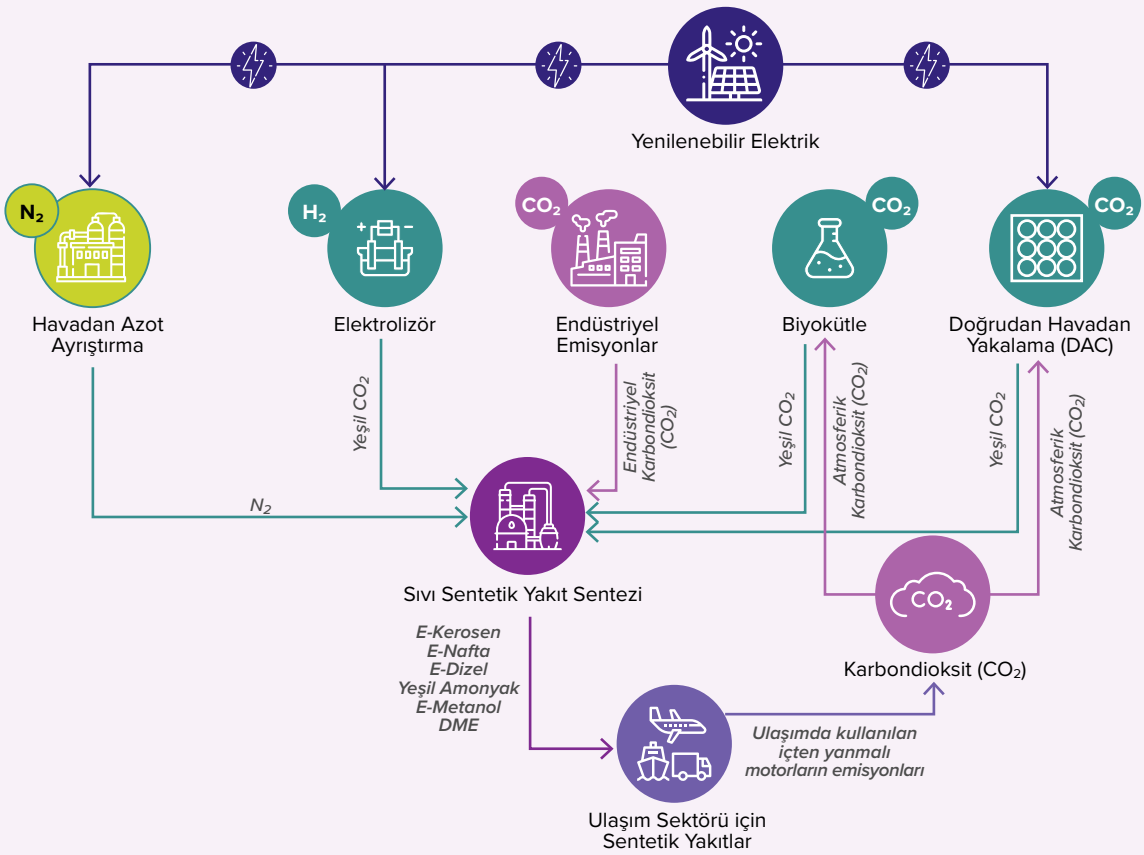
Üretim proseslerinin türüne göre sınıflandırmada ise karbon içeren ve karbon içermeyen sentetik yakıtlara dönüşüm proseslerinden oluşan genel bir ayrım yapılabilir. Karbon içeren sentetik yakıtlara doğrudan veya dolaylı dönüşümü içeren iki farklı yoldan gidilebilmektedir. Dolaylı dönüşüm (Indirect conversion) yöntemlerinde, genellikle önce karbondioksitten (CO_2) sentez gazı (CO ve H_2 karışımı) üretilir, ardından Fischer-Tropsch (FT) sentezi gibi katalitik yöntemlerle hedeflenen sentetik yakıtlar elde edilmektedir. Örneğin; PtL teknolojisi de ardışık reaksiyon aşamaları içeren dolaylı bir dönüşüm prosesidir. Şekil 16'da gösterildiği gibi; sırayla elektroliz, karbon yakalama, ters su-gaz değişim reaksiyonu (RWGS), Fischer-Tropsch (FT) prosesi ile sıvı sentetik yakıta (elektro yakıt & e-yakıt) dönüş aşamalarını içeren PtL teknolojisinde, RWGS reaksiyonu ile sentez gazına geçilmesi gerekmektedir.



FTS çıktısı, nihai ürüne bağlıdır ($CO+H_2$'den nihai ürüne dönüşüm verimliliği).
- Dizel yakıt: 230°C, 40 bar, %60-90
- Benzin: 340°C, 25 bar, %85

Şekil 16. CO_2 Yakalama, RWGS ve Fischer-Tropsch Entegrasyonu ile E-Yakıt Üretim Sürecinin Akış Şeması

Geleneksel sentetik yakıtlar, kömür ve doğalgaz gibi farklı fosil kaynaklardan da üretilebilirken, PtL teknolojisi ile üretilen e-yakıtlar sadece yenilenebilir elektrikten üretilen yeşil hidrojen ile atmosferden veya endüstriyel tesislerden yakalanmış karbondioksit kullanılarak sentezlenen bir sentetik yakıt türüdür. E-yakıt üretim süreçlerinin değer zincirinin genel gösterimi Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. Ham Maddeden Son Ürüne Kadar e-yakıt Değer Zinciri

Doğrudan dönüşüm (Direct conversion) yöntemlerinde ise sentez gazı oluşturma aşamasına gerek kalmadan, havadan yakalanan veya diğer karbon kaynaklarından elde edilen CO_2'nin doğrudan hidrojen ile katalitik reaksiyona sokulması yoluyla metanol, dimetil eter (DME), sentetik metan gibi nihai ürünler üretilmektedir. "Güçten Gaza" (Power-to-Gas: PtG) teknolojisi de doğrudan dönüşümün en bilinen örneklerinden biridir. Bu teknolojinin temelini oluşturan Sabatier prosesi ile CO_2, doğrudan sentetik metana (e-metan) dönüştürülmektedir.

Sınıflandırılma türü fark etmeksizin tüm sentetik yakıt üretim proseslerinin temelinde hidrojen bulunmaktadır ve hidrojenin üretim biçimi sentetik yakıtın kimliğini belirleyen

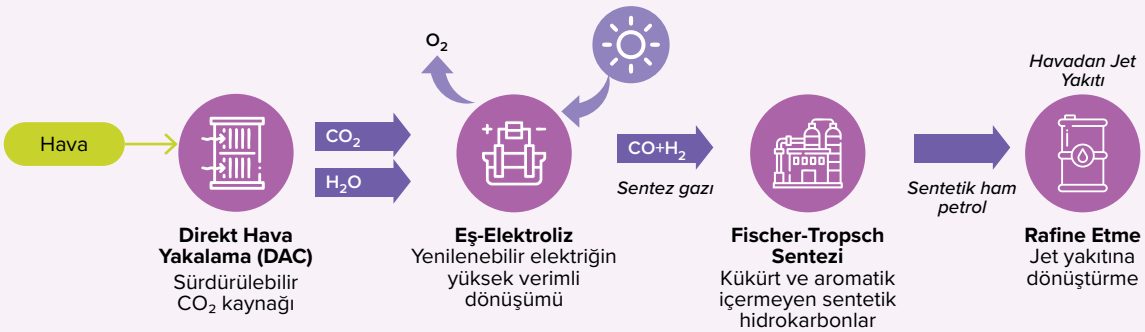
önemli bir unsurdur. Bu nedenle sentetik yakıt üretiminde kullanılan hidrojenin gerçekten yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilip üretilmediğinin sıkı bir şekilde takip edilebilmesi, artan hidrojen talebi ile birlikte daha kritik hale gelmiştir. Örneğin; Avrupa Birliği (AB) 2030 yılına kadar 10 milyon ton yerli üretim hidrojen ve 10 milyon ton ithal yenilenebilir hidrojen kullanım hedefi belirlemiş ve pazar oluşumunu güçlendirmek için 2023 yılının sonunda "Avrupa Hidrojen Bankası"nı devreye almıştır.[28] 20 milyon tonluk bu büyük hidrojen talebinin yaklaşık %9'u (1,8 milyon tonluk kısmı) PtL teknolojisi ile üretilecek e-yakıtlar için ayrılmıştır.[29] Bu noktada AB, hidrojen ve sentetik yakıt pazarını "yeşil görünen" ama aslında fosil kaynaklara dayalı elektrik ile elde edilmiş hidrojen ve bu hidrojenden türetilmiş istenmeyen yakıt çözümlerinden arındırmak amacıyla yeni bir düzenlemeye giderek sentetik yakıt tanımının sınırlarını netleştirdiği "RFNBO" kavramını kullanmaya başlamıştır. AB'nin II. Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED II) kapsamında ilk kez 2018 yılında tanımlanan ve 2021 yılında kapsamı netleştirilerek yürürlüğe giren "Biyolojik Kökenli Olmayan Yenilenebilir Yakıtlar (RFNBO)'' kavramı, biyolojik olmayan kaynaklardan üretilen yenilenebilir sıvı ve gaz yakıtları tanımlayan kapsayıcı bir kavramdır. RFNBO, genellikle elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojeni temel ham madde olarak kullandığından e-yakıtlar ile sıklıkla karıştırılmakta, ancak teknik ve düzenleyici çerçevede e-yakıtlardan bazı temel farklılıklar içermektedir.

