

HİBRİT ELEKTRON IŞINI REAKTÖRLERİ İLE CO₂ DÖNÜŞÜMÜ

Elektron Demeti · Plazma · Katalizör Kombinasyonunda Küresel Araştırma Durumu

Bu yazı YZ yardımıyla bir dizi taslak sonu hazırlanmıştır.

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr. Fizik Y.Müh. ybatakan4@gmail.com /I/

Akademik Durum Raporu 25 Şubat 2026

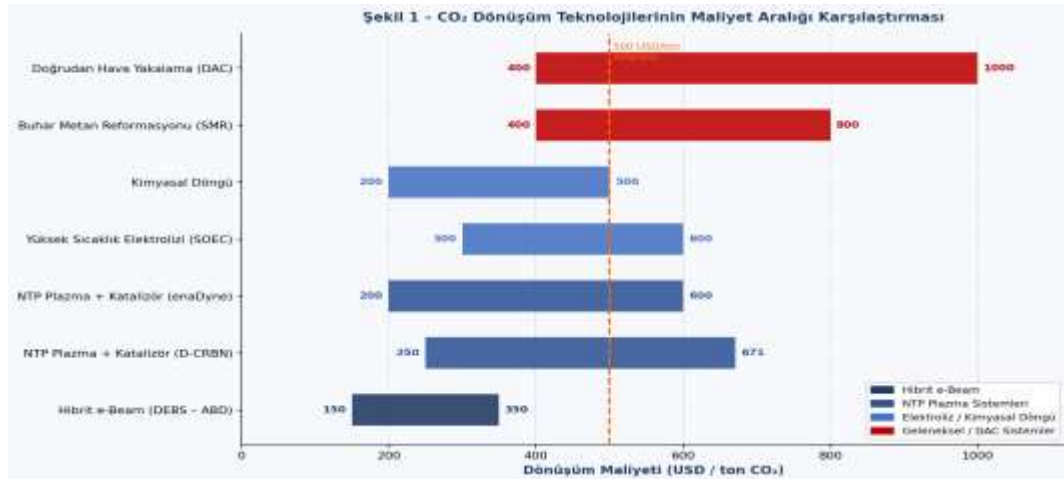
ÖZET

Bu rapor, CO₂ gazının değerli kimyasallara (CO, metanol, asetik asit) dönüştürülmesine yönelik olarak geliştirilen Hibrit Elektron Işını Reaktörü (Hybrid e-Beam Reactor) teknolojisinin dünya genelindeki güncel araştırma ve pilot proje durumunu ele almaktadır. Başta ABD'deki Direct E-Beam Synthesis (DEBS) projesi ve Avrupa'daki elektron enerjisi-plazma-katalizör kombinasyonlu sistemler olmak üzere, bu alandaki temel girişimler ve teknolojik bulgular değerlendirilmektedir. Söz konusu teknolojiler, geleneksel termal katalitik süreçlerin yerine düşük sıcaklık ve basınçta çalışarak karbon döngüsü ekonomisi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

1. GİRİŞ VE TEKNOLOJİNİN TEMELLERİ

Önce Hibrit Elektron Işını Ne Demek?

Hibrit Elektron Işını Reaktörü"deyimindeki hibrit terimi, elektronların kendisine değil sistemin bileşenlerine atıfta bulunmaktadır. Söz konusu hibritlik; Elektron Demeti (e-Beam) + Plazma + Katalizör olmak üzere üç farklı fiziksel ve kimyasal mekanizmanın tek bir reaktör mimarisinde bir araya getirilmesinden kaynaklanmaktadır. Elektronlar, tek bir hızlandırıcıdan belirli ve sabit bir enerji aralığında (0,5–3 MeV) üretilir; yani farklı enerjilerde karma bir demet söz konusu değildir. **Elektron demeti CO₂ gazına çarptığında hem moleküler bağları doğrudan kıran ajan hem de plazma üreten kaynak olarak çift işlev üstlenir. Katalizör ise bu ortamda oluşan reaktif parçacıkları (serbest radikaller, uyarılmış moleküller) yakalayarak istenilen ürüne (CO, metanol, asetik asit) yönlendirir.** Bu nedenle teknik yazında söz konusu sistemler hibrit yerine zaman zaman "eşleşik" (coupled) veya "tümleşik elektron ışını-plazma-kataliz" (integrated e-beam plasma catalysis) olarak da adlandırılmaktadır.



