

ABD ELEKTRİK VE SANAYİ SEKTÖRLERİNDE KARBONSUZLAŞTIRILMIŞ HİDROJEN RAPORU

ÖZET *

Hidrojen, düşük karbon ekonomisine potansiyel katkıları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bu raporda, Amerika Birleşik Devletleri elektrik üretiminde, endüstriyel ısıtmada ve endüstriyel hammadde olarak kullanılmak üzere, karbondan arındırılmış hidrojen üretimi için **mavi ve yeşil hidrojen** ele alınıyor. Petrol rafinasyonu ve amonyak üretiminde hammadde kaynaklı emisyonları azaltmak için mavi hidrojeni kullanmanın kısa vadede bir fırsat olduğu görülmüştür. Yeşil hidrojenin rekabetçi olabilmesi için üretim ve depolama maliyetlerinde önemli düşüşler gereklidir. Bununla birlikte, bu maliyetler yeterince düşerse, uzun vadeli enerji depolamada, endüstriyel ısı işlemlerde yakıt ve rafinaj, kimyasallar ve çelik için hammadde olarak yeşil hidrojenin geniş kullanım potansiyeli vardır.

Karbonsuz hidrojeni kullanmak, düşük karbonlu bir ekonomiye giden bir yoldur. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), danışmanlık firmaları, ticaret birlikleri ve akademik kuruluşlar (örneğin, IEA 2019; IRENA 2019; Hidrojen Konseyi 2020) tarafından yapılan değerlendirmeler, teknolojik gelişmelerin ve maliyet düşüşlerinin hidrojenin karbondan arındırılmış bir ekonomiye önemli ölçüde katkıda bulunmasına nasıl izin verebileceğini inceledi. Teknik yol haritalarını temel alan bu rapor, kamu politikasının rolünü ele alıyor: karbondan arındırılmış hidrojen teşvik edilmeli mi ve eğer öyleyse, hangi yaklaşım etkili ve uygulanabilir?

Karbondan arındırılmış hidrojeni desteklemeye yönelik motivasyonlar, hidrojenin iki işlevine dayanmaktadır: **hammadde** ve **yakıt** olarak. Amonyak üretimi ve petrol rafinasyonu için büyük miktarda hidrojen halihazırda endüstriyel bir hammadde olarak kullanılmaktadır.

Mevcut hidrojen üretimi, önemli miktarda karbondioksit (CO₂) emisyonuna neden olduğundan, düşük veya sıfır karbonlu hidrojen üretim proseslerine geçiş, mevcut hammadde uygulamalarının karbondan arındırılmasında kritik bir adımdır. Düşük karbonlu süreçlerin yüksek karbonlu süreçlere göre daha yüksek maliyeti, bu tür bir değişimin önündeki birincil engeldir. Karbondan arındırılmış hidrojen, çelik üretimi gibi ağır sanayi sektörlerinde yüksek karbonlu hammaddelerin yerini alabilir.

* “Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions”, [Resources for the Future](#)

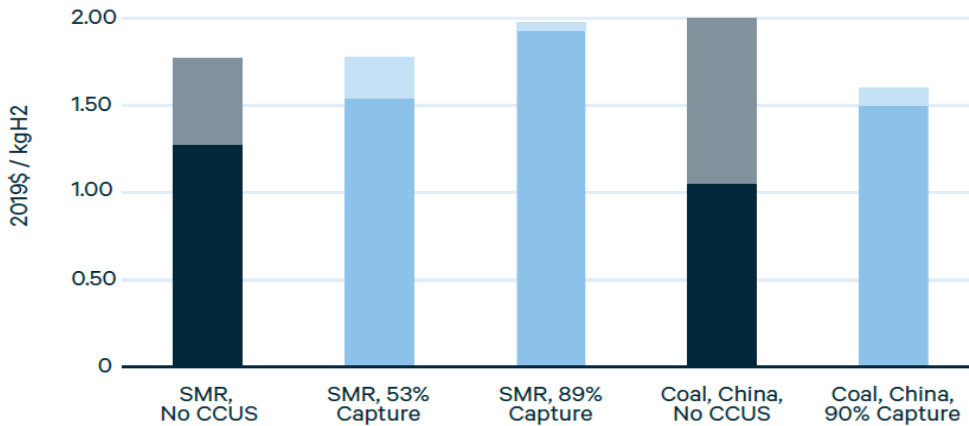
Hidrojenin yakıt olarak kullanımı, hammadde olarak kullanılmasından daha az gelişmiştir çünkü fosil yakıtların üretimi ve kullanımı ucuzdur. Bununla birlikte, hidrojen, yanma sırasında hiç CO₂ üretmemeye gibi olağandışı bir özelliğe sahip olduğundan önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Yüksek sıcaklıkta endüstriyel ısı ve uzun vadeli enerji depolama gibi, emisyonları azaltmak için sınırlı seçeneklere sahip bazı uygulamalar için, karbondan arındırılmış hidrojen umut verici bir alternatiftir. Yakıt üretimi ve altyapının yüksek maliyetleri ve hidrojen kullanımı için ekipman değiştirme ihtiyacı bu noktada zorluklar olarak sayılabilir.