3.2.1. Sentetik Yakıt Kapsamındaki Temel Teknolojik Yollar

Sentetik yakıt üretiminin yapı taşlarını oluşturan karbon ve hidrojenin, fosil yakıt kaynakları dışında daha sürdürülebilir yollarla elde edilmesi için gösterilen çabalar, **"yeni nesil"** sentetik yakıtların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu kapsamda yirminci yüzyılın başlarında temelleri atılan Fischer-Tropsch, Sabatier Prosesi, Haber-Bosch ve Ters Su-Gaz Değişim Reaksiyonu (RWGS) gibi temel kimyasal prosesler, karbon emisyonlarının azaltılması hedefi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımıyla birlikte yeniden şekillenerek günümüzün güncel ihtiyaçlarına uyarlanmıştır.

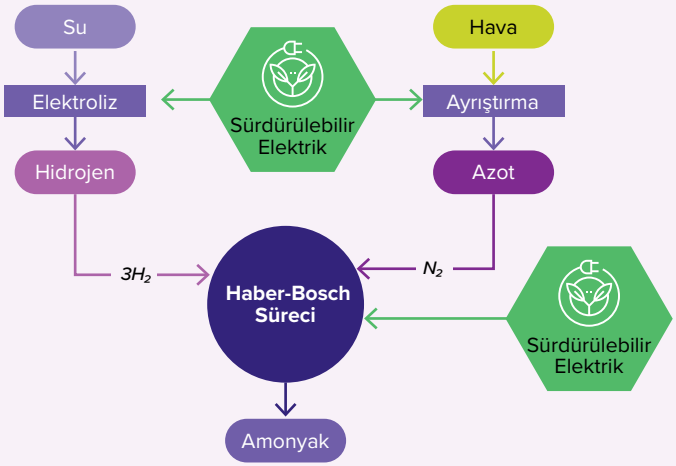
Sentetik yakıt üretiminde kullanılan bu 4 temel kimyasal prosesin dönüşümünde son yıllarda katalizör teknolojisinde yaşanan ilerlemeler, güneş ve rüzgâr enerjisinden üretilen yeşil hidrojenin sentetik yakıtlara dönüştürülerek taşınması/depolanması, büyük ölçekli karbon yakalama uygulamaları ve daha verimli reaktör tasarımlarının kullanımı oldukça etkilidir. Örneğin; RWGS prosesi çok uzun yıllardır bilinmesine rağmen başlarda endüstride pek

kullanılmayan bir reaksiyon türü iken, özellikle karbon yakalama teknolojilerinin kullanımının artması ile birlikte son yıllarda daha da önem kazanarak yakalanan karbondioksitin sentez gazına ($CO+H_2$) dönüşümünde kilit bir unsur haline gelmiştir. Benzer bir dönüşüm sentez gazından sentetik yakıt üretimi için kullanılan geleneksel Fischer–Tropsch (FT) sentezi için de geçerlidir (Şekil 18). FT prosesi için uzun yıllar boyunca fosil karbon kaynağı olarak kömür ve doğalgaz kullanılırken, bu karbon kaynaklarının yerini zamanla biyokütle ve endüstriyel karbon emisyonları (baca gazı) almıştır. Bu yeni karbon kaynaklarının kullanımı da geleneksel büyük ölçekli FT tesislerinin yerine biyokütle kaynağına yakın lokasyonda veya bir endüstriyel tesise entegre haldeki daha küçük ölçekli sentetik yakıt üretimini mümkün kılan "modüler FT reaktörleri" gibi yeni mühendislik çözümlerini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 18. Fischer-Tropsch Yöntemiyle e-yakıt Üretim Akış Şeması

Değişimi gösteren bir diğer örnekte uzun yıllardır doğal gazın reformlanması ile elde edilen gri hidrojeni kullanan Haber-Bosch prosesinden (Şekil 19) amonyak (NH_3) üretilirken, prosese yeşil hidrojenin beslenmesi ile elde edilen son ürünün "yeşil amonyak" olarak adlandırılmasıdır. Dolayısıyla tüm bu örnekler dikkate alındığında sentetik yakıt üretiminde; karbonlu yakıtlara dönüşümün nasıl gerçekleştiği (doğrudan, dolaylı, vd.), yeni karbon kaynağına geçiş ve hidrojenin üretim şekli gibi radikal değişimlerin hem üretim konseptlerini etkilediği hem de tercih edilen teknolojileri belirlediği söylenebilir.



Şekil 19. Haber-Bosch Süreci ile Üretilen Amonyağın Üretim Akış Şeması

Tablo 4'te sentetik yakıt üretim konseptleri ile temel teknolojiler/kimyasal prosesler ve nihai olarak elde edilen sentetik yakıtlar alt alta sıralanmıştır. Sentetik yakıt üretim konseptleri kendi içinde farklı teknoloji hazırlık seviyelerine sahip alt teknolojilerin ve kimyasal proseslerin bileşiminden oluşmaktadır. Bu modüler yapıları nedeniyle üretim konseptlerinin TRL seviyeleri belirli bir aralıkta değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin; TRL 5-8 aralığında yer alan PtG prosesi; elektroliz, metanasyon ve gaz şebekesi entegrasyonu gibi farklı teknolojik olgunlukta alt sistemlerden oluşmaktadır. Bu noktada kullanılan elektrolizör tipi (Alkali, PEM, AEM, SOEC) ve metanasyon türüne göre (katalitik veya biyolojik) bu prosesinin TRL seviyesi belirlenebilir. Bir diğer doğrudan dönüşüm prosesi olan termokatalitik hidrojenasyon ile metanol üretimi için İzlanda'da kurulan George Olah tesisi gibi türünün ilk örneği projeler bulunsa da, bazı teknik sınırlamalar nedeniyle bu teknoloji henüz ölçeklenebilecek kadar yeterli olgunlukta değildir (TRL 6-7).[30] Bu proseste kullanılan $Cu/ZnO/Al_2O_3$ veya $Cu/ZnO/ZrO_2$ gibi katalizörlerin seçiciliğinin, etkinliğinin ve ömrünün arttırılması gerekmektedir.

Tablo 4. Farklı Sentetik Yakıtlar ve İzlenen Teknolojik Yollar

	1. Girdi/Hammadde Türüne (Karbon Kaynağına) Göre Sentetik Yakıt Üretimi			2. Üretim Proseslerinin Türüne Göre Sentetik Yakıt Üretimi			
Üretim Konsepti	**Kömürden Sıvıya (CtL) fosil karbon kaynaklı**	**Doğal gazdan Sıvıya (GtL) fosil karbon kaynaklı**	**Karbon Yakalamadan (DAC veya BECCS) gelen yenilenebilir karbon kaynaklı*** **	**Dolaylı Dönüşüm Prosesleri** (CO_2'den sentez gazına çevrim gerektiren iki aşamalı dönüşüm)	**Doğrudan Dönüşüm Prosesleri**** (Doğrudan CO_2'den yakıta dönüşüm)		**Karbon İçermeyen Yakıtlara Dönüşüm Prosesleri** (RFNBO üretimi)
Teknolojik Yollar ve Kimyasal Prosesler	Gazlaştırma → Fischer-Tropsch Sentezi	Buhar/ATR Reformlama → Fischer-Tropsch Sentezi	**Güçten Sıvıya (PtL)*** Ters su-gaz değişim reaksiyonu (RWGS) ile sentez gazı üretimi + Fischer-Tropsch Sentezi		**Doğrudan Metanol Sentezi***	**Güçten Gaza (PtG)*** Sabatier Prosesi	**Yeşil Amonyak Sentezi*** Haber-Bosch Prosesi
Elde Edilen Sentetik Yakıtlar	Sentetik Parafinik Kerosen (FT-SPK) Sentetik Benzin Sentetik Nafta Metanol/DME		e-Kerosen e-nafta e-dizel e-DME (dimetil eter) e-OME (oksimetilen eter)		e-metanol	Sentetik Metan (SNG) veya e-Metan	Yeşil Amonyak Yeşil Hidrojen

** Bu üretim konseptinin tamamında yenilenebilir elektrik ile üretilmiş Yeşil Hidrojen kullanımı vardır.*

*** Doğrudan dönüşüm prosesleri arasında artık ticari olarak kullanımı olmayan kömür hidrojenasyonu ve kömür karbonizasyonu/pirolizi gibi yöntemler tabloya dahil edilmemiştir.*

**** 2041 yılına kadar AB Emisyon Ticaret Sistemi kapsamındaki tesislerden elde edilen baca gazı kaynaklı fosil karbonu kullanılabilir.*

Dünya genelinde 4 farklı tesiste faaliyete geçen ve TRL 6-8 aralığında yer alan PtL teknolojisi de elektroliz, karbon yakalama, sentez gazına çevrim ve FT sentezi olmak üzere ardışık birden fazla alt sistem ve teknolojiden oluşmaktadır. Bu noktada tercih edilen elektrolizör tipi (Alkali, PEM, AEM, SOEC), karbon yakalama yöntemi (yanma öncesi-sonrası, oksi yanma) ve FT reaktör sistemi de PtL prosesinin TRL seviyesini doğrudan belirlemektedir. Gazlaştırma ve buhar/ototermal reformlama gibi teknolojik olgunluğu yüksek prosesleri içeren CtL ve GtL gibi bazı geleneksel teknolojiler ise uzun yıllar boyunca endüstriyel olarak işletmede kalmış ve büyük ölçekli uygulanabilirliğini

kanıtladığından TRL 8-9 seviyesindedir. Bu iki olgun teknolojinin dekarbonizasyonu için CCUS temelinde yapılan yeni entegrasyonlar teknolojilerin TRL seviyesini düşürmektedir. Son olarak yeşil amonyak sentezinin temelini oluşturan Haber-Bosch prosesi de (TRL 8-9) dünya genelinde faaliyette olan çok sayıda amonyak tesisinde kullanılmaktadır ve ticari olarak kendini kanıtlamıştır. Ancak son yıllarda bu prosesteki enerji verimsizliklerini (%30–40 arasında net enerji verimliliği) giderecek ve amonyağın doğrudan yakıt olarak kullanımını kolaylaştıracak yeni ar-ge çalışmaları da yapılmaktadır. Bununla birlikte Haber-Bosch prosesine alternatif olacak "Doğrudan Elektrokimyasal Azot İndirgeme" gibi yeni nesil amonyak üretim teknolojileri de henüz gelişim aşamasındadır.[31]

4.

