



HİDROJEN ENERJİSİNE GEÇME ZAMANI GELDİ Mİ?

Halim Gürgenci¹

1. GİRİŞ

Geçmişte yapılan girişimlerin aksine, sanki bu sefer, hidrojen enerjisi, eşiği geçecek gibi görünüyor. Bu nedenle, bu yazıda, özellikle iki soruya cevap aradım.

- Hidrojen enerjisi hakkında son zamanlarda tekrar yükselen heyecan bu sefer bir sonuca varabilecek mi?
- Türkiye için bu sektörde fırsatlar nelerdir?

Doktora tezim iki fazlı akışkanlarda yüksek ısı transferi halinde ortaya çıkabilen ve daha çok nükleer güç santrallerinde görülen bir problem olan dengesizlikler ("instabilities") üzerine idi ama doktora hocamın (Nejat Veziroğlu) o zamanlar esas ilgi duyduğu alanın hidrojen enerjisi olduğunu hatırlıyorum. Aradan 40 sene geçmesine ve ilerleyen yaşına karşın bu konudaki çalışmalarını hâlâ büyük

bir hevesle sürdürdüğünü duyuyorum zaman zaman. O yıllarda, yani 1980'lerin başında, dünya fosil yakıtlara yüz çevirip hidrojen enerjisine geçti geçecek diyenler az değildi. Ben ise, hidrojen enerjisi konusunda o kadar iyimser değildim o zamanlar.

Şimdi bakıyorum, Three Mile Island ve hele Chernobyl kazaları sonrası, nükleer enerji üzerine kamuoyunda doğan kaygıların artması ile, benim doktora tez konuma ilgi giderek azalırken, hidrojen enerjisi çalışmaları bazen yavaş, bazen hızlı olmakla birlikte, kesilmeksizin devam etti gitti. Hidrojen enerjisinin yıllardır tartışılan, çok şeyler vadetmesine karşın istenilen ölçüde yaygınlaşamayan, ama üzerindeki ilginin de hiçbir zaman kaybolmadığı bir teknoloji alanı olduğunu söyleyebiliriz. Şimdi biraz da günümüzdeki gelişmelere bakalım.

¹ Emeritus Professor of Mechanical Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Avustralya - h.gurgenci@uq.edu.au.
Blog sayfası : <https://halimgur.substack.com/s/genel>

2. ROLLS-ROYCE, HİDROJEN ÜRETİM SEKTÖRÜNE GİRİYOR

Birkaç gün önce, bu konuda okuduğum bir haber[1], böyle bir yazı yazma arzusu doğurdu bende. Haber şöyleydi:

'Hidrojen üretimi işine giren Rolls-Royce Power Systems, "başlangıçtan itibaren birkaç megavat güce sahip elektrolizörleri piyasaya sürmeyi" planlıyor'. Şirket, Alman elektroliz imalatçısı Hoeller Electrolyzer'ın %54 çoğunluk hissesini satın aldı.

Rolls-Royce firmasının hidrojen stratejisinde, rüzgar ya da güneş yoluyla elde edilen ve gereksinimin üzerinde olan elektrikle, su elektroliz edilerek üretilen hidrojen, tanklarda depolanacak ve gerektiğinde, depolanmış hidrojen ısı hücreleri ("fuel cell") kullanılarak yeniden elektrik üretilmektedir (Şekil 1).

