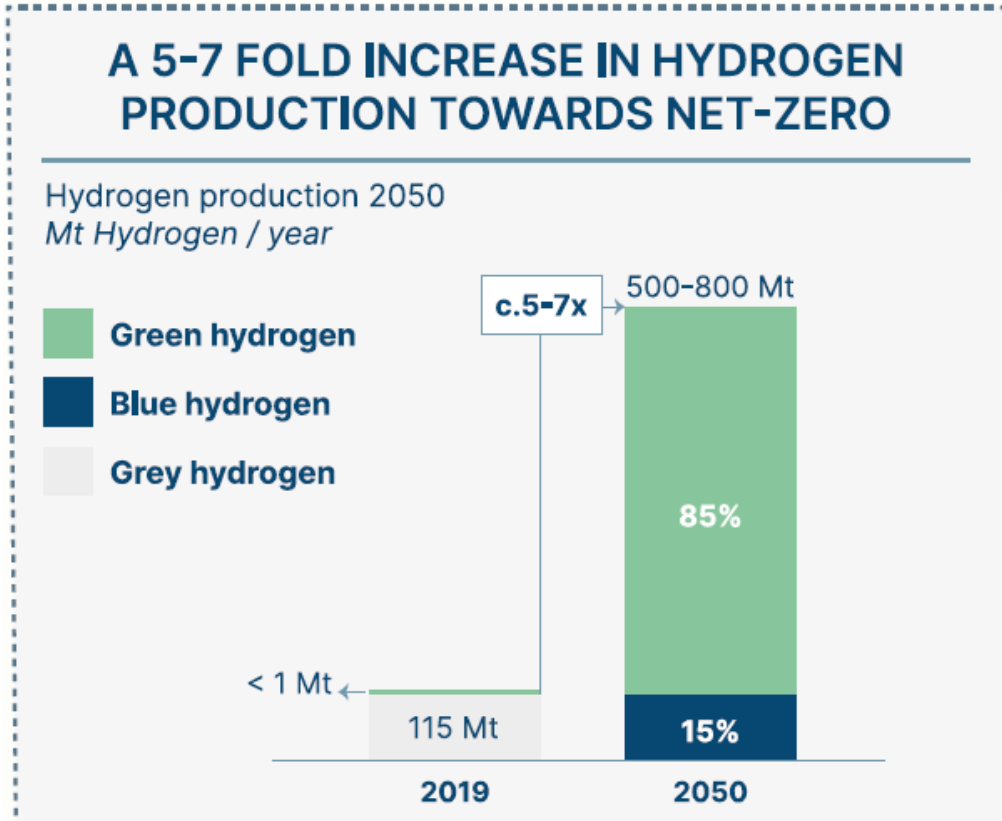


# HİDROJEN EKONOMİSİNE DOĞRU RAPORU ÖZETİ \*

Paris İklim Anlaşması, dünyayı küresel ısınmayı sanayi öncesi seviyelerin 2 ° C'nin çok altında sınırlandırmayı taahhüt ederken, bunu 1,5 ° C ile sınırlamaya çalışıyor. Bu taahhüdü yerine getirmek için, dünyanın CO2 emisyonlarını yüzyılın ortasına kadar net sıfıra getirmesi gerekiyor.

Doğrudan elektrifikasyonun imkansız veya çok pahalı olduğu bazı sektörler var ve hidrojen bunların karbondan arındırılmasında kilit bir rol oynayacak. Çelik üretiminde, taş kömürünün yerini alabilir; amonyak biçiminde, uzun mesafeli nakliyei karbonsuzlaştırabilir ve enerji depolamada büyük bir rol oynaması muhtemeldir. Bu ve diğer birçok sektör genelinde, toplam hidrojen kullanımı, yüzyılın ortalarında, hidrojen (ve bundan türetilen yakıtlar) ile birlikte bugünkü yıllık 115 Mt'dan yaklaşık 500 ila 800 Mt'a çıkarak toplam nihai enerji talebinin yaklaşık %15-20'sini oluşturabilir.