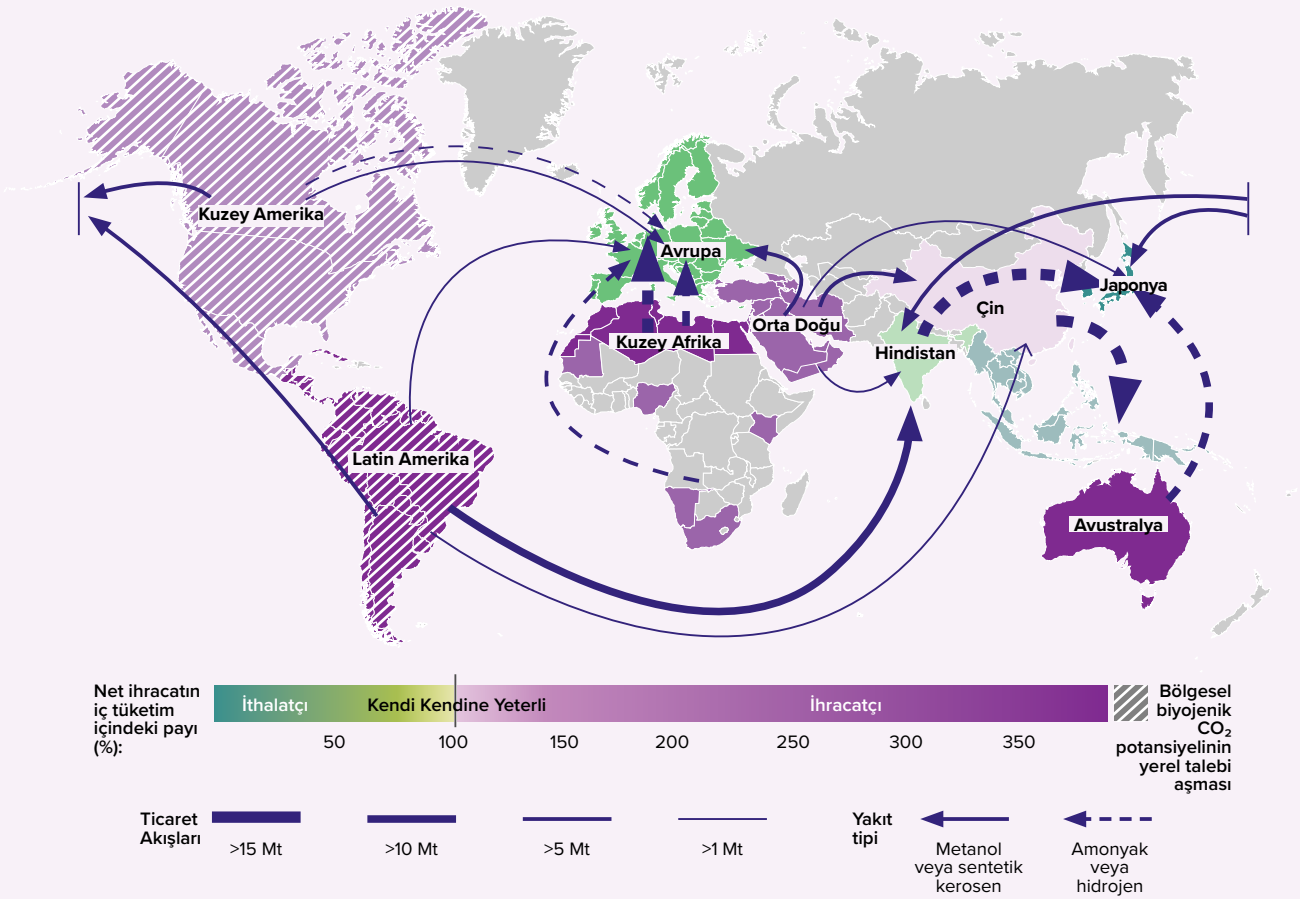
Yeni Nesil Yakıt Teknolojilerinin Stratejik ve Maliyet Analizi

Yeni nesil yakıtlar, üretimleri ve kullanımları konusunda dünyanın farklı bölgelerinde farklı motivasyonları ve zorlukları bünyesinde barındırsa da enerji arz güvenliğine katkıları, çevresel faydaları ve sunduğu yakıt çeşitliliği nedeniyle küresel pazarlarda kendilerine her zaman yer bulabilmektedir. Petrol üreten ülkeler ve petrol ithal eden ülkeler bu yakıtların yarattığı dönüşümden farklı şekillerde etkilenmektedir. Petrol ihracatçısı ülkeler için yeni nesil yakıtlar genellikle talep taraflı bir risk unsuru olarak görülürken, petrol ithal eden ülkeler için yeni nesil yakıtlar enerji güvenliğini artırıcı bir fırsat olarak görülmektedir. Bununla birlikte yeni nesil yakıtların tamamı bugünün ekonomik ve teknolojik koşullarında geleneksel fosil yakıtlara göre hem daha pahalı hem de konvansiyonel fosil yakıtların tamamen yerine geçemeyecek kadar düşük hacimlerde üretilebilmektedir.

Yeni nesil yakıtların küresel ticaret ağındaki dolaşımını ve tedarik zincirlerindeki yerini belirleyen, arz ve talebi etkileyen bazı temel unsurlar bulunmaktadır. Biyoyakıtlar için bu faktörlerin başında ham maddeye erişim/yakınlık, son ürünün karbon ayak izi ve biyoyakıt

kalitesi gelirken, sentetik yakıtlar için elektrolizör gibi kritik üretim altyapılarının ve yenilenebilir enerji kaynaklarının varlığı ve bölgesel biyojenik CO_2 potansiyeli gelmektedir. Özellikle Türkiye ve AB gibi petrol ihtiyacının büyük kısmını ithalatla karşılayan bölgelerde, biyoyakıtlar yerli tarımsal kaynaklardan ve atıklardan üretildiği takdirde stratejik fayda sağlamaktadır. Benzer şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımına bağlı olarak orta-uzun vadede e-yakıt üretimi de enerjide dışa bağımlı ülkeler için ciddi bir potansiyel barındırmakta, bu durum da uluslararası ticaret dinamiklerine yansımaktadır.

2050 yılında nihai kullanım molekülüne göre hidrojen türevlerinin ticaretine ilişkin küresel harita

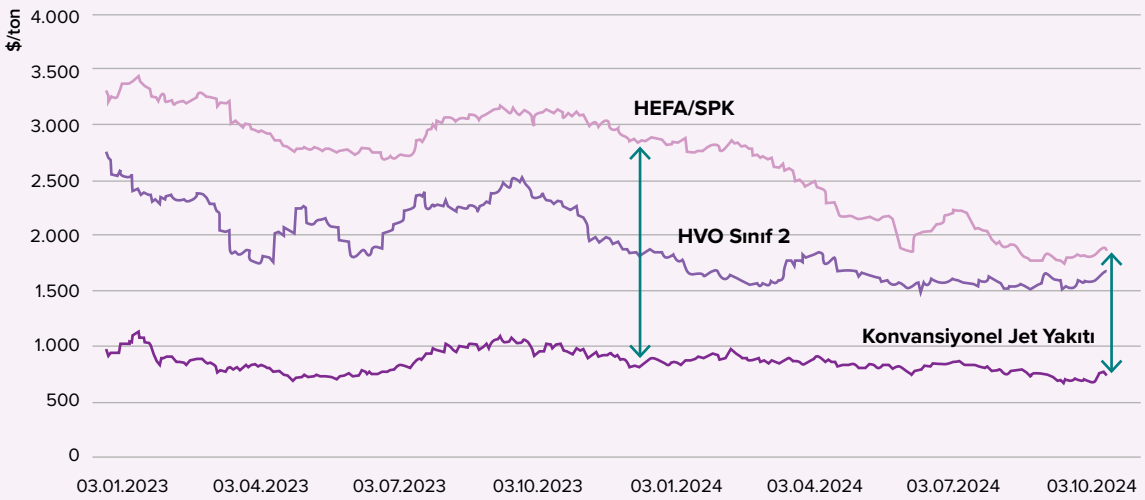


Şekil 20. 2050 yılında nihai kullanım molekülüne göre hidrojen türevi yakıtların ticaretine ilişkin küresel harita[32]