CO₂ emisyonlarının azaltılması ve yakalanan karbon dioksitin değerli kimyasallara dönüştürülmesi (Carbon Capture and Utilization – CCU), iklim değişikliğiyle savaşımında belirleyici bir strateji durumuna gelmiştir. Geleneksel termokatalitik yöntemler, CO₂'nin yüksek kimyasal kararlılığı (C–O bağ ayrışma enerjisi ~532 kJ/mol) nedeniyle 700–1.300 °C sıcaklık ve yüksek basınç gerektirmekte; bu durum hem enerji maliyetlerini hem de sera gazı ayak izini olumsuz etkilemektedir.

Hibrit Elektron Işını (e-Beam) Reaktörü kavramı; yüksek enerjili elektron demetinin CO₂ moleküllerini doğrudan kimyasal bağ düzeyinde etkinleştirmesi, plazma ortamının reaktif ara ürünler (serbest radikaller, uyarılmış moleküller, iyonlar) üretmesi ve katalizörün ürün seçiciliğini artırmasından oluşan üçlü bir sinerjiye dayanmaktadır. Bu yöntemde elektron çarpışması yoluyla gerçekleşen etkinleştirme, termal denge dışı koşullarda (ortam sıcaklığı, atmosferik basınç) mümkün olabilmekte; dolayısıyla enerji verimliliği açısından geleneksel yöntemlere kıyasla önemli üstünlükler sağlamaktadır (Bogaerts ve ark., 2020; Fridman, 2008).

Plazma kimyası yazınında ısı olmayan plazma (Non-Thermal Plasma – NTP) ile tümleşik katalizör sistemleri büyük ilgi görmektedir. Dielektrik Bariyer Deşarjı (DBD), mikrodalga plazma ve kayma arkı gibi plazma türleri arasında, yüksek enerjili elektron demetinin bizzat plazma üretici olarak kullanıldığı Electron Beam Induced Plasma sistemleri, hem enerji yoğunluğu hem de ölçeklendirme potansiyeli açısından öne çıkan bir alt kategori oluşturmaktadır.

2. ABD GİRİŞİMLERİ: DIRECT E-BEAM SYNTHESIS (DEBS) PROJESİ

2.1 Projenin Kapsamı ve Ortakları

ABD Enerji Bakanlığı (DOE) ve Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı (NETL) finansmanı ile yürütülen Direct E-Beam Synthesis (DEBS) projesi, Gas Technology Institute (GTI Energy) liderliğinde ve ABD Deniz Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (NRL) ortaklığında geliştirilmektedir. Projenin temel referans numarası DE-FE0029787'dir (NETL, 2022).

DEBS sürecinin temel savı; kömür yakıtlı santrallerden yakalanan saf CO₂ ile doğal gazın (metan), yüksek enerjili elektron demeti yardımıyla katalizör kullanılmaksızın ve tek aşamada CO, metanol ve asetik asite dönüştürülebileceğidir. Bu süreç yaklaşık 25–75 psia basınç ve 20–100 °C sıcaklık aralığında çalışmakta; çok adımlı ve pahalı kataliz proseslerine gerek duymamaktadır.

2.2 Teknik ve Ekonomik Bulgular

NRL'deki pilot ölçekli e-Beam reaktöründe yürütülen deneyler, kuru reformlama reaksiyonunda (CO₂ + CH₄ → CO + H₂) 1:1 oranında sentez gazı üretimini doğrulamıştır. Molekül başına enerji maliyeti yaklaşık 5,2 eV/molekül olarak hesaplanmış; bu değer, geleneksel termokatalitik dönüşümle örtüşmektedir. Bununla birlikte DEBS'in belirleyici üstünlüğü, söz konusu performansın yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmeden elde edilmesidir (OSTI, 2022).

99,4 MMSCFD kapasiteli sentetik gaz üretim tesisi için yapılan Tekno-Ekonomik Analizde (TEA), toplam harcama maliyeti (TASC) 242,5 milyon USD olarak hesaplanmış; sentez gazının seviyelendirilmiş maliyeti (LCOS), 6,24 USD/MMBTU doğal gaz fiyatında yaklaşık 175,84 USD/ton olarak elde edilmiştir. Yaşam döngüsü analizi (LCA) sonuçları, DEBS'in

Buhar Metan Reformasyonuna (SMR) kıyasla küresel ısınma potansiyelini %61,9 oranında azalttığını ortaya koymaktadır (GTI Energy, 2024).