**Şekil 1- 2050 Hidrojen Üretimi**



\* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#)

Hidrojenin tamamı, sıfır karbonlu elektrik ("yeşil hidrojen") kullanılarak elektroliz yoluyla sıfır karbon tarzında veya doğal gaz ve CCS ("mavi hidrojen") kullanılarak düşük karbonlu bir şekilde üretilmelidir. Bu, neredeyse tamamen CO2 yakalama ve çok düşük metan sızıntısı sağlar. Mavi hidrojen, geçişin ilk aşamalarında, özellikle mevcut "gri hidrojen" üretiminin uyarlanabildiği ve CCS ile güçlendirilebildiği durumlarda, genellikle uygun maliyetli olacaktır. Ancak, uzun vadede, yeşil hidrojen, 2 \$ / kg'ın altına düşeceği dramatik maliyet indirimleriyle birlikte, çoğu yerde muhtemelen daha ucuz seçenek olacaktır. Bu yeşil hidrojen üretimi, çok büyük bir elektrik talebi oluşturacak ve toplam gerekli sıfır karbonlu elektrik arzını 30.000 TWh kadar artıracaktır.

Bu nedenle, 2050'ye kadar net sıfır emisyon stratejileri, temiz hidrojenin temel rolünü ve gerekli temiz elektrik tedariki için çıkarımları kabul etmelidir. Ayrıca, 2050'ye geçişi mümkün kılmak için 2020'lerde yeterince hızlı ve güçlü bir başlangıç sağlamalıdır. Hidrojen üretim maliyetleri önemli ölçüde düşse bile, son uygulamalarda hidrojen kullanımını artırmak için günümüzün yüksek karbon teknolojilerine karşı genellikle bir "yeşil maliyet primi" uygulanacağından politika desteği gerektirmektedir. Politika, karbon fiyatları, belirli son kullanım sektörlerine odaklanmış destek, temiz hidrojen üretimi ve kullanımının coğrafi olarak birbirine yakın kümelenmiş lokasyonlarda oluşturulması gibi çeşitli araçları birleştirmelidir.

2018 yılında, dünya çapında yaklaşık 115 Mt hidrojen kullanıldı, bunun 70 Mt'si ağırlıklı olarak doğal gaz (%71) ve kömürden (%27) üretildi. Bu üretim sonucunda, küresel enerjiyle ilgili toplamın yaklaşık %2,2'sine tekabül eden yaklaşık 830 Mt CO2 emisyonu salımı gerçekleşti. Önümüzdeki 30 yıl içinde, hidrojen kullanımının önemli ölçüde artması bekleniyor ve hidrojen üretiminin, mevcut ve birden çok yeni uygulamada bir dekarbonizasyon çözümü olarak kullanılması için sıfır karbonlu olması gerekiyor.

Sıfır karbonlu bir ekonomide hidrojenin potansiyel kullanımları dört gruba ayrılabilir:

- Temiz hidrojen üretiminin mümkün olduğunca hızlı bir şekilde "gri" üretimin yerini alması gereken mevcut hidrojen kullanımları (ham petrol rafine etme, amonyak ve metanol üretimi.)
- İlgili uygulama teknolojileri geliştikçe ve sermaye varlıkları değiştirildikçe hidrojen kullanımının yavaşça artacağı, yüksek olasılıklı ve büyük uzun vadeli kullanımlar. Bunlara çelik üretimi, uzun mesafeli nakliye ve belki de havacılık dahildir. Ayrıca, güç sistemlerinde mevsimlik depolama için büyük bir hidrojen kullanımı da büyük ihtimalle olacaktır.
- Nihayetinde aşamalı olarak kaldırılması gereken mevcut yüksek karbonlu varlıklarda kısmi emisyon azaltımlarına olanak tanıyan potansiyel kısa vadeli geçiş fırsatları (örneğin, elektrik üretiminde hidrojeni doğal gazla birlikte yakmak).
- Hidrojenin diğer karbondan arındırma seçeneklerine göre görece avantajlarının hala belirsiz olduğu olası kullanımlar. Bunlar, ağır hizmet karayolu taşımacılığı, konut

\* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#)

ısıtması, belirli enerji yoğun yerlerde (örneğin veri merkezleri) ve plastik üretiminde yedek güç üretimi için hidrojeni içerir.