Örneğin; metanol, sentetik kerosen ve amonyak gibi hidrojen türevi sentetik yakıtların 2050 yılına kadar ticaretine ilişkin küresel durum Şekil 20'de özetlenmektedir. Önemli bir biyojenik CO_2 potansiyeli olmamasına rağmen, Orta Doğu, mevcut ihracat altyapısı, düşük karbonlu hidrojen üretim potansiyeli ve DAC yatırımları ile metanol ihracatı için iyi bir aday olarak ortaya çıkmaktadır. Avrupa gibi kritik talep merkezlerine coğrafi yakınlığından faydalanan Orta Doğu bölgesi, kısa mesafelerde ekonomik olarak daha uygun olan metanolü ihraç etmek için iyi bir konuma sahiptir. Avrupa, Japonya ve Güney Kore gibi e-yakıt talebinin yüksek olduğu bölgelerin aksine, Çin ve Hindistan önemli yenilenebilir enerji potansiyellerine sahiptir. Bununla birlikte, yeterli biyojenik CO_2 eksikliği nedeniyle, muhtemelen her iki ülkede hem önemli miktarlarda metanol ve sentetik gazyağı ithal ederken hem deamonyak ve hidrojen ihraç edebilir. Böylece bu ülkelerin, dengeli ve neredeyse kendine yeterli bir enerji ekonomisi elde edebilmeleri mümkündür. Bu karmaşık ticaret ağı sadece bölgesel dengesizlikleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kaynak tahsisini optimize ederek genel ekonomik verimliliği de artırabilir. Sentetik yakıtlar için en uygun üretim yerlerinin talep merkezlerine yakın olması beklenmediğinden ve nakliye maliyetlerinin üretim maliyetlerine kıyasla daha düşük olduğu bilindiğinden küresel ticarette maliyetleri azaltabilir ve bölgesel dengesizlikleri hafifletebilir. Kuzey ve Güney Amerika gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ve biyojenik CO_2'nin bol olduğu bölgeler, sentetik yakıtların, özellikle de son ürün değeri daha yüksek ancak nakliye maliyetleri daha düşük olan sentetik gazyağının önde gelen üreticileri olmak için iyi bir konuma sahiptir. Sahip oldukları önemli biyojenik CO_2 potansiyeli, bu yakıtların üretiminde rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu arada, Kuzey Afrika ve Sahra Altı Afrika gibi iyi bir yenilenebilir potansiyele sahip ancak sınırlı biyojenik CO_2'ye sahip bölgeler, özellikle amonyak üretimine ve ihracatına odaklanmak için en iyi konumdadır. Buna karşın biyojenik CO_2 eksikliği, karbon bazlı sentetik yakıtları ihraç etme kabiliyetlerini kısıtlamaktadır. Tüm bu ticari dinamikler yeni nesil yakıtların küresel pazarlardaki fiyatlarını da doğrudan belirleyici niteliktedir.

Şekil 21'de gösterildiği gibi Ocak 2023-Ekim 2024 tarihleri arasında ton başına fiyat bazında HEFA-SPK SAF yaklaşık %43, HVO sınıf II yenilenebilir dizel ise yaklaşık %40 ve konvansiyonel jet yakıtı yaklaşık %21 düşmüştür. 2023 yılının başından bu yana geçen sürede HEFA/SPK ve HVO ile konvansiyonel jet yakıtı arasındaki fiyat makası daralmaya başlamıştır. Bunun başlıca nedenleri arasında HEFA ve HVO tesislerinin kapasite artışı ve işletme verimliliğinin yükselmesi sonucu, birim maliyetleri aşağı çekmesi yer almaktadır. Sentetik yakıtlar tarafından bakıldığında günümüz koşullarında maliyetleri belirleyen en

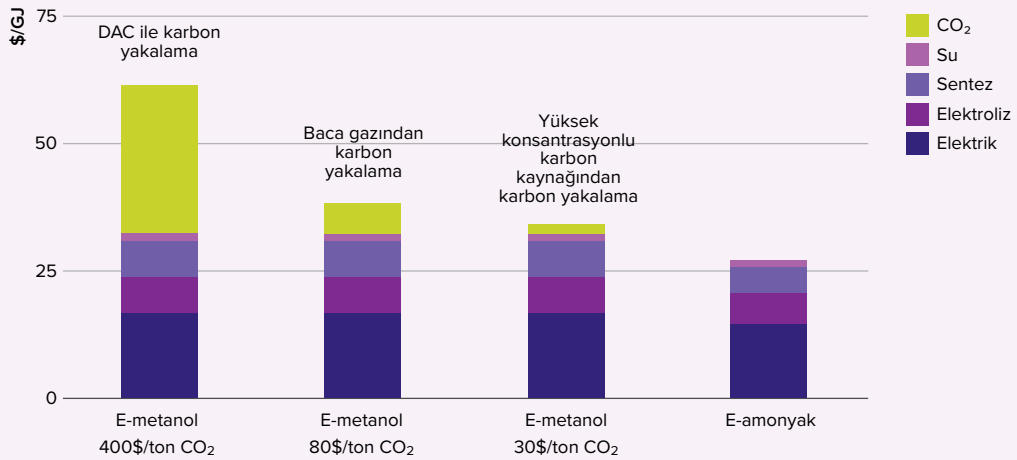
temel unsur ise karbonu elde etmenin maliyeti veya bu maliyetten kaçınarak karbonsuz yakıtların tercih edilmesidir.



Şekil 21. HEFA-SPK, HVO Sınıf 2 ve Konvansiyonel Jet Yakıtı için Dönemsel Fiyat Karşılaştırması[33]

Karbondioksiti yakalamanın maliyeti büyük ölçüde başlangıç konsantrasyonlarına bağlıdır. Örnek olarak Şekil 22'de farklı karbon kaynaklarından yakalanan karbon kullanılarak üretilen e-metanoller ve yalnızca yeşil hidrojenin üretiminde belirleyici bileşen olduğu e-amonyak için seviyelendirilmiş maliyetler kıyaslanmıştır. Endüstriyel tesislerin baca gazlarında fermantasyon süreçlerine kıyasla daha düşük konsantrasyonlarda CO_2 bulunması (hacimce %10-20), karbon yakalama maliyetlerini yaklaşık 60-80 USD/ton CO_2 seviyelerine çıkarmaktadır. Üretim sahasında biyojenik noktasal karbon kaynakları kullanılamıyorsa, e-yakıt tesisleri DAC ile atmosferden CO_2 hammaddesi sağlayabilir. Bu şekilde büyük ölçekli e-yakıt tesisleri için DAC tabanlı CO_2 yakalama teknolojisi tercih edildiğinde 2030 yılı için 400-670 $/ton CO_2 yakalama maliyeti çıkması beklenmektedir. Dolayısıyla e-metanol üretimi yüksek konsantrasyonlu bir CO_2 kaynağına bağlı olarak yapıldığında, e-amonyaktan yaklaşık %25 daha pahalı, biyojenik baca gazlarından yanma sonrası yakalamaya bağlı olarak yapıldığında ise e-amonyaktan yaklaşık %40 daha pahalı olmaktadır. Son olarak, CO_2'nin doğrudan havadan elde edilmesi (DAC) gerekirse, düşük emisyonlu e-metanolün üretimi e-amonyaktan iki kat daha pahalı hale gelmektedir. Sonuç

olarak e-amonyak üretimi için ekstra karbon yakalama maliyetlerinin olmaması ve sentez maliyetlerinin e-metanol üretimine göre daha düşük olması bu iki yakıt arasında özellikle denizcilik sektöründeki kullanımı konusunda yaşanan rekabeti doğrudan etkilemektedir.



Not: WACC %5, ekonomik ömür 25 yıl varsayılmıştır. Tüm kabuller 2030 yılı için yapılmıştır. Performans (tümü LHV cinsinden): elektrolizör %69, H_2-amonyak dönüşümü %88, H_2-metanol dönüşümü %80 verimlilikte kabul edilmiştir.

Şekil 22. Farklı karbon kaynaklarından yakalanan karbon kullanılarak üretilen e-metanol ve e-amonyak için seviyelendirilmiş maliyet karşılaştırması[34]

5.

Türkiye İçin Öneriler

Avrupa Birliği'nin Rusya'ya olan gaz bağımlılığını yeni nesil yakıtlar ve enerji taşıyıcıları ile azaltma çabası ve ABD'nin IRA gibi teşviklerinde yakıtlara verdiği önem, petrol zengini ülkelerin petrol sonrası ekonomiye hazırlık için yaptığı yeni nesil yakıt yatırımları, geleceğin temiz enerji ihracatçıları olmaya aday Şili, Yeni Zelanda, Fas, Cezayir, Mısır, Singapur gibi ülkelerin yeni güç merkezleri haline gelmek için güneş ve rüzgar potansiyelini katma değerli kimyasallara ve yakıtlara çevirme çabaları gibi küresel gelişmelerin tamamı yeni nesil yakıtlar konusunda son 10 yıllık süreçte köklü bir paradigma değişimi yaşandığını göstermektedir. Ülkemizin, dış ticaret hacminin büyüklüğü ve enerji arz güvenliğindeki kırılganlıkları düşünüldüğünde yeni nesil yakıt teknolojileri konusunda yaşanan bu küresel paradigma değişiminden en çok etkilenecek ülkeler arasında yer alması kaçınılmazdır. Dolayısıyla ülkemizin bu değişime hem teknolojik olarak hem de mevzuat ve insan kaynağı olarak hazır olması oldukça kritiktir. Ülkemizdeki ihtiyaçlar, mevcut altyapılar ve teknolojik yetkinlikler göz önünde bulundurularak özel sektörümüzün uluslararası rekabetçiliğini sürdürebilmesi için belirlenen yeni nesil yakıt teknolojileri alanlarında, Türkiye için şu öneriler sunulmaktadır:

1. **Yatırımların sürdürülebilirliği için off-take mekanizmaları ve finansman modelleri:**
   Yeni nesil yakıt teknoloji yatırımlarının başarılı olması için, bu yatırımlar sonucu çıkan