Radyasyon kimyası ilkeleri açısından değerlendirildiğinde, elektron ışını yüksek dozlu ışınlama koşullarında (≥ 100 kGy/s) CO₂'den eş zamanlı olarak H₂, CO, CH₄, C₂H₆ ile organik asitleri (formik asit, asetik asit, propiyonik asit) metal içermeyen ve tek adımlı biçimde üretebilmektedir. Bu yöntemde enerji geri kazanım oranı (REE), geleneksel CO₂ gaz radyolizine kıyasla yaklaşık 15 kat artış sergilemektedir (Green Chemistry, RSC, 2019).

3. AVRUPA'DAKİ GELİŞMELER

3.1 IBA (Ion Beam Applications) ve Çevresel Uygulamalar

Belçika merkezli IBA (Ion Beam Applications S.A.), parçacık hızlandırıcı teknolojisinde dünya lideri konumundadır. Öncelikli faaliyet alanları proton terapisi, radyofarmasötikler ve endüstriyel sterilizasyon olan şirket; Discovery Lab bünyesinde elektron ışını teknolojisinin çevresel uygulamalarına yönelik Ar-Ge kapasitesini artırmaktadır. IBA'nın 2024 yıllık raporuna göre şirket, PFAS, dioksinler ve CO₂ gibi kalıcı kirleticilerin elektron ışını yoluyla parçalanmasına odaklanan ölçeklenebilir çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir (IBA Sustainable Solutions Match, 2025).

IBA'nın Rhodotron® ve be-Efficient platformları gibi endüstriyel ölçekli e-Beam hızlandırıcı altyapısı, CO₂ dönüşüm araştırmalarına kapı aralamaktadır. Avrupa Birliği'nin net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda kamu-özel Ar-Ge finansmanı bu alanda genişlemektedir. Şirket, Wallonie Entreprendre International ile gerçekleştirdiği ortak yatırımlarla güç yarı iletkenleri alanındaki girişimlere de destek vermekte; bu adım, e-Beam sistemlerindeki elektrik enerjisi verimliliğine yönelik uzun vadeli ilgiyi yansıtmaktadır.

3.2 Elektron Enerjisi · Plazma · Katalizör Kombinasyonu: Avrupa Pilot Çalışmaları

Avrupa'da Electron Beam Induced Plasma sistemleri veya daha geniş çerçevede ısı olmayan plazma-katalizör kombinasyonları kapsamındaki deneysel çalışmalar; Gent Üniversitesi, Antwerp Üniversitesi (Prof. Annemie Bogaerts liderliğindeki PLASMANT grubu) ve Liverpool Üniversitesi öncülüğünde yürütülmektedir. EPS Plazma Fiziği Bölümü 2023 Yenilik Ödülü, plazma tabanlı CO₂ dönüşümünü laboratuvarından endüstriye taşıyan çalışmaları nedeniyle Prof. Bogaerts ve D-CRBN girişiminin CTO'su Dr. Georgi Trenchev'e verilmiştir (EPS Plasma Division, 2023).

Liverpool Üniversitesi'nden Prof. Xin Tu liderliğindeki ekip, 2024 yılında ortam koşullarında (35 °C, 0,1 MPa) bimetallik Ni-Co katalizörlü NTP reaktöründe %46 tek geçiş metanol seçiciliği ve %24 CO₂ dönüşümü elde etmiştir. Bu çalışmada plazma-katalizör sinerji mekanizması; elektron çarpışması ile CO₂ etkinleştirilmesi, ardından bimetallik yüzeyde asimetrik CO₂ adsorpsiyonu ve ürün yolu düzenlemesi olarak tanımlanmaktadır (Chem, Elsevier, 2024). Bu sistem, Elektron Enerjisi → Plazma → Katalizör zincirinin laboratuvar ölçeğindeki somut bir göstergesidir.