Hidrojenin tüm potansiyel kullanım durumları gerçekleşirse, toplam talep 2050'ye kadar 1000 Mt'a ulaşabilir, ancak sektöre göre daha makul bir olasılık tahmini, yaklaşık 500-800 Mt aralığı anlamına gelir. Bu, hidrojenin (ve türevlerinin) doğrudan elektrifikasyonla %70'in üzerinde karşılanacak toplam enerji talebinin yaklaşık %15 ila %20'sini oluşturabileceği anlamına gelir. Tahminlerimiz, Hidrojen Konseyi ve BloombergNEF tarafından üretilen son senaryolarla aynı büyüklükleri, farklı bir sektörel uygulama karışımıyla önermektedir. Bu nedenle, hidrojene yönelik hükümet ve ulusal stratejiler, sektöre göre dekarbonizasyon teknolojilerinin kesin dengesi belirsiz olsa da hidrojenin sıfır karbon ekonomisinde önemli bir rol oynayacağını varsaymalıdır.

2050'de kullanılan herhangi bir hidrojen, neredeyse sıfır karbon tarzında üretilmelidir. Bu, aşağıdakilerden biri aracılığıyla gerçekleştirilebilir:

- Suyun elektrolizi yoluyla yeşil hidrojen üretimi. Kullanılan tüm elektrik sıfır karbon kaynaklarından geliyorsa, tamamen sıfır karbonlu hidrojen sağlayabilir.
- Karbon yakalama ve depolama (CCS) uygulanmış, doğal gazdan hidrojenden elde edilen mavi hidrojen üretimi. Bu, karbon yakalama işleminin eksiksizliği (en az %90 gereklidir) ve doğal gaz çıkarma, nakliye ve kullanımda metan sızıntılarının ölçeği tarafından belirlenen kalıntı emisyonların boyutu ile düşük karbonlu hidrojen ile sonuçlanabilir.

Uygulanabilir mavi hidrojen üretim maliyetleri (1,3-2,9 \$ / kg) şu anda yeşil hidrojenin (2,6-4,5 \$ / kg) altındadır. Gri hidrojen üretimi (CCS'siz fosil yakıtlardan hidrojen) hala hepsinden daha ucuzdur (0,7-2,2 \$ / kg). Herhangi bir karbon vergisinin etkisi hariç tutulduğunda, "mavi" rota, CCS'nin ekstra maliyeti nedeniyle gri hidrojen üretmekten her zaman daha pahalı olacaktır. Buna karşılık, yeşil hidrojen maliyetleri iki faktöre bağlıdır: sıfır karbonlu elektriğin maliyeti ve elektrolizörlerin sermaye maliyeti. Her ikisinin de hızla düşmesi muhtemeldir. Sonuç olarak, yeşil hidrojen maliyetlerinin bazı yerlerde 2030'dan önce ve çoğu durumda 2050'ye kadar mavi hidrojen maliyetlerinin altına düşmesi muhtemeldir.

Bu nedenle, geçişte ve gaz maliyetlerinin çok düşük olduğu belirli yerlerde "mavi" önemli bir rol oynasa da "yeşil" üretim rotasının uzun vadede ana üretim rotası olması muhtemeldir. Temel durum senaryomuz, 2050 yılına kadar 500-800 Mt yıllık üretimin %85'inin "yeşil" yolla üretilebileceğini varsaymaktadır. Bu, doğrudan elektrifikasyon için potansiyel olarak gerekli olan 90.000 TWh'ye ek olarak yaklaşık 30.000 TWh elektrik ilavesini gerektirecektir.

Sıfır karbonlu hidrojen üretmek, uzun vadede ekonomiye büyük bir maliyet getirmeyecektir. Bununla birlikte, bazen, hidrojen kullanmak, azaltılmamış fosil yakıt bazlı bir teknolojinin kullanımına kıyasla büyük olasılıkla önemli maliyetler getirecektir. Bunun nedeni, hidrojen ve fosil yakıtlar arasında kalan maliyet farkından (karbon fiyatı \* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#))

olmadan) ve hidrojen temelli teknolojilere geçişle tetiklenen sermaye harcamalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, karbondan arındırmayı sağlamak için hidrojen kullanımında "yeşil ürün primi" olacaktır.