ürünlere uzun vadeli bir talep garantisi ve uygun finansman koşulları sağlanması gerekmektedir. Off-take olarak adlandırılan alım garantisi anlaşmaları, özel sektörün bu alandaki risklerini azaltan kilit araçlardandır. Özellikle havacılık ve denizcilik yakıtları gibi yüksek ilk yatırım maliyetleri ve küresel arz-talep dengesizliği bulunan sektörlerde yeni nesil yakıt teknolojilerine yönelik yatırımların geleceği gönüllü piyasaların oluşumundan ziyade uzun süreli alım garantilerine (off-take) bağlıdır. Örneğin, havayolu firmaları bugün için SAF ihtiyaçları gidermek adına biyokütle temelli bir yakıt olan HEFA ve Co-processing ile elde edilmiş yakıtları dikkate alsa da, gelecek yıllarda artan SAF ihtiyacını karşılayabilmek için PtL ve AtJ gibi e-SAF yakıtları da ürün portföyüne eklemek zorunda kalacaktır. Bu noktada ülkemizdeki doğru paydaşlarla kurulacak çok taraflı bir "off-take" yapısı olası bir yatırımının daha hızlı ve sağlıklı bir şekilde olgunlaşmasını sağlayabilir. Arz ve talebin belirsiz olduğu veya birden fazla talep tarafının oluşmadığı durumlarda yeşil hidrojen üretimi için gerekli elektrolizör yatırımlarının ve yüksek maliyetli karbon yakalama ünitelerinin kurulumu için gerekli yatırımların yapılamadığı bilinmektedir. Bu nedenle ülkemizde sentetik yakıt kullanıcısı olabilecek havayolu şirketlerinin ve uçuş sayısı yüksek uluslararası havalimanlarımızın SAF ve e-SAF projeksiyonları yaparak talep yaratması ülkemizdeki yatırımların hızlandırması açısından oldukça kritiktir. Bu kapsamda kamunun da gerekirse alıcı taraf olarak devreye girerek piyasaya güvence sunması değerlendirilmelidir. Ayrıca bir iklim finansman fonu oluşturularak, karbon fiyatlandırması veya AB'nin Sınırda Karbon Düzenlemesi gibi mekanizmalardan gelecek gelirlerin bu fona aktarılması ve yenilikçi projelere sübvansiyon olarak verilmesi sağlanabilir.

2. **Havacılık ve denizcilikte yeni nesil yakıt teknolojilerine Ar-Ge yatırım ve destekler:** Biyoyakıtlara gösterilen ilgi önümüzdeki 10 yıllık süreçte artış eğilimi gösterse de yeterli miktarda biyolojik kökenli ham madde arzı sağlama konusunda yaşanabilecek sorunlar, gıda güvenliği konusundaki çekinceler ve kullanılan girdilerin (atık yağ gibi) lojistiğinde yaşanabilecek zorluklar sonucunda biyoyakıtların orta-uzun vadede pazar payını sentetik yakıtlarla paylaşması beklenmektedir. Avrupa Birliği'nin hazırladığı Refuel EU gibi regülasyonlarla getirilen zorunluluklar da bu beklentiyi doğrular şekilde sentetik yakıtlara geçişi desteklemektedir. Bu noktada gelecekte en fazla talep görmesi beklenen iki yakıt türü sentetik olarak üretilen sürdürülebilir havacılık yakıtları (e-SAF) ve sürdürülebilir denizcilik yakıtları (e-SMF) olacaktır. Bugün için farklı biyo-ham maddelerden elde edilen ara ürünlerin petrol rafinerilerine entegre edilerek jet yakıtı

üretilmesi (Co-processing) gibi seçenekler en hızlı SAF üretim çözümleri olarak kabul edilse de yakın gelecekte bu üretim yönteminin petrokimya süreçlerine entegre halde yürütülmesi nedeniyle özellikle "sürdürülebilir" olarak kabul edilmeme riski oldukça yüksektir. Bu nedenle küresel yapılan yatırımlarında sentetik yakıt üretimine eğilim her geçen gün artmaktadır. Avrupa-Orta Doğu ve Afrika bölgesinde planlanan 32 adet Güçten Sıvıya sentetik e-SAF tesis yatırımına karşın yalnızca 4 adet Co-Processing SAF üretim tesisi yatırım planı olması bu tespiti destekler niteliktedir. Bu noktada henüz ülkemizde e-SAF üretim yöntemlerinden biri olan PtL teknolojisi konusunda açıklanmış bir üretim ve yatırım planlaması bulunmamaktadır. Ancak hem CCUS teknolojilerinin yüksek maliyetleri hem yeşil hidrojene erişimde yaşanan küresel zorluklar bugün için bu gibi sentetik yakıt tesis yatırımlarının önündeki en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla e-SAF gibi gelecek yıllarda yoğun talep görmesi beklenen alternatif yakıtlara geçişi kolaylaştıracak verimli üretim konseptlerinin, fayda/maliyet oranı yüksek iş modeli örneklerinin ve iklim teknolojilerinin hızlı bir şekilde ölçeklenmesi ve uygulanması şarttır. Bu kapsamda, e-yakıt projeleri için fizibilite çalışmalarının yapılması ve bu kapsamda know-how oluşturulması önerilmektedir.

3. **Biyokütle kaynaklı kısıtlamalar ve PtL tabanlı yatırımlar:**
   Günümüzde kullanılan havacılık yakıtının %99'undan fazlası fosil kaynaklıdır ve küresel iklim hedeflerine ulaşmak için havacılık sektörünün karbon emisyonlarının azaltılması kritik önem taşımaktadır. Sivil havacılık sektörü yaklaşık küresel emisyonların %2'lik kısmını oluşturmaktadır.[35] Bu oran görece diğer emisyon kaynağı sektörlere göre düşük görünse de, havacılık hızlı büyüyen bir sektör olduğundan iklim üzerindeki etkisi ilerleyen yıllar boyunca orantısız şekilde artmaktadır. Üstelik uçakların uzun hizmet ömrü (20-30 yıl) ve büyük yolcu uçaklarında batarya veya yakıt hücresi gibi alternatif teknolojilerin yakın vadede uygulanmasında yaşanacak zorluklar, havacılığın "karbon nötr" dönüşümünde sürdürülebilir havacılık yakıtlarını ön plana çıkarmaktadır. IATA sektöre dair 2050 vizyonunda, ihtiyaç duyulan emisyon azaltımının %65'inin SAF kullanımıyla sağlanacağını öngörmektedir.[36] Dolayısıyla SAF, özellikle havacılık otoriteleri tarafından 2016 yılından sonra yapılan projeksiyon çalışmaları ile birlikte havacılığın karbon nötr geleceğinin en temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Türkiye'de de havacılık sektörü oldukça stratejik bir öneme sahiptir. İstanbul Havalimanı gibi küresel bir havalimanına sahip olan ülkemiz, yolcu ve kargo taşımacılığında bölgesel bir lider konumundadır. Türkiye 2053 yılı için net-sıfır emisyon

hedefini benimsediğinden havacılık kaynaklı emisyonların da bu kapsamda azaltılması gerekmektedir. Sürdürülebilir havacılık yakıt kullanımının ülkemiz sınırları içerisinde devreye alınması, hem uluslararası taahhütlerin yerine getirilmesi hem de Türk havacılık sektörünün rekabetçiliğinin korunması açısından kritiktir. Örneğin, ICAO tarafından başlatılan CORSIA programına Türkiye pilot aşamasında katılmıştır ve uluslararası uçuşların emisyonlarını izleyip ilgili otoritelere raporlamaktadır.[37] Küresel politikalar da havacılığın karbon nötr dönüşümünde SAF'ları destekleyici yönde şekillenmektedir. ABD gibi ülkeler SAF üretimini teşvik eden destek programlarını (ör. vergi kredileri) devreye almaktadır. Bununla birlikte Avrupa Birliği'nin 2025'ten itibaren uygulayacağı "ReFuelEU" düzenlemesi ile birlikte Avrupa Birliği havalimanlarından kalkan uçak yakıtlarının belli oranda SAF içermesi ve yakıt tedarikçilerinin SAF harmanlaması zorunlu hale gelmiştir.[38] Bu kapsamda AB havalimanlarına ikmal edilen jet yakıtının en az %2'si SAF olmak zorunda olup bu oran kademeli artarak 2050 yılına kadar %70'e ulaşacaktır. Bu zorunluluklara 2035 yılı itibari ile harmanlamanın belirli bir kısmının sentetik SAF (e-SAF) olması şartı da getirilmiştir. Bununla birlikte yenilenebilir elektrik kaynaklı sentetik kerosenin (e-SAF) 2050 yılında yakıt harmanlamadaki payının %35'e kadar çıkarılması planlanmaktadır. Bu tür küresel politikalar, Türkiye'den Avrupa'ya uçan havayolu firmalarını da kapsayacağından, Türk havacılık sektörü için SAF kullanımını fiilen zorunlu hale gelmektedir. Kısacası, küresel politik eğilim SAF kullanımını hızla yaygınlaştırma yönündedir ve Türkiye'nin bu dönüşüme uyum sağlaması hem çevresel hem ekonomik açıdan faydalı olacaktır. ICAO'nun CORSIA programı 2021 itibariyle başlamış olup, havayolları uluslararası uçuş kaynaklı emisyon artışlarını dengelemek zorundadır; bu mekanizmada SAF kullanımı, daha düşük emisyon katsayısı ile hesaplandığından havayollarının karbon denkleştirme yükünü azaltmaktadır. Henüz Türkiye'de SAF kullanımına dair özel bir yasal teşvik veya zorunluluk olmasa da, Türk Hava Yolları gibi ulusal havayolu şirketlerimiz özellikle Avrupa seferlerinde gönüllü olarak SAF harmanlamaya başlamış ve küresel eğilime uyum sağlama yönünde somut adımlar atmıştır.