Avrupa'daki pilot proje tablosu farklı plazma türleri üzerinden şekillenmektedir. DBD reaktörleri %40'a varan CO₂ dönüşümü ile metanol ve sentez gazı üretimini göstermiş; mikrodalga plazma sistemleri düşük basınçta %90'a ulaşan CO₂ → CO dönüşümü sağlamıştır. Kayma Arkı reaktörlerinde plazma sonrası katalizör bütünleştirilmesi enerji verimliliğini belirgin biçimde artırmış; nanosaniye tekrarlayan atımlı deşarj (NRP) sistemleri 12 bar'a kadar yüksek basınçlarda %14 dönüşüm ve %23 enerji verimliliğine ulaşmıştır (Energy & Environmental Science, RSC, 2024; Frontiers in Energy Research, 2020).

Enerji verimliliği değerlendirmesinde (2024 RSC analizi), plazma tabanlı CO üretiminin 500 USD/ton sınırının altına düşürülebileceği öngörülmekte; bu değer, elektroliz seçeneğiyle rekabetçi bulunmaktadır. Başlangıç maliyeti yüksek olsa da plazma sistemleri, yenilenebilir enerjinin anlık açılıp kapanabilmesi ve modüler üretim esnekliği açısından öne çıkmaktadır.

4. ENERJİ GEREKSİNİMİ, MALİYET ANALİZİ VE TEKNOLOJİ KARŞILAŞTIRMASI

4.1 CO₂ Ayrıştırmanın Termodinamik Temeli

CO₂'nin C–O kimyasal bağlarının kırılması termodinamik açıdan son derece enerji yoğun bir süreçtir. CO₂'nin tamamen C + O₂ elementlerine ayrıştırılması için standart serbest enerji değişimi yaklaşık +394 kJ/mol olup bu değer 1 ton CO₂ başına teorik minimum 2.450 kWh/ton elektrik enerjisine karşılık gelmektedir. CO₂'nin CO ve ½O₂'ye kısmi ayrışması (karbonmonoksit yolu) için ise teorik eşik ~283 kJ/mol, yani yaklaşık 1.760 kWh/ton CO₂'dir (NIST Webbook, 2024).

Pratik sistemlerde enerji verimliliği (EE) tanımı olarak tüketilen elektrik enerjisinin CO₂ dönüşümünde kullanılan payı esas alınmakta; bu değer mevcut teknolojilerde %5 ile %80 arasında geniş bir yelpazede yer almaktadır. Sistem mimarisi, basınç, akış hızı ve katalizör seçimi bu verimi doğrudan belirlemektedir.

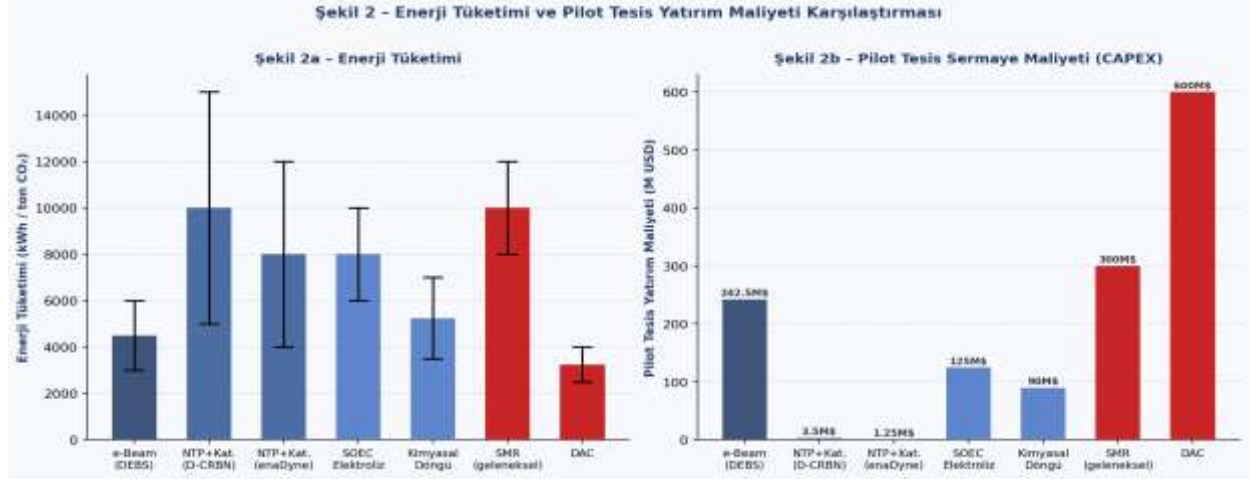
4.2 Teknoloji Bazında Enerji Tüketimi ve USD Maliyet Karşılaştırması