Sıfır karbonlu hidrojene olan talep, ara ürün düzeyinde güçlü politika desteği olmadan gelişmeyecektir.

Daha fazla uygulamayla büyük ölçüde artan talep, hidrojen taşıma ve depolama için kapsamlı sistemler gerektirecektir. Bu, maliyetleri artıracak, ancak uygun, düşük maliyetli yerlerde hidrojen üretme fırsatlarını da ön plana çıkaracaktır.

Hidrojen farklı şekillerde taşınabilir: sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış veya amonyak olarak. En düşük maliyetli nakliye seçenekleri, gerekli hacimlere ve ilgili mesafelere bağlı olacaktır. Bazı büyük ölçekli uygulamaları desteklemek için önemli miktarda depolamaya ihtiyaç duyulacaktır. Güç sistemi içinde mevsimsel arz dengesi sağlamak için hidrojen kullanıldığında gereksinimler en yüksek değerde olacaktır. Karayolu taşımacılığı gibi dağıtılmış uygulamalar için dağıtım ve depolama maliyetleri, kg başına 2 \$ 'ın altındaki üretim maliyetlerine kg başına yaklaşık 1,3 \$ ekleyebilir.

Hidrojenin uluslararası ticaretinin ölçeği üç faktörle sınırlanacaktır: i) yeşil hidrojen taşımacılığına bir alternatif olarak uzun mesafeli elektrik iletiminin potansiyel kullanımı; ii) mavi hidrojen taşımacılığına alternatif olarak doğal gaz boru hatlarının potansiyel kullanımı ve iii) bölgeler arasında yenilenebilir elektrik maliyetlerinin düşme olasılığı, bölgeler arasındaki maliyet farkını nakliye maliyetlerinin düşmesinden daha hızlı azaltacaktır.

Sonuç olarak, hidrojenle karlı uluslararası ticaret için uzun vadeli fırsatlar, ucuz yüksek kapasiteli boru hatlarının ekonomik olduğu (özellikle mevcut gaz boru hatlarının yenilenebildiği yerlerde tipik olarak 1000 km'ye kadar) veya amonyakın son kullanım için taşınması ile sınırlı olabilir (maliyetli, yoğun enerji gerektiren hidrojene dönüşümünden kaçınma). Ayrıca, sınırlı sayıda ülkede, maliyetler nispeten yüksek olsa bile onları enerji ithal etmeye zorlayan bir enerji açığı olabilir (örneğin, yerel yenilenebilir enerji üretimi için arazi yetersizliğinden dolayı). Dahası, bir hidrojen ekonomisinin ortaya çıkmasının zamanla çelik gibi hidrojen yoğun endüstrilerin optimum konumunda değişikliklere yol açması muhtemeldir.

Gelecekteki sıfır karbon ekonomisinde hidrojenin önemli bir rol oynayabileceği ve oynaması gerektiği açıktır. Buradaki zorluk, geçişin önce düşük maliyetli üretimin kilidini açacak ve ardından sektörü 2050 hedeflerini karşılayacak bir büyüme yörüngesine sokacak kadar hızlı gerçekleşmesini sağlamaktır.

Yeşil hidrojen bugün rekabetçi olmasa da kamu politikaları ve özel planlar zaten duyurulmuştur ve bu 2020'lerde güçlü maliyet düşüşleri sağlamak için bu yeterli olacak ve bazı yerlerde mavi ve gri hidrojen rekabet edebilecektir.

\* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#)

Hem ana girdilerin-elektrolizör ekipmanı hem de yenilenebilir elektrik- maliyetlerinin 2020'lerde hızla düşmesi muhtemeldir. Bu nedenle, yeşil hidrojen üretiminin maliyeti muhtemelen kg başına 2 doların altına ve bazı yerlerde 2020'lerde kg başına 1,5 doların altına düşecektir. Birkaç özel yatırım projesi halihazırda bu maliyetlerde üretimi hedefliyor.