Günümüzde ticari ölçekte üretilen SAF'ların büyük kısmı, biyokütle veya atık bazlı ham maddelerden (örn. kullanılmış yemeklik yağ, hayvansal yağ, bitkisel yağ, tarımsal atık vs.) elde edilmektedir. Ancak biyolojik atıklara dayalı ham maddelerin arzı genellikle küresel ölçekte oldukça sınırlıdır. Örneğin, atık yemeklik yağ ve benzeri düşük karbon yoğunluklu atık yağlar hem karayolu ulaşımında kullanılan biyodizel üretiminde hem de

SAF üretiminde kullanıldığından, küresel atık yağ arzı kısa süre içinde bu iki sektörün taleplerini karşılamakta yetersiz kalabilir. Bu durumda, biyoyakıt üreticileri daha bol bulunan ancak tarımsal sürdürülebilirlik tartışmaları olan yağlı tohum (ör. kolza, palm, soya) gibi mahsullere yönelebilir; ancak bu mahsullerde yeni ekim alanları gerektirdiği için gıda sektörü ile rekabete girebilir ve dolaylı arazi kullanımı değişikliği (ILUC) kaynaklı ek emisyonlara yol açabilir. Nitekim IATA'nın belirttiği sürdürülebilirlik kriterlerine göre SAF ham maddesi gıda ekim alanları veya su kaynaklarıyla kesinlikle rekabete girmemelidir ve çevresel tahribata yol açmamalıdır.[39] Bu şartlar altında, yalnızca atıklara ve artık maddelere dayalı atık biyokütle ile küresel SAF üretimini çok büyük ölçeklere çıkarmak oldukça zordur. Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi (ICCT) verilerine göre 2022 yılında ABD'de jet yakıt tüketiminin sadece binde 1'i SAF ile karşılanabilmiştir. Bunun başlıca nedeni sınırlı sürdürülebilir ham madde arzı ve yüksek üretim maliyetleridir.[40] Bu istatistik, günümüzün biyokütle bazlı SAF üretiminin ortaya çıkan talebe kıyasla ne denli küçük kaldığını göstermektedir. Bu noktada Türkiye için de biyokütle tabanlı SAF üretim kapasitesinin küresel arz kısıtları karşısında yetersiz kalacağı göz önüne alındığında, "Power-to-Liquid (PtL) teknolojilerine yatırım yapmak önerilmektedir.

4. **Biyogaz ve biyometan: Emisyon azaltımı ve enerji arz güvenliği için teşvikler ve mevzuat:**

   Derin analiz çalışmasının yapıldığı süre boyunca bazı yeni sıvı biyoyakıt teknolojilerinin sektörel kullanıcılar tarafından yeterli talebi görmediği ve ilgili teknolojinin ticari hazırlık seviyelerinin (CRL) düşük olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, ülkemizde biyometanol üretimi konusunda bir fırsat alanı görülse de bu yakıtın ana kullanıcısı durumundaki ulusal denizcilik sektörünün henüz biyometanol için yeterli talebi göstermediği görülmüştür. Dolayısı ile sıvı biyoyakıtlar konusundaki bu gibi gelişmeler ve ülkemizin doğalgaz'a olan ihtiyacı göz önüne alınarak gaz halindeki biyoyakıtlar derinlemesine araştırılmıştır. Derin analiz çalışmasında ülkemizin biyogaz potansiyelinin yüksek olduğu ve kurulu kapasitenin dünya ortalamasının altında kalarak yetersiz olduğu gözlenmiştir. Bu noktada ülkemizdeki biyogaz tesislerinin sayılarının artabilmesi ve sürdürülebilir şekilde üretim yapabilmeleri için biyogazdan elektrik üretimi ile birlikte bu tesislerin daha yüksek saflıktaki biyometan üretimi için de teşvik edilmesi önerilmektedir.

   Biyogaz üretim süreci organik karbon içeren biyokütlelerin, özel mikroorganizmalarla birlikte oksijensiz ortamda biyolojik olarak parçalanmasına dayanmaktadır. Biyogaz

tesislerinde elde edilen biyometan karbon nötr sayılan nadir enerji kaynaklarındandır. Bu tesisler bir taraftan atıkların kaynağında bertaraf edilerek değerlendirilmesi ve temiz enerjiye dönüştürülmesi sayesinde kontrolsüz metan emisyonlarının önüne geçerek sera gazı etkisinin azaltılmasını sağlarken, diğer taraftan işlem sonucu elde kalan fermente edilmiş çamurun organik gübre olarak tarım sektöründe kullanımı ile çiftçinin daha yüksek karbon ayak izine sahip sentetik mineral gübre kullanımını azaltmaktadır. Tüm bu avantajları biyogaz tesislerini hem karbon emisyonlarını hem de metan emisyonlarını azaltan hibrit bir temiz enerji çözümü olarak ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca güneş ve rüzgar gibi düzensiz üretim profiline sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine 24 saat sürekli çalışabilen biyogaz üretim tesisleri baz yük santrali gibi davranarak elektrik şebekesini dengeleme amaçlı kullanılabilmektedir. 2022 yılı verilerine göre gelişmiş ekonomiler arasında Çin, yaklaşık 100.000'den fazla biyogaz tesisi ile dünyada birinci sırada yer almaktadır. Avrupa 20.000'i aşkın biyogaz tesisi (sadece Almanya'da 9500'den fazla tesis bulunmaktadır), ABD 2251 aktif biyogaz tesisi ve Hindistan 1194 biyogaz tesisi ile Çin'i izlemektedir. Buna karşın 2024 yıl sonu itibari ile ülkemizde kayıtlı toplam 116 biyogaz tesisi bulunmaktadır. Mevcut biyogaz tesislerimiz genellikle YEKDEM kapsamında şebekeye elektrik satarak gelir elde etmektedir. Derin analiz çalışması kapsamında görüşülen biyogaz tesislerinden 2015 yılında ilk kurulanlara verilen YEKDEM desteklerinin 10 yıllık süre sonunda sonlanması nedeniyle üretilen biyogazın elektriğe çevrimi firmalara artık karlılık sağlamamaktadır. Bunun en önemli nedenleri arasında biyogaz tesislerinde kullanılan ithal gaz motorlarının ilk yatırım, bakım ve işletme maliyetlerinin oldukça yüksek olması (yaklaşık 6.5 yıllık çalışma ömrü ve yalnızca 1 motor için toplamda 2.5 Milyon Euro ilk yatırım, bakım ve işletme maliyeti) yer almaktadır. Ortalama bir biyogaz tesisinde standart olarak 3-4 adet gaz motoru olduğu göz önüne alındığında işletme ve kurulum maliyetlerinin motorların işlet süresince kayda değer derecede yüksek olduğu söylenebilir. Buna ek olarak YEKDEM destekleri ile gelen sabit fiyat alım garantisinin (Feed-in Tariff) 10 yıllık geçerlilik süresi sonunda sona ermesi yer almaktadır. YEKDEM desteği içinde firmanın faydalandığı sabit fiyatlarda da 2021 yılı itibari ile değişikliğe gidilmiştir. 2021 öncesi devreye giren tesisler için 10 yıl süreyle 0,133 $/kWh olan alım garantisi, yerli ekipman destekleri ile birlikte yaklaşık 0,148 $/kWh'a kadar çıkabilmektedir. 2021 yılı sonrasında tarifeler TL bazında yeniden belirlenmiştir ve önceki birim fiyatlara göre çok daha düşüktür (2025 itibarıyla yaklaşık 2,5 TL/kWh mertebesindedir). Bu koşullarda, YEKDEM kapsamına

giren eski biyogaz tesisleri için elektrik satışı 10 yıllık süre boyunca oldukça kârlıyken, YEKDEM süresini doldurmuş veya 2021 yılından sonra kurulmuş biyogaz tesisleri için kârlılık neredeyse yarı yarıya azalmıştır. Bu duruma bir de mevcut biyogaz tesislerindeki kojenerasyon sistemlerinde yaşanan enerji kayıpları ve verimsizlikler eklendiğinde (tipik olarak 1 m^3 biyogazın ısıl enerjisi 6 kWh olsa da kayıplarla üretilen elektrik 2,7 kWh civarında kalmaktadır) dönüşüm ihtiyacının acil olduğu çıkarımı rahatlıkla yapılabilir. Dolayısıyla ülkemizdeki biyogaz tesis yatırımlarının gelecekte bu kritik faktörler dikkate alınarak yapılacağı düşünüldüğünde biyogaz yatırımlarını hızlandırıcı yeni mevzuat düzenlemeleri, devlet teşvikleri ve yeni iş modellerine ihtiyaç duyulduğu açıktır. Ülkemizde kurulan biyogaz tesislerinin devamlılıklarını sağlayabilmeleri için zamanla yeni nesil teknolojilere geçiş yapması gerekmektedir. Özellikle üretilen yüksek saflıktaki biyometanın doğalgaz şebekesine beslenmesi veya biyogaz tesisine yakın lokasyonlardaki endüstriyel tesislere yakıt olarak verilmesi gibi seçenekler biyogaz tesisleri için karlılığı elektrik satışından daha yüksek seçenekler olarak öne çıkmaktadır.