Aşağıdaki tabloda farklı CO₂ dönüşüm teknolojilerinin enerji yoğunluğu, tesis yatırım maliyeti (CAPEX) ve 1 ton CO₂ başına dönüşüm maliyeti USD cinsinden karşılaştırılmaktadır. Yatırım rakamları pilot/gösterim ölçeği için verilmiş olup tam ticari ölçekte 5–10 kat artış beklenmektedir. Maliyetler 0,03–0,06 USD/kWh yenilenebilir elektrik fiyatı varsayımına dayanmaktadır (RSC Energy & Environmental Science, 2024; GTI Energy/NETL, 2022):

Teknoloji	Enerji Tüketimi (kWh/ton CO ₂)	Dönüşüm Maliyeti (USD/ton CO ₂)	Pilot Tesis CAPEX (milyon USD)	Dönüşüm Verimi (%)
Hibrit e-Beam + Plazma (DEBS – ABD)	3.000–6.000	150–350 (syngas hedefi)	~242,5 M\$ (99,4 MMSCFD tesis)	%60–85
NTP Plazma + Katalizör (D-CRBN – Belçika)	5.000–15.000	250–671 (CO üretimi)	~2–5 M\$ (1.000 t/yıl pilot)	%20–40
NTP Plazma + Katalizör (enaDyne – Almanya)	4.000–12.000	200–600 (syngas/metanol)	~0,5–2 M\$ (modüler konteyner)	%70+
Yüksek Sıcaklık Elektrolizi (SOEC)	6.000–10.000	300–600	50–200 M\$	%70–90
Kimyasal Döngü (Chemical Looping)	3.500–7.000	200–500	30–150 M\$	%80–95
Buhar Metan Reformasyonu (SMR – geleneksel)	8.000–12.000	400–800 (yüksek GWP)	100–500 M\$ (ticari ölçek)	%85–95
Doğrudan Hava Yakalama (DAC – yakalama+dönüşüm)	2.500–4.000 (yakalama payı)	400–1.000 (toplam sistem)	200–1.000+ M\$	—

Kaynaklar: GTI Energy/NETL (2022), RSC Energy & Environ. Sci. (2024), D-CRBN Company Reports (2024), enaDyne Investor Materials (2025), BloombergNEF Carbon Markets (2024). CAPEX değerleri pilot/gösterim ölçeği için verilmiştir.

Şekil 1 – CO₂ Dönüşüm Teknolojilerinin Maliyet Aralığı Karşılaştırması (USD/ton CO₂). Turuncu kesik çizgi ~500 USD/ton referans değerini göstermektedir.



Şekil 2 – Enerji Tüketimi (kWh/ton CO₂) ve Pilot Tesis Sermaye Maliyeti (CAPEX, milyon USD) Karşılaştırması. Aralık çubukları literatür minimum–maksimum değerlerini yansıtmaktadır.

4.3 Ülkelere Göre Mevcut Tesis ve Pilot Proje Tablosu

Aşağıdaki tabloda e-Beam/plazma tabanlı CO₂ dönüşümü alanında dünya genelinde faaliyette olan veya inşaat/devreye alma aşamasındaki başlıca tesis ve pilot projeler ülke bazında listelenmektedir:

Ülke	Tesis / Proje Adı	Teknoloji	Kapasite (ton CO ₂ /yıl)	Yatırım / Kamu Desteği	Durum (2025)
ABD	DEBS – GTI Energy + NRL (DOE-NETL, DE-FE0029787)	e-Beam doğrudan sentez (CO ₂ + CH ₄ → syngas)	99,4 MMSCFD (syngas eşdeğeri)	CAPEX ~242,5 M\$ DOE kamu finansmanı	Pilot tamamlandı; TEA yayımlandı
Belçika	D-CRBN Pilot – BluePlasma (Antwerp / ArcelorMittal Ghent)	Kayma Arkı Plazması (Plasma ARC™, katalizsiz)	1.000 t/yıl (pilot hat)	2,5 M€ VLAIO hibesi + ArcelorMittal, BASF, Engie, Vopak ortaklığı	Temmuz 2024'ten itibaren endüstriyel deneme sürecinde
Almanya	enaDyne – Modüler Pilot (Leipzig, Saksonya)	NTP + enaCeramics katalizör (DBD tabanlı, konteyner)	Modüler birim: 500–2.000 t/yıl (2026 ortası hedefi)	~15 M€ toplam (7 M€ tohum + 4,5 M€ SPRIND hibesi)	Pilot konteyner 2026 ortasına kadar konuşlandırılacak
Almanya	PlasmaFuel Projesi (BMWK destekli)	Mikrodalga Plazma + Power-to-Liquid	10 L/gün (mevcut) → 1.000 kat artış hedefleniyor	Alman Federal Bakanlık (BMWK) fonu	Ar-Ge 2. aşama; ölçeklendirme sürüyor
Hollanda	DIFFER – Temel Enerji Araştırmaları Enstitüsü	Mikrodalga plazma + membran reaktör (CO ₂ → CO + O ₂)	Laboratuvar ölçeği ~100 kg/gün	NWO / AB Horizon araştırma fonu	Aktif araştırma; pilot tasarım aşaması

Ülke	Tesis / Proje Adı	Teknoloji	Kapasite (ton CO ₂ /yıl)	Yatırım / Kamu Desteği	Durum (2025)
Belçika/AB	PLASMANT – Antwerp Üniversitesi (Prof. Bogaerts grubu)	DBD, Mikrodalga, Kayma Arkı + katalizör kombinasyonları	Laboratuvar–pilot arası (kg–ton/gün)	AB Horizon Europe; ERC Advanced Grant	Süregelen Ar-Ge; D-CRBN spin-off ile endüstriyel uygulama
İngiltere	Liverpool Üniversitesi (Prof. Xin Tu grubu)	DBD + Ni-Co bimetallik katalizör; %46 metanol seçiciliği	Laboratuvar ölçeği (<10 kg/gün)	EPSRC & UKRI araştırma hibeleri	Bulgular yayımlandı (Chem, Elsevier 2024)
Norveç/AB	Norsk e-Fuel – Mosjøen Power-to-Liquid Tesisi	e-Beam destekli CO ₂ + yenilenebilir H ₂ → sentetik yakıt	12,5 M L/yıl (2024) → 25 M L/yıl (2026) (havacılık yakıtı)	AB Horizon Europe + Norveç devlet fonu; milyon € ölçeği	İnşaat tamamlandı; 2024'ten itibaren üretimde

Kaynaklar: D-CRBN Press Releases (2024), enaDyne Investor Presentation (2025), EU-Startups (2025), GTI Energy/NETL OSTI Report (2022), Norsk e-Fuel (2024), DIFFER Annual Report (2024).

4.4 CO₂ → C + O₂ Tam Ayırıştırma: Enerji ve Maliyet Gerçekliği

CO₂'nin tamamen karbon (C) ve oksijene (O₂) ayrıştırılması, CO veya metanol üretimiyle karşılaştırıldığında çok daha fazla enerji gerektirmektedir. Gerçekçi sistem verimlilikleri (%40–60) gözetildiğinde 5.000–9.000 kWh/ton CO₂ düzeyinde enerji tüketimi öngörülmektedir. 0,06 USD/kWh yenilenebilir elektrik fiyatıyla bu değer 300–540 USD/ton CO₂ maliyetine karşılık gelmektedir.

Bu çerçevede ~500 USD/ton CO₂ referans değeri, mevcut tekno-ekonomik analizlerle örtüşmekte ve makul bir orta nokta tahmini olarak değerlendirilebilir. Nitekim IEA 2023 raporları, CO₂ ayrıştırma maliyetlerinin teknoloji ve enerji kaynağına bağlı olarak 200–1.000 USD/ton bandında yer aldığını ortaya koymaktadır. Hibrit e-Beam sistemlerinin bu bandın alt yarısına yerleşmesi için iki temel koşul aranmaktadır: (i) elektrik enerjisi maliyetinin 0,03–0,05 USD/kWh'nin altına düşmesi ve (ii) reaktör enerji veriminin %60'ı aşması.

Karbon siyahı veya endüstriyel karbon gibi katı karbon ürünlerinin piyasa değeri 300–1.500 USD/ton arasında değişmektedir. Bu durum, CO₂ ayrıştırmasının salt çevre yükümlülüğü değil, değer yaratan bir süreç olarak da konumlandırılabilmesine işaret etmektedir; ancak bu çıkarımı ürün saflığı ve pazar ölçeği koşulları sınırlandırmaktadır (BloombergNEF Carbon Markets, 2024).