2020'lerin sonlarına doğru, temiz hidrojenin bazı yerlerde gri hidrojen ile maliyet açısından rekabet gücü yüksek olacaktır. Bununla birlikte, hidrojenin son kullanım uygulamaları ve dolayısıyla toplam talep, 2020'lerde gelecek hedefi bağlamında gerekli olan 500-800 Mt için güvenilir bir yol sağlamak için yeterince hızlı büyümeyebilir. Bu nedenle kamu politikası, 2020'lerde sadece yeşil hidrojenin maliyetinde bir düşüş sağlamak için gerekenden daha hızlı talep büyümesini desteklemelidir.

Temel öncelikler, mevcut tüm hidrojen üretiminin hızlı dekarbonizasyonun sağlanması ve karbondan arındırılması zor sektörlerle özellikle çelik üretiminde hidrojen kullanımı ve nakliyede amonyak kullanımı gibi alanlarda hızlı benimsemeye destek sağlanmasıdır.

Hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi için stratejiler, gerekli yatırım artışının ölçeğini de öngörmeli ve tüm engelleri tanımlamalı ve kaldırmalıdır.

- Yeşil hidrojen için, doğal kaynaklar büyük bir artışı desteklemek için açıkça yeterlidir, ancak güç sistemi geliştirme planları, yeşil hidrojen üretimi için çok büyük elektrik talebini önceden tahmin etmelidir.
- Mavi hidrojen gelişimi, uzun proje hazırlık süreleri, ortak boru hattı ağları geliştirme zorluğu ve CCS'ye halkın direnci nedeniyle yavaşlayabilir, dolayısıyla uygun mavi hidrojenin gelişimini desteklemek için açık ulusal stratejilere ihtiyaç duyulabilir.

Yeşil ve mavi hidrojen arasındaki gerçek denge, belirli ulusal ve bölgesel koşullara göre değişen, teknolojiye ve maliyette gelecekteki eğilimleri yansıtacaktır.

Düşük maliyetli hidrojen üretimini ve talep artışını eşzamanlı olarak geliştirme stratejileri, başlangıçta hidrojen üretimi, depolaması, nakliyesi ve son kullanımın aynı anda gelişebileceği "hidrojen kümelerine" odaklanırsa çoğu zaman çok etkili olacaktır. Kümelenmeler, hidrojen üreticilerine yerel hidrojen talebinde daha fazla kesinlik sağlayabilir, farklı kullanıcıların maliyetleri paylaşmasına olanak tanır ve büyük ölçekli taşımacılıkta ilk yatırım ihtiyacını en aza indirebilir.

Potansiyel kümelenmelerin ayrıntıları, belirli coğrafyalara ve başlangıç noktalarına bağlı olacaktır, ancak 4 değişken önemli olabilir:

- Üretimin karbondan arındırılması gereken mevcut rafinaj, petrokimya ve gübre üretim tesislerinin kümelenmeleri ve yeni endüstriyel uygulamalar.
- Gelecekteki nakliye dekarbonizasyonunu desteklemesi gereken ve aynı zamanda nakliye merkezleri olan ve genellikle ağır sanayi bölgelerine yakın yerlerde bulunan limanlar.

\* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#)

- Taşımayla ilgili farklı kullanımların bir arada bulunduğu kıyı dışı taşımacılık ve lojistik düşümler;
- Küme oluşturmaya yetecek büyüklükte çelik fabrikaları.

Hidrojenin sıfır karbonlu küresel bir ekonomi içindeki ana rolü, güvenlik ve saflık ile ilgili uluslararası kurallar ve standartlarla kolaylaştırılabilir. Sera gazı emisyon ölçümleri için net standartlar da önemlidir.