5. **Metan azaltımı:**

   Sera gazlarının iklim üzerindeki etkisini atmosferde kalma süreleri ve kızılötesi radyasyonu emme yetenekleri olmak üzere iki temel özellik belirlemektedir. Yaklaşık 12 yıl atmosferde kalabilen metana göre yüzlerce yıl boyunca atmosferde birikerek kalabilen karbondioksit, iklim değişikliğine uzun vadeli katkısı en fazla olan sera gazıdır. Bununla birlikte iklim krizi ile mücadelede tüm dünya karbon emisyonlarının uzun vadeli yıkıcı etkilerine ve yarattığı olumsuz sonuçlara odaklanmışken, dünyamızın daha hızlı ısınmasına neden olan ve etkilerini daha kısa sürede hissettiğimiz metan emisyonlarının küresel ısınma konusunda karbondioksitten 80 kat daha tehlikeli olduğu gerçeği (20 yıllık bir zaman çizelgesinde) dikkatlerden kaçmaktadır.[41] Karbondioksit emisyonlarını 2050 yılına kadar net sıfıra indirmek ve küresel sıcaklık artışını 1.5 ° C ile sınırlamak için yapılan tüm girişimler ve verilen küresel taahhütler kısa vadede hedeflenen noktaya ulaşmamız için tek başına yetersiz kalmakta ve yapılan gelecek projeksiyonlarında metan emisyonlarının da hesaba katılması gerekmektedir. Bu noktada karbon ve metan emisyonlarının birlikte ele alınması hem küresel ısınmayı hızlı yavaşlatma hem de iklim istikrarına daha erken katkıda bulunma açısından oldukça önemlidir. Küresel metan emisyonları 2006 yılından bu yana hızla artarak 2019 yılında rekor seviyelere çıkmış ve 2023 yılında bugüne kadar bilinen en yüksek değer olan 580 Milyon tona

ulaşmıştır (Tek başına enerji sektörünün metan emisyonu 130 Milyon ton). Doğal yollar ve insan kaynaklı (antropojenik) faaliyetler olmak üzere iki şekilde açığa çıkan metan emisyonunda yaşanan bu artış, 2021 yılında başlayan "Küresel Metan Taahhüdü (GMP)" global girişimi ile birlikte (2030 yılına kadar en az %30 ortak metan azaltım hedefi) ülkelerin durumun ciddiyetini anlamasına ve emisyonlarını ortak azaltım yoluna gitmesine neden olmuştur. Petrol ve doğalgaz arama faaliyetleri (kuyu açma ve yeni sondajlar, izolasyonu yetersiz eski kuyulardan kaçaklar), tarımsal faaliyetler, biyokütle ve çöp yakma gibi kontrolsüz faaliyetler sonucu oluşan antropojenik metan emisyonları, küresel metan emisyonlarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır.[42] Fosil yakıt arama sırasında ortaya çıkan metan emisyonlarının izlenmesi ve tespitinde yaşanan zorluklar, sızdırmaz ekipmanların yüksek maliyetleri ve önleyici yasal düzenlemelerin eksikliği bu gibi antropojenik metan emisyonlarını engellenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla insan kaynaklı metan emisyonlarının önüne en hızlı şekilde geçebilmek için dünya genelinde sürdürülen tarımsal faaliyetlerden ve çöp yakma faaliyetlerinden kaynaklı metan salımlarına yoğunlaşacak şekilde yeni teknolojileri kullanarak bu emisyon kaynaklarının sistematik biçimde kontrol altına alınma oldukça kritiktir. Özellikle de atık yönetimi (kompostlama ve biyogaz üretimi) ve gübre yönetiminde yapılacak her türlü küresel iyileştirme hem doğrudan hem de dolaylı olarak metan emisyonlarının azaltılmasında etkili olmaktadır.

6. **Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlasının güncellenmesi:**
   Mevcut BEPA (Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası) verileri, çoğunlukla tarımsal ve hayvansal atıklara odaklanmaktadır. Kullanılmış bitkisel yağlar (UCO) ve endüstriyel yan akışları gibi biyokütle kaynaklarının atlasa eklenmesi faydalı olacaktır. Atlasın güncel saha ölçümleri, uydu verileri, güncel raporlar ve çiftçi verileri gibi kaynaklarla sürekli revize edilmesi, ayrıca UCO ve diğer atık fraksiyonlarının kantitatif verilerinin bu atlasa eklenmesi önerilmektedir. Böylece; biyogaz, biyometan ve biyodizel gibi yeni nesil yakıt yatırımları için sağlıklı kapasite planlaması yapılabilecektir.

7. **UCO toplanmasına yönelik sistemler :**
   Asya ülkelerinden Güney Kore ve Japonya ile Kuzey Amerika'da Kanada gibi ülkelerin UCO toplama kapasiteleri, kişi başı bitkisel yağ tüketimlerine oranla oldukça yüksek iken, bitkisel yağ tüketiminde ilk sıralarda yer alan Brezilya ve Arjantin gibi ülkelerde ise bu oran oldukça düşüktür.[43] Ülkemizde de Japonya'ya kıyasla kişi başı bitkisel yağ

tüketimi fazla olmasına rağmen UCO toplama oranlarının Japonya'dan büyük oranda düşük olduğu gözlemlenmiştir. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Atık İstatistikleri 2022 verilerine göre atık yönetim uygulamasına beyan edilen 21.113 ton bitkisel atık yağ bulunmaktadır. Ancak ülkemizde yıllık ortalama 150.000 ton kullanılmış yemeklik yağ oluştuğu tahmin edilmektedir.[44] Gerçek UCO kapasitesinin tamamen kullanılabilmesi ve toplanan UCO'nun doğru bir şekilde yönetilebilmesi için UCO takibi ve toplama konusunda yeni ve inovatif çözümlerin çalışılması önerilmektedir.

8. **Yeni nesil yakıt teknolojilerinin kritik alt bileşenlerinden olan katalizör ve membran-PSA sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar:**
   Yeni nesil yakıt üretim süreçlerinin verimliliği ve ticari ölçeklenebilirliği, reaksiyon hızını, ayırma verimini ve enerji tüketimini doğrudan etkileyen kritik bileşenlerin (Fischer-Tropsch, Sabatier veya PtL sentez katalizörleri; su elektrolizi membranları; CO_2 ayırımı için PSA üniteleri gibi) tedarik ve Ar-Ge maliyetlerine bağlıdır. Uluslararası rakipler, bu bileşenlerin yerli üretimini ve iyileştirilmesini stratejik öncelik olarak belirlemiş, Ar-Ge teşvikleri, endüstriyel demonstrasyon projeleri ve fikri mülkiyet desteğiyle süreci hızlandırmıştır. Türkiye'de de bu kritik teknolojilere yönelik tedarik zincirini çeşitlendirecek, yerli imalatı teşvik edecek ve araştırma altyapılarını güçlendirecek programlar oluşturulmalıdır.

9. **Noktasal kaynaklardan yerinde (on-site) karbon kullanımı senaryoları:**
   Ülkemizde uygun karbon depolama alanları ile ilgili emre amade kapasitenin yetersizliği ve potansiyel kapasitenin henüz tespit edilememiş olması noktasal kaynaklardan yakalanacak CO_2'nin en azından bir kısmının yerinde kullanım (on-site utilisation) senaryolarını en hızlı uygulanabilir seçenek olarak ön plana çıkarmaktadır. Özellikle karbon emisyonlarını değerlendirmek ve katma değerli ürünlere çevirmek isteyen bazı sektörler için yakalanacak CO_2'nin SAF, metanol ve etanol gibi yüksek katma değerli kimyasallara çevrilmesi özel sektörün CCUS teknolojilerine geçiş maliyetlerinin bir kısmını sübvanse edeceği için ekonomik açıdan anlamlı olacaktır. Özellikle e-SAF üretimi konusunda önerilen güdümlü projenin gelecekte ölçeklenmesi konusunda yapılacak ek çalışmalarda noktasal karbon kaynağı olarak yüksek karbon konsantrasyonuna sahip ve karbon yakalama maliyetlerini en aza indirecek sektörlerin (örneğin; jeotermal enerji tesislerinin emisyonları) öncelikli olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

10. Türkiye'nin 2053 karbon nötr hedefi ve AB politikalarına uyum için mevzuat ve düzenlemeler:

Türkiye'nin 2023'te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne sunduğu Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı kapsamında taahhütlerin fiilen gerçekleşmesini sağlamak için; sektörel yol haritaları önceliklendirilerek hazırlanmalı, bu yol haritaları kapsamında kısa (2030), orta (2040) ve uzun vadeli (2053) öncelikler tanımlanmalı, sorumlu kurum ve paydaşlar netleştirilip izleme-raporlama mekanizmaları kurulmalı ve yatırım ile finansman ihtiyaçları kapsamlı biçimde tespit edilerek, kamu-özel ortaklıkları ve iklim finansmanı araçlarıyla desteklenmelidir.

6.

Sonuç

Son on yılda yeni nesil yakıt teknolojileri alanında kaydedilen gelişmeler kayda değer olmakla birlikte, bu raporda incelenen karbonsuzlaştırılması güç sektörlerde gözlenen dönüşümün ivmesi, Türkiye'nin 2053 net-sıfır emisyon hedefine ulaşmak için daha çok çaba gerektirmektedir. Havacılıkta sürdürülebilir havacılık yakıtı, denizcilikte biyometanol-amonyak ve sanayide biyometan gibi yeni nesil yakıt çözümleri, emisyon yoğunluğunu azaltma konusunda başarılı sonuçlar sağlamaktadır. Ancak söz konusu sektörlerin 2050'ye dek büyümeye devam edeceği öngörüldüğünden, emisyon yoğunluğundaki düşüşün çok daha hızlı bir şekilde ivmelendirilmesi gerekmektedir. Bu ivmeyi sağlayacak yatırımların ölçeği, mevcut koşullarda özel sektörün tek başına üstlenebileceği düzeyin üzerindedir. Bu nedenle, uzun vadeli off-take anlaşmaları, etkin karbon fiyatlandırma mekanizmaları ve vergisel teşvikler devreye alınmadıkça sermaye maliyetlerinin sürdürülebilir bir seviyeye inmesi beklenmemelidir.

Dönüşümün finansal boyutuna ek olarak, değer zincirinin tamamında güçlü ve kurumsal bir iş birliğinin yaratılması kritiktir. Biyolojik kökenli ham madde tedarikçilerinden havalimanlarına, rafinerilerden şebeke işletmecilerine uzanan paydaş ekosistemi eşgüdüm içinde hareket etmediği takdirde, mevcut ulusal teknoloji hazırlık seviyeleriyle net-sıfır emisyon kapsamında hedeflere ulaşmak güçleşecektir. Bu nedenle; jeotermal ve demir-

çelik tesisleri gibi noktasal CO_2 kaynaklarını, biyogaz altyapısındaki metan potansiyelini ve hızla artan güneş-rüzgar kapasitesini entegre eden, yerinde kullanım odaklı öncü Power-to-Liquid (PtL) ve Power-to-Gas (PtG) projelerinin ivedilikle hayata geçirilmesi önerilmektedir. Söz konusu demonstrasyon projeleri, hem teknoloji risklerini saha verileriyle azaltacak hem de pazarın öğrenme eğrisini kısaltarak ölçek ekonomilerine geçişi hızlandıracaktır.