4.5 Hibrit e-Beam Teknolojisinin Rekabetçilik Analizi

Hibrit e-Beam reaktörünün rekabetçilik üstünlükleri şu noktalarda toplanmaktadır: Sistem, CO₂'yi doğrudan bağ düzeyinde etkinleştirdiğinden yüksek sıcaklık ve basınca gerek duymaz; bu durum hem sermaye hem de işletme maliyetlerini düşürür. Aynı reaktör yapılandırmasında CO, metanol ve asetik asit gibi birden fazla değerli ürün eş zamanlı üretilmekte; bu çok ürünli yapı ekonomik modeli güçlendirmektedir. Yenilenebilir elektrikle beslenen e-Beam hızlandırıcılar net karbon ayak izini belirgin biçimde azaltırken modüler hızlandırıcı birimleri doğrusal ölçeklendirmeye imkân tanımaktadır.

Buna karşın teknoloji, enerji verimliliği açısından belirgin zayıflıklar barındırmaktadır. Mevcut laboratuvar ve pilot ölçekli e-Beam sistemlerinde enerji verimi genellikle %10–30 aralığında kalmakta; yüksek sıcaklık elektrolizi (SOEC) sistemlerinin %70–90 verimiyle karşılaştırıldığında bu değer dikkat çekici bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ürün karışımının ayrıştırılması ve saflaştırılması ek maliyet yükü getirirken yüksek voltajlı e-Beam

hızlandırıcıların (0,5–3 MeV) sermaye maliyeti 2–10 milyon USD/birim düzeyinde başlangıç yatırımını ağırlaştırmaktadır.

Teknoloji olgunluk düzeyi açısından bakıldığında, hibrit e-Beam sistemleri 2024 itibarıyla TRL 4–5 aralığındadır. Olgun SMR teknolojisi TRL 9, yüksek sıcaklıklı SOEC elektrolizi TRL 5–6 ve doğrudan hava yakalama TRL 5–7 aralığındadır. Hibrit e-Beam'in TRL 7–8 olgunluğuna ulaşması için 2028–2032 döneminde sürekli pilot testlerin ve gösterim reaktörü kurulumlarının tamamlanması öngörülmektedir.

5. TEKNOLOJİNİN ELEŞTİREL DEĞERLENDİRMESİ

Hibrit e-Beam reaktör teknolojisi, ölçeklendirme, enerji dengesi ve ürün seçiciliği açısından henüz çözüme kavuşturulmamış önemli güçlüklerle karşı karşıyadır. Enerji verimliliği, mevcut laboratuvar ölçeği sistemlerinde endüstriyel uygulamalar için kritik eşiğin altında kalmaktadır. Ürün seçiciliğinin denetimi, birden fazla kimyasalın eş zamanlı üretildiği durumlarda ayırıştırma maliyetleri doğurabilmektedir. Yüksek enerjili e-Beam hızlandırıcıların sermaye maliyeti yüksek olup yeterli karbon yakalama altyapısı da ayrı bir gereklilik oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, plazma–katalizör kombinasyonunun sistemli biçimde iyileştirilmesine yönelik araştırmalar ivme kazanmaktadır. Makine öğrenimi destekli katalizör tasarımı, çok modlu reaktör geometrileri ve yenilenebilir elektrik kaynaklarıyla bütünleştirme bu gelişmelerin önünde gelmektedir. 2020 tarihli Plasma Catalysis Roadmap belgesi (Bogaerts ve ark., Journal of Physics D, 2020) alana yönelik sistematik bir bilimsel çerçeve oluşturmuş ve teknolojinin olgunlaşma sürecini hızlandırmıştır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Enerji ve maliyet analizi bir bütün olarak ele alındığında, hibrit e-Beam reaktör teknolojisinin CO₂ dönüşüm ekosisteminde orta vadeli bir niş potansiyeli taşıdığı görülmektedir. Değer zinciri açısından en güçlü konum, CO₂'nin tamamen C + O₂'ye ayırıştırılmasından çok CO, metanol ve asetik asit gibi kimyasallara yüksek değerli dönüşümünde bulunmaktadır. Bu ürün yolu, 1 ton CO₂ başına 150–350 USD maliyet aralığını mümkün kılmakta ve geleneksel sentez yollarına göre daha düşük karbon ayak iziyle rekabet edebilmektedir.