Karbondan arındırılmış hidrojeni teşvik etmeye yönelik politika seçeneklerinden tercih edilen araç olarak karbon vergisi mevcut yasal ve düzenleyici ortamda mümkün değildir.

Dünya ekonomisinin karbondan arındırılması, açık fikirli politikaları, teknolojik ilerlemeleri ve doğanın bize sağladığı her şeyin yaratıcı kullanımını gerektirecektir. Gri hidrojenin büyük miktarları zaten endüstri tarafından kullanılıyor ve nispeten kirli buhar metan reformu ile üretiliyor, öyle ki, hidrojenin tüketildiğinde karbon emisyonu olmasa bile, üretilen Btu başına doğal gazdan daha fazla CO₂ yaymaktadır. Karbon tutma ile üretilen mavi hidrojen, kullanım ve depolamanın emisyonlarını azaltır. Bu yüzden uygulanabilir bir düşük karbon yoludur. Elektrolizle üretilen hidrojen, elektriğin kendisi oldukça temiz bir şekilde üretilmediği sürece iklim için gri hidrojenden daha iyi değildir. Bununla birlikte, elektroliz için gerekli güç yalnızca yenilenebilir ve nükleer enerjiden geliyorsa, ortaya çıkan yeşil hidrojen neredeyse sıfır karbonlu bir enerji kaynağıdır.

Şekil 1- 50 \$ / tCO₂ Fiyatıyla (karbon fiyatı) Mevcut H₂ Üretim Maliyetleri



Sources: Friedmann et al. 2019; IEA 2019.

Notes: Lower stack (darker shade) presents the midpoint of hydrogen production costs; upper stack (lighter) presents the carbon cost of hydrogen production at a price of \$50/tCO₂. Includes only CO₂ emissions from combustion and chemical conversion.

* “Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions”, [Resources for the Future](#)

Şekil 1'de, 50 \$ / tCO₂'lik bir karbon fiyatı, mavi hidrojenin kısa vadede mali olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu karbon fiyatı ile, proses akışından kaynaklanan emisyonları yakalamak, CCUS olmadan SMR'den elde edilene eşit bir üretim maliyetiyle sonuçlanacaktır. Başka bir deyişle, 50 \$ / tCO₂'lik bir vergi kredisi, mavi hidrojeni (yüzde 50 ila 60 CO₂ yakalama ile) gri hidrojen ile rekabet edebilir hale getirecektir. Bununla birlikte, CCUS'u yanma gazlarına da uygulamak ve toplam CO₂ emisyonlarının kabaca yüzde 90'ını yakalamak düşük verimliliği nedeniyle daha pahalı olacaktır.