Önümüzdeki on yıl, uzun vadeli emisyon hedeflerine ulaşma açısından belirleyici olacaktır. Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi'nin (ETS) işletime alınması, Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) ile uyumlu ticaret düzenlemeleri ve katalizör-membran-PSA gibi kritik bileşenlerde yerli Ar-Ge'nin sistemli biçimde teşvik edilmesi; Türkiye'nin yeni nesil yakıt ekosistemini küresel piyasa dalgalanmalarına karşı dayanıklı kılabileceği öngörülmektedir. Bu kapsamda TTGV'nin Öncül Proje Yatırım Programı bünyesindeki Güdümlü Projeler'in, söz konusu çok-paydaşlı dönüşüm seferberliğinin katalizörü işlevini üstleneceği değerlendirilmektedir. 2025 sonrası dönemde atılacak kararlı ve koordine adımlar, güçlü uzun vadeli hedefleri somut ve ölçülebilir ilerleme ile destekleyerek Türkiye'nin bölgesel ölçekte bir temiz yakıt üssü hâline gelebilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. Transparency Market Research. (2023, March 3). *Power-to-Liquid Market (Source: Wind and Solar; Synthesis: Fischer– Tropsch, Methanol, and Others) – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2023– 2031*. Transparency Market Research. https://www.transparencymarketresearch.com/power-to-liquid-market.html
2. Market.us. (n.d.). *Alcohol to Jet (AtJ) Market.* Retrieved March 28, 2025, https://market.us/report/alcohol-to-jet-atj-market/
3. Argus Media. (t.y.). Spotlight on European SAF market: Countdown to 2025. Argus Media.
4. TTCL Public Company Limited. (2024). *TTCL, Honeywell and DB Tarımsal Enerji collaborate to develop sustainable aviation fuel production facility in Turkey.* Company Activities.
5. TotalEnergies. (2023). *TotalEnergies partners with Ronesans Holding to develop renewable energy in Türkiye.* Basın bulteni.
6. BNEF. (2024). *Scaling Up Hydrogen: The Case for LowCarbon Steel.*BloombergNEF.
7. IRENA. (2024). *Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables: Perspectives for the G7*
8. IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook*. International Renewable Energy Agency.
   IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change
9. BNEF. (2023). *Electric Vehicle Outlook 2023*. BloombergNEF.
10. International Energy Agency. (2023). *Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach* (2023 update). International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach
11. International Renewable Energy Agency. (n.d.). *Bioenergy & biofuels*. IRENA. Retrieved April 4, 2025, from https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels
12. IEA. (2023). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency
13. Speight, J. (2008). Synthetic fuels handbook: properties, process and performance.
14. Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Mehlmer, N., Lercher, J., Awad, D., & Bruck, T. (2023). The potential of biofuels from first to fourth generation. *PLOS Biology, 21*(3), e3002063. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002063
15. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Biyokutle*. Retrieved April 4, 2025, from https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle
16. Neste Corporation. How much renewable diesel does Neste produce annually and how much can it contribute to the reduction of emissions? In *Frequently asked questions about Neste MY Renewable Diesel*. Retrieved May 4, 2025, from https://www.neste.be/en/neste-my-renewable-diesel-be/product-information/frequently-asked-questions
17. Khalid, U. (2024). COMMODITIES 2025: European renewable diesel market bullish on regulatory support and rising demand. *Hellenic Shipping News Worldwide*. Retrieved April 4, 2025, from https://www.hellenicshippingnews.com/commodities-2025-european-renewable-diesel-market-bullish-on-regulatory-support-and-rising-demand/
18. Danso-Boateng, E., & Achaw, O.-W. (2022). Bioenergy and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technologies, a review. *AIMS Energy, 10*(4), 585–647. https://doi.org/10.3934/energy.2022030
19. Green Car Congress. (2015, December 13). IH2 biomass to drop-in fuels technology demonstration plant to be built in India. *Green Car Congress*. Retrieved May 4, 2025, from https://www.greencarcongress.com/2015/12/20151213-ih2.html
20. IEA Bioenergy. (2023). *Gasification for multiple purposes*. In *Bioenergy Review 2023*. Retrieved May 4, 2025, from https://www.ieabioenergyreview.org/gasification-for-multiple-purposes/
21. IEA Bioenergy, Task 44 Flexible Bioenergy and System Integration. (2025, April). *Technologies for flexible bioenergy (Updated).* IEA Bioenergy. https://task44.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/12/2025/04/IEAB-Task-44_2025_-Report-Technologies-for-Flexible-Bioenergy-Update.pdf
22. Li, S., Jiang, Y., Seiple, T., Snowden-Swan, L., Ou, L., Cai, H., Thorson, M., Spry, B., Schmidt, A., Kilgore, U., Diaz, E.,Santosa, M., Wang, H., Hart, T., Fox, S., Cronin, D., Fonoll Almansa, X., Norton, J., Gibby, R., & Gibby, B. (2024, December). Site-specific design case study for wet waste hydrothermal liquefaction and biocrude upgrading to hydrocarbon fuels (Report No. PNNL-37046). Pacific Northwest National Laboratory. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-37046.pdf

23. IEA Bioenergy Task 39 (2020): Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction. IEA Bioenergy, Paris, February 2020.
24. European Commission. (2023). *Biomethane*. Retrieved May 4, 2025, from https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomethane_en
25. De Fraiture, C., & Berndes, G. (2009). Biofuels and water. In R. W. Howarth & S. Bringezu (Eds.), *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use* (pp. 139–153). Cornell University. https://ecommons.cornell.edu/bitstreams/83f6cb07-8576-42a4-beaf-ccecfab94c88/download
26. Umweltbundesamt. (2022). *Power-to-Liquids – Perspectives and applications: Background paper for e-fuels in aviation*. German Environment Agency. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/background_paper_power-to-liquids_aviation_2022.pdf
27. Argus Media. (2024). *Argus sustainable aviation fuel (SAF) capacity map 2025* (V1.4). https://view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/PRO-Map-Argus-SAF-Capacity-Map-2025.pdf
28. European Commission. (2023, March 16). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the European Hydrogen Bank (COM(2023) 156 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0156
29. Ricardo Energy & Environment. (2024). Hydrogen imports into the EU: Infrastructure needs and policy options. Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202402_Ricardo_H2_imports_final.pdf
30. Carbon Recycling International. (n.d.). *George Olah plant*. https://carbonrecycling.com/projects/george-olah
31. Hochman, G., Goldman, A. S., Felder, F. A., Mayer, J. M., Miller, A. J. M., Holland, P. L., Goldman, L. A., Manocha, P., Song, Z., & Aleti, S. (2020). Potential economic feasibility of direct electrochemical nitrogen reduction as a route to ammonia. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(24), 8938–8948. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01206
32. Lorentz, B., Truby, J., & Tuff, G. (2024, November 8). *Low-carbon fuels: The last mile to net zero: The role of synthetic fuels in decarbonizing the skies and the seas*. Deloitte Global. https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/low-carbon-fuels.html
33. Argus Media. (2024, October). *SAF pricing and trends: AOM as price discovery tool*. Argus Media. https://www.argusmedia.com/
34. IEA (2023), *The Role of E-fuels in Decarbonising Transport*, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport
35. Ritchie, H., & Roser, M. (t.y.). Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector https://ourworldindata.org/emissions-by-sector
36. International Air Transport Association [IATA]. (t.y.). Sustainable aviation fuels. https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/
37. European Business Aviation Association [EBAA]. (t.y.). Is SAF implemented in the legislation of Turkey? https://www.ebaa.org/industry-updates/is-saf-implemented-in-the-legislation-of-turkey/
38. European Union Aviation Safety Agency [EASA]. (t.y.). SAF policy actions. https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/sustainable-aviation-fuels/saf-policy-actions
39. International Air Transport Association [IATA]. (t.y.). Fact sheet on climate change.
40 Sustainable Aviation Futures. (t.y.). CCAF: Hassan Elhoujeiri [SAF Spotlight]. https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/ccaf-hassanelhoujeiri
41. International Energy Agency [IEA]. (2024). Global methane tracker 2024: Understanding methane emissions. https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024/understanding-methane-emissions#abstract
42. Global Carbon Project. (2024). Methane budget 2024: Media highlights. https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/24/files/MethaneBudget2024_MediaHighlights.pdf
43. GlobalData Plc. (2023, Ağustos). Global supply and trade of used cooking oil: UCO supply outlook. GlobalData Intelligence Center. https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/GlobalData_UCO-Supply-Outlook_Sep2023.pdf
44. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü.(2023). Atık istatistikleri bülteni 2021. https://ced.csb.gov.tr/atik-istatistikleri-bultenleri-i-109405

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI

KARBONSUZLAŞTIRILMASI ZOR SEKTÖRLERDE YENİ NESİL YAKIT TEKNOLOJİLERİ

DERİN ANALİZ RAPORU **ÖZET**

TÜRKİYE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VAKFI

ttgv.org.tr

TTGV Merkez
Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent
Ankara
0312 265 02 72

TTGV İstanbul Temsilciliği
İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Arı Teknokent
Arı II Binası Koruyolu A Blok Kat:7
Maslak-Sarıyer
0212 276 75 60

İletişim için:
info@ttgv.org.tr

#TeknolojiÜretenTürkiye
#İklimÖncüsü

TTGV ÖNCÜL PROJE PROGRAMI #İklimÖncüsü