Hidrojen kullanımının günümüzün 115 Mt'una göre 5-7 kat artmasıyla toplam nihai enerji talebinin %15-20'sini oluşturan bir hidrojen ekonomisi inşa etmek çok büyük yatırımlar gerektirecektir. Toplamda, yatırımlar bugün ile 2050 arasında yaklaşık 15 trilyon doları bulabilir. Bu yatırımlar 2030'ların sonlarında yıllık yaklaşık 800 milyar dolar ile zirve yapabilir. Bunun yaklaşık 12,5 trilyon doları (%85) elektrik üretiminde gerekli artışla ilgilidir ve bunlar paralel raporumuzda açıklanan büyük doğrudan elektrifikasyon için gerekli yatırımlara ek olacaktır. Bu nedenle, büyük ölçüde genişletilmiş temiz elektrik arzı için açık uzun vadeli stratejiler, doğrudan elektrik ve hidrojenin türetilmiş yakıtlarla birlikte tüm nihai enerji kullanımının %85'inden fazlasını oluşturacağı bir sıfır karbon ekonomisi elde etmek için hayati öneme sahiptir.

Yüzyıl ortası net sıfır ekonomisine giden doğru bir yol, 2030 yılına kadar temiz hidrojen tedarikinde ve kullanımında önemli ölçüde hızlandırılmış bir artış gerektirir. İlerleme, iki kritik boyutta gerçekleşmelidir:

- Temiz hidrojen üretiminin 2030 yılına kadar 50 Mt'a ulaşması, tüm bölgelerde 2 \$ / kg'ın çok altındaki ortalama temiz hidrojen üretim maliyetlerini ortaya çıkması ve 2050 hedefine ulaşmak için kapasite ölçeğinin artırılması gerekir.
- Talebin çoğunluğu (%60+), temel yeni hidrojen kullanımlarının erken ölçeklendirilmesiyle birlikte mevcut hidrojen kullanımlarının dekarbonizasyonundan kaynaklanmalıdır.

Sonuç olarak, hidrojen uygulamasını yürütmek için kamu ve özel sektör, geniş politika enstrümanlarını sektöre özgü müdahalelerle birleştirmelidir. Temel öncelikler şunları içermelidir:

1. İdeal olarak tüm ülkelerde politika yaklaşımının bir parçası olması gereken karbon fiyatlandırması, hidrojen arzının ve potansiyel kullanım durumlarının dekarbonizasyonu için geniş teşvikler sağlar ve temiz hidrojen teknolojileri (ve diğer karbondan arındırma seçenekleri) için fosil yakıt teknolojilerine karşı eşit şartlar yaratır.
2. Aşağıdakilerin bir kombinasyonu aracılığıyla talep artışını desteklemek ve belirli uygulamalarda "yeşil primi"(Green Premium) telafi etmek için sektöre özgü politikalar:

\* "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy", [Energy Transitions Commission](#)

- Düşük karbonlu enerjinin bir yüzdelik kullanımını gerektiren (örneğin, denizcilik veya havacılıkta yakıt zorunlulukları) veya yaşam döngüsü emisyon standartlarını belirleyen yetki ve düzenlemeler;
  - Düşük karbonlu ürün ve hizmetleri satın almak için gönüllü özel sektör taahhütleri (örneğin, düşük karbonlu kamyon ve nakliye taahhüt eden lojistik firmaları);
  - Yeşil kamu ihale politikaları (örneğin, kamu inşaatlarında “yeşil çelik”);
  - Düşük karbonlu ürünlerin “yeşil primi”ni köprüleyecek farklı sözleşmeler gibi mekanizmalar yoluyla hidrojen kullanımı için mali teşvikler.
3. Büyük ölçekli elektroliz üretim ve kurulumunun geliştirilmesi için hedefler ve ilk büyük ölçekli elektroliz üretim ve kurulum projeleri için kamu yatırım desteği.
  4. Üretim, nakliye ve depolama ve kullanım alanlarında temel teknolojileri ve yetenekleri piyasaya taşıyabilmek için kamu desteği ve iş birliğine dayalı özel sektör eylemi.
  5. Ulusal ve yerel hükümet tarafından desteklenen koordineli özel sektör eylemi yoluyla temiz hidrojen sanayi kümelerinin geliştirilmesi.
  6. Güvenlik, saflık ve temiz hidrojen sertifikasyonu ile ilgili uluslararası kurallar ve standartlar.

\* “Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy”, [Energy Transitions Commission](#)