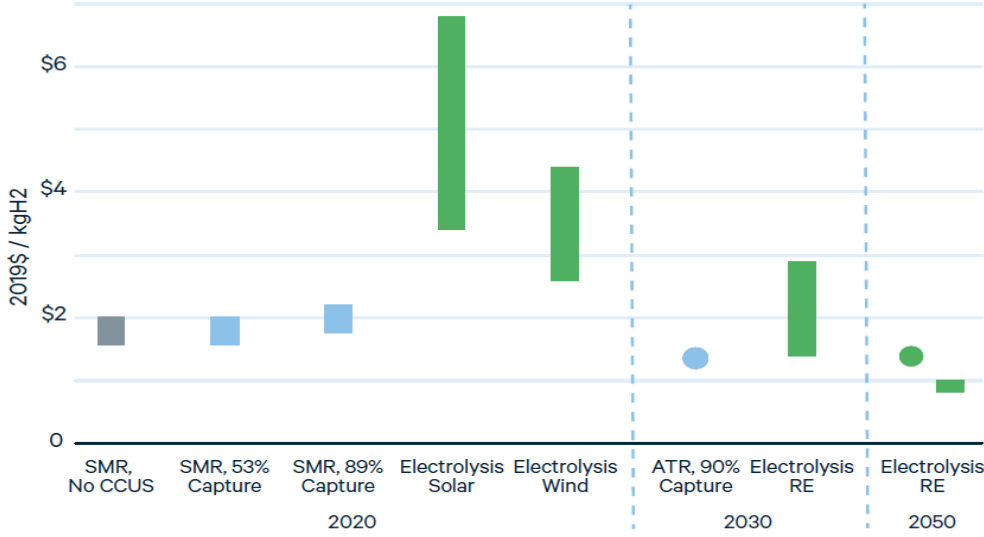
Proses emisyonlarının yakalanmasının marjinal azaltma maliyeti yaklaşık 50 \$ / tCO₂ iken, yanma emisyonlarını yakalamanın marjinal maliyeti 100 \$ / tCO₂'yi aşmaktadır. Çin'deki kahverengi hidrojen için, yüksek emisyon yoğunluğu göz önüne alındığında, CO₂ emisyonlarının yüzde 90'ını yakalamak, üretim maliyetlerini yüzde 20 azaltacaktır. 50 \$ / tCO₂ fiyatı örnek amaçlı olsa da, küresel SCC (Karbon Sosyal Maliyeti) ve CCUS (Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama) için 45Q vergi kredisinin değeri ile tutarlıdır.

CCUS, 2026 yılına kadar 50 \$ / tona yükselen vergi kredileri sağlayan 45Q programı aracılığıyla zaten sübvansede ediliyor. Artan ölçek, özellikle bölgesel CCUS altyapısı ve ototermal reform teknolojisinin geliştirilmesi ile, düşük karbonlu mavi hidrojen (CO₂'nin yüzde 90'ı yakalanan) üretimi 2030 yılına kadar en verimli hidrojen üretim yöntemi haline gelebilir (Şekil 2).

Gri, mavi ve yeşil hidrojenin mevcut maliyetlerinden ve bileşen maliyetlerinin ve faktörlerinin nasıl gelişebileceğine ilişkin tahminlerden, Şekil 2, hidrojen üretim teknolojilerinin maliyetlerinin zaman içinde nasıl karşılaştırılabileceğini göstermektedir. Proses emisyonlarından CO₂ yakalama ile mavi hidrojen için, karbonun küresel sosyal maliyeti veya 50 \$ / tCO₂'ye eşit bir vergi kredisi hesaba katıldığında, üretim maliyetleri halihazırda gri hidrojen ile rekabet halindedir. Hem proses hem de yanma emisyonlarından CO₂ yakalayan mavi hidrojen henüz uygun maliyetli değildir. Bununla birlikte, artan ölçek - özellikle bölgesel CCUS altyapısı - ve SMR'den (buhar metan reformasyonu) ATR'ye (ototermal reformasyon) geçişle, yüzde 90 CO₂ yakalamalı mavi hidrojen, yaklaşık 1,30 \$ / kgH₂'lik bir maliyetle 2030'a kadar en ekonomik hidrojen üretim yöntemi olabilir (Hydrogen Council 2020).

* "Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions", [Resources for the Future](#)

Şekil 2- Mevcut ve Öngörülen Hidrojen Maliyetleri



Sources: Friedmann et al. 2019; IRENA 2019; Hydrogen Council 2020; Mathis and Thornhill 2019.
Notes: Bars indicate cost ranges; circles indicate point estimates. Gray and blue hydrogen assume a delivered natural gas price of \$3.50/MMBtu. 2020 and 2030 costs assume social costs of carbon of \$51/tCO₂ and \$61/tCO₂, respectively, from IWG (2016), inflated from 2007\$ to 2019\$. Includes only CO₂ emissions from combustion and chemical conversion.

IRENA (2019), 2050 yılına kadar yeşil hidrojen maliyetinin 1,38 ABD Doları / kgH₂ olacağını, sermaye maliyetinin 200 ABD Doları / kW, enerji maliyetinin 20 ABD Doları / MWh ve kullanımın yüzde 48 olacağını varsaymaktadır. Bununla birlikte, bazı endüstri katılımcıları, düşük elektrolizör ve güç maliyetleri nedeniyle yeşil hidrojen maliyetlerinin daha da düşeceğini tahmin ediyor. 80 \$ / kW'lık bir sermaye maliyeti ve 15 \$ / MWh elektrik maliyeti varsayıldığında, yeşil hidrojen üretim maliyetleri, karbonun sosyal maliyeti dikkate alınmadan bugün Birleşik Devletler'deki gri hidrojenin maliyetinden daha az olan 1,00 \$ / kgH₂'ye (Mathis ve Thornhill 2019) veya altına düşecektir.