CO₂'nin tamamen elementer bileşenlerine (C + O₂) ayırıştırılması ise termokimyasal eşikler, enerji yoğunluğu (~500 USD/ton referans değeri) ve ürün pazar sınırları nedeniyle daha zorlu bir ekonomik hedef oluşturmaktadır. Endüstriyel karbon siyahı talebinin küresel ölçekte kısıtlı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu ürün yolunun yalnızca özel nişlerde (yüksek saflıkta karbon malzemeleri, grafen öncüleri) ekonomik olarak sürdürülebilir görüldüğü değerlendirilmektedir.

ABD'de DEBS projesi DOE-NETL finansmanı ile pilot ölçeğe taşınmış ve SMR ile örtüşen enerji maliyetlerini yaklaşık %62 daha düşük küresel ısınma potansiyeli ile gerçekleştirebildiğini kanıtlamıştır. Avrupa'da ise Antwerp Üniversitesi, Liverpool Üniversitesi ve IBA gibi kurumlar NTP–kataliz sinerji mekanizmalarını aydınlatmakta; D-CRBN girişimi plazma tabanlı dönüşümü endüstriyel ölçeğe taşıma yolunda ilerlemektedir.

Teknolojinin ticari olgunluğa ulaşması için enerji verimliliği (%60 üzeri), ölçeklendirme ve uzun vadeli reaktör kararlılığı başta olmak üzere temel mühendislik sorunlarının çözülmesi gerekmektedir. Makine öğrenimi destekli katalizör iyileştirmesi ve yeni nesil katı hal e-Beam hızlandırıcıları bu hedefe yönelik en umut verici araştırma yönleri olarak öne çıkmaktadır.

Yenilenebilir elektriğin 0,03 USD/kWh'nin altına düşmesi senaryosunda hibrit e-Beam sistemlerinin 200 USD/ton CO₂ maliyet eşiğini aşağı çekeceği ve elektroliz ile doğrudan hava yakalama teknolojileriyle gerçek anlamda rekabet edebileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak mevcut araştırma ivmesi, uluslararası bilimsel ilgi ve artan kamu–özel Ar-Ge finansmanı göz önüne alındığında, bu teknolojinin 2030–2035 döneminde pilot düzeyden yarı ticari ölçeğe önemli bir atılım yapma potansiyeli taşıdığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte söz konusu atılımın gerçekleşmesi; mühendislik sorunlarının çözümü kadar karbon fiyatlandırma politikalarının olgunlaşmasına da bağlıdır.

KAYNAKLAR /I/

- Bogaerts, A., ve ark. (2020). The 2020 plasma catalysis roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(44), 443001.
- D-CRBN / EPS Plasma Division. (2023). EPS Innovation Prize 2023 – Plasma-based CO₂ conversion. *European Physical Society*.
- Environmental Science and Pollution Research. (2024). Non-thermal plasma-catalytic processes for CO₂ conversion toward circular economy. *Springer Nature*.
- Energy & Environmental Science. (2024). CO₂ conversion to CO via plasma and electrolysis: a techno-economic and energy cost analysis, 17, 5833–5853. *RSC*.
- Frontiers in Energy Research. (2020). Plasma Technology for CO₂ Conversion: A Personal Perspective on Prospects and Gaps. *Frontiers Media*.
- Gas Technology Institute / GTI Energy. (2024). Direct E-Beam Synthesis (DEBS) Process. *GTI Energy Official Website*.
- Green Chemistry, RSC. (2019). CO₂ conversion by high-dose rate electron beam irradiation: one-step, metal-free and simultaneous production of H₂, CO, CH₄, C₂H₆ and organic acids.
- IBA Sustainable Solutions Match. (2025). IBA Discovery Lab – CO₂ and persistent pollutant treatment via electron beam irradiation.
- NETL / OSTI. (2022). High Energy Systems for Transforming CO₂ to Valuable Products (Final Report, DE-FE0029787).
- University of Liverpool. (2024). Plasma-Catalytic CO₂ Hydrogenation to Methanol Using Bimetallic Ni-Co Catalysts at Ambient Conditions. *Chem (Elsevier)*, 2024.