Kullanıcıya teslimat ve gerekli herhangi bir depolama da hidrojen ikame ürünlerle rekabetçi olmalıdır. Bu zordur çünkü hidrojen, çok düşük yoğunluğa ve kaynama noktasına sahip bir gazdır. Hidrojenin yüzde 85'i sahada üretilip tüketildiği için şu anda nakliye ve depolama maliyetleri gri hidrojen için önemli bir endişe kaynağı değil (IEA 2019). Ancak genişletilmiş kullanım, bu maliyetleri bir sorun haline getirecektir. Depolama için, avantajlı bir şekilde konumlandırılan **tuz mağaralarının** halihazırda en iyi seçenek olduğunu ve gelecekte maliyetlerin yaklaşık yüzde 50 oranında azaltılabileceği söylenebilir. Amerika Birleşik Devletleri içinde iletim için, özel hidrojen boru hatları genellikle en ucuz alternatif olacaktır. Bununla birlikte, daha kısa vadede ve özellikle hidrojeni doğal gazın yerini alacağı elektrik santrallerine götürmek için, düşük oranlarda hidrojen (hacimce yüzde 20'den az) doğal gazla harmanlanabilir ve doğalgazın geniş boru hattından yararlanılabilir. Alternatif olarak, karbonsuzlaştırılmış

* "Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions", [Resources for the Future](#)

hidrojen sanayi ve güç merkezleri oluşturulabilir, böylece iletim mesafesi azaltılabilir. Halihazırda hidrojen depolama ve iletimine sahip olan Körfez Kıyısı, mavi bir hidrojen merkezi olarak hedeflendi ve Utah, yeşil hidrojen üretmek ve depolamak için rüzgâr ve güneş kaynaklarından ve tuz mağaralarından yararlanmak için geliştirme aşamasında bir projeye sahip.

Üretilen ve teslim edilen tüm mavi ve yeşil hidrojen, daha kirli yakıtların ve işlemlerin yerini almadıkça kendi başına daha düşük CO2 emisyonlarına yol açmayacaktır.

En belirgin ikame, rafinasyon ve amonyak üretiminde kullanılan gri hidrojendir. Daha yaygın ve daha fazla karbon azaltma faydaları için, karbondan arındırılmış hidrojenin üç geniş son kullanımını ele alınabilir: enerji sektöründe, bir endüstriyel ısı kaynağı olarak ve endüstriyel bir hammadde olarak (bunlarla sınırlı olmamak üzere, petrol rafinasyonu ve amonyak üretiminde kullanımı).

Enerji sektöründe, karbondan arındırılmış hidrojen, CO2 emisyonları olmadan dağıtılabilir ve bu sebeple önemli bir avantaja sahiptir. Yalnızca CCUS ile doğal gaz benzer bir kombinasyona sahiptir ve yeşil hidrojen daha düşük emisyon profiline sahiptir. Dahası, yeşil hidrojen enerji depolamaya izin verir: ihtiyaç fazlası sıfır karbon enerjisi hidrojene dönüştürülebilir ve daha sonra kıtlık zamanlarında elektrik üretmek için kullanılabilir. Yeşil hidrojen ile enerji depolaması, bir veya iki günden daha kısa deşarj sürelerinde bataryalar, pompalı hidro ve basınçlı hava gibi diğer seçeneklerle rekabet etmez.

Hidrojen sevk edilebilirliğine ve enerji depolama potansiyeline rağmen, muhtemelen yalnızca uzun vadede uygun maliyetli olacak ve yaygınlaşacaktır. Yeşil hidrojen üretim maliyetleri önemli ölçüde düşmeli ve Körfez Kıyısı'nın ötesinde ucuz depolama ve boru hatları kurulmalıdır. Ek olarak, uzun süreli depolamanın değeri yalnızca rüzgâr ve güneşin şebekede enerji üretiminin çoğunluğunu oluşturduğu durumlarda caziptir.

Son olarak, daha uzun bir zaman aralığında, daha yüksek bir sosyal karbon maliyeti oluşacak (her yıl artmaktadır) ve hidrojen doğal gazla rekabet edebilir seviyeye gelebilecektir.

Endüstriyel ısıya dönersek, fosil yakıtların yanması ABD endüstriyel CO2 emisyonlarının yüzde 58'ini oluşturmaktadır. Yine de, bu sektörün ekonomik ve politik nedenlerle ve ayrıca çeşitli endüstriyel proseslere özgü ısıtma için teknik gereklilikler nedeniyle karbondan arındırılması zor olacaktır. Örneğin elektrik, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları ve özellikle yeşil alan bitkileri için çok uygundur. Diğer bir ikame olan biyokütle, düşük ve orta sıcaklıktaki süreçlerde daha verimlidir ve sürdürülebilir üretimi sınırlıdır. Bir endüstriyel tesiste kurulan CCUS, üçüncü rakip teknolojidir. Bu ise en çok güçlendirme uygulamalarında ve çimento ve çelik üretimi gibi yüksek konsantrasyonlu CO2 emisyonlarına sahip süreçlerde ilgi odağı olmuştur. Ancak CO2 taşıma ve depolama seçeneklerinin uygulanabilir ve ekonomik olması gerekir.

* “Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions”, [Resources for the Future](#)

Hidrojen için endüstriyel bir ısı kaynağı olarak en büyük fırsat, yalnızca küçük tesis modifikasyonlarıyla (CCUS'a göre bir avantaj) yakıtları değiştirilebilen yüksek sıcaklık prosesleridir (elektrik ve biyokütle için daha az uygun olduğu). Çimento, alüminyum, cam ve belirli kağıt hamuru ve kağıt üretim uygulamaları, hidrojen kullanımı için en büyük potansiyeli sunmaktadır. Bununla birlikte, enerji sektöründe olduğu gibi, hidrojenin endüstriyel ısıtmadaki potansiyeli gerçekleştirilmeden önce hidrojen üretimi ve dağıtım maliyetleri önemli ölçüde düşmelidir.

Bir hammadde olarak karbondan arındırılmış hidrojen, petrol arıtma ve amonyak üretiminde gri hidrojenin basit bir ikamesidir. Yakın vadede, CCUS, ya yerinde (bir rafineri veya amonyak tesisinde) ya da bir ticari hidrojen tesisinde mavi hidrojen üretmek için SMR'ye uygulanabilir. Uzun vadede, üretim ve depolama maliyetleri yeterince düştüğünde, yeşil hidrojen, rafinaj ve kimyasal üretimi için daha da düşük bir karbon hammadde olarak sunulabilir. Ek olarak, düşük maliyetli yeşil hidrojen, karbondan arındırılmış hidrojenin iklim faydalarının petrol rafinasyonu ve amonyak üretiminden daha mütevazı olduğu üre ve metanol üretiminde kullanılabilir.

Karbonsuzlaştırılmış hidrojen için bir başka yeni hammadde uygulaması, bugün küresel CO2 emisyonlarının yüzde 7'sinin kaynağı olan demir ve çelik üretimidir (McKinsey 2018). Yeşil hidrojenin, çelik üreticilerinin hidrojen kaynaklı bir sürece girmeden önce önemli bir maliyet düşüşü göstermesi gerekebilir.

Rakip politikaların uzun bir listesini karşılaştırdığımızda, karbondan arındırılmış hidrojenin üretimini ve kullanımını kapsayan bir vergi kredisi sisteminin, kısa vadede pratiklik temelinde en umut verici olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, CCUS zaten cömert bir vergi teşvik programı (45Q) ile teşvik edilmiştir.

CCUS için 45Q vergi kredisi ve rüzgar için üretim vergisi kredisi, vergi kredilerinin CO2 azaltımına nasıl bir değer katabileceğini ve iklim politikaları açısından nasıl etkili bir şekilde hizmet edebileceğini göstermiştir. Ek olarak, yeni teknolojiler için vergi kredileri, ölçek ekonomileri ve yaparak öğrenme yoluyla maliyetlerin düşürülmesini sağlayabilir. Karbondan arındırılmış hidrojen için bir vergi kredisi, kuşkusuz, CCUS veya rüzgâr için bir vergi kredisinden daha karmaşıktır.

Temiz enerji teknolojilerinde çok fazla belirsizlik bulunsa da karbondan arındırılmış hidrojen muhtemelen düşük karbon portföyünün önemli bir parçası olacaktır. Elektrolizden hidrojen üretmek, fosil yakıt yerine sudan, değerli bir endüstriyel hammadde oluşturmaktadır. Karbondan arındırılmış hidrojen için tasarlanmış bir **vergi kredisinin** iklim politikasının değerli bir bileşeni olduğunu düşünülmektedir.

* “Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions”, [Resources for the Future](#)