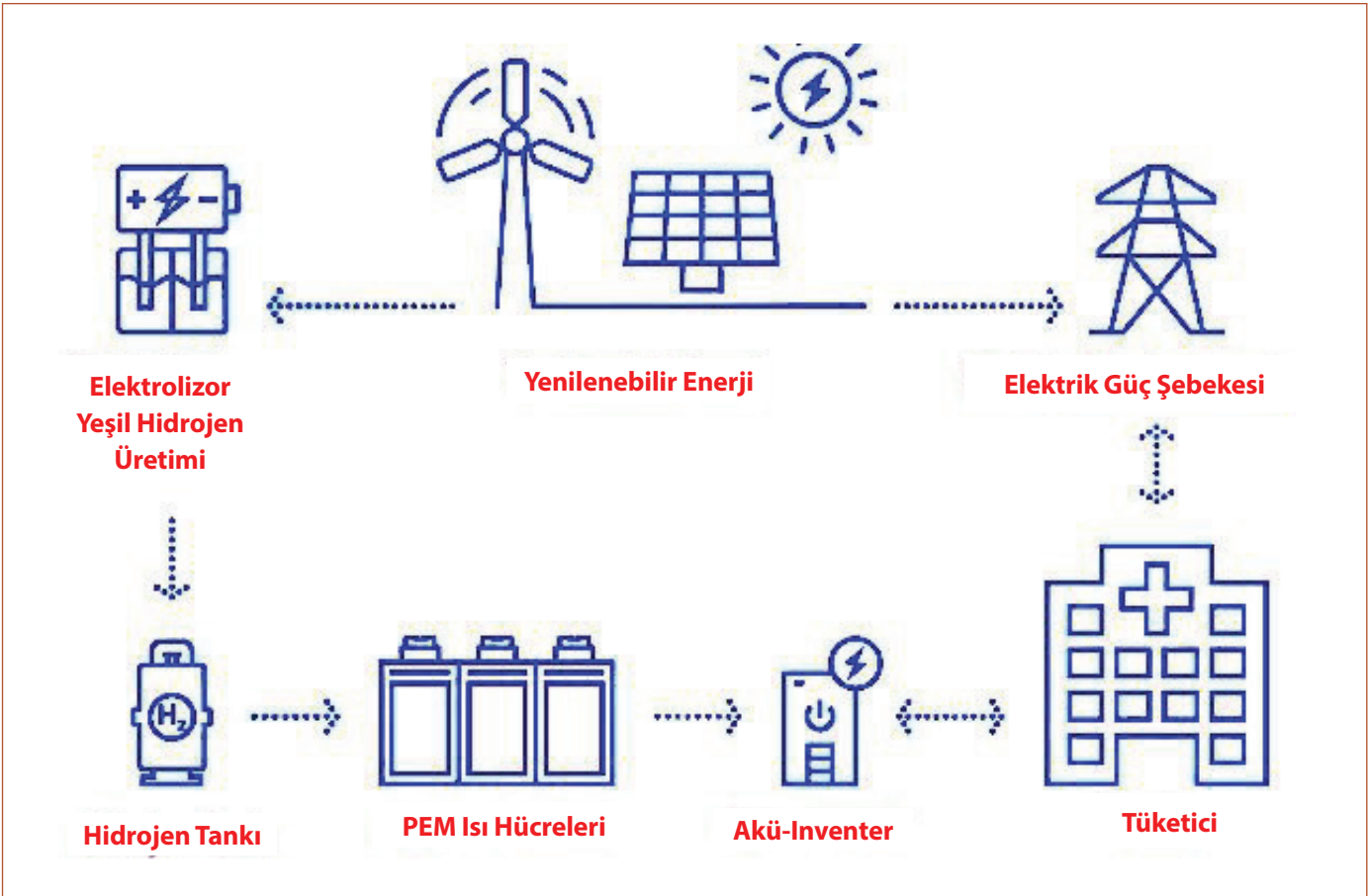
Rolls Royce ve bazı başka büyük firmalar, bence şu anda hidrojen enerjisinin geleceğine yatırım yapıyorlar. Yoksa,

bugünkü hidrojen enerji teknolojisi sınırlı birkaç uygulama dışında rekabetçi değil. Bu cümlemi biraz daha açmak istiyorum.

3. GİRDİ – ÇIKTI VERİMLİLİK FAKTÖRÜ ("ROUND TRIP EFFICIENCY")

Hidrojen doğrudan bir doğal kaynak değil. Yeraltına kuyu kazıp doğal gaz gibi yüzeye çıkaracağımız hidrojen havzaları yok. Dünya üzerinde hidrojen çok ama hep başka elemanlarla kimyasal bileşim içinde. Bunların başında da su geliyor: H₂O, yani iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomunun bileşimi. Hidrojen atom ağırlığı 1, oksijeninki ise 16 olduğuna göre, 1 kg su içindeki hidrojen miktarı 2/18 ya da 0,1111 kg. Doğal gazda (CH₄) oran olarak biraz daha fazla (4/16 ya da 0,25 kg).

Jüpiter gezegenine gidip oradan hidrojen toplamayı düşünmüyorsak, hidrojen elde etmenin tek yolu bu kimyasal bileşimleri atomlarına ayırıp hidrojen atomlarını ayır



Şekil 1. Rolls-Royce Firmasının Hidrojen Stratejisi

saklamak. İşte sorun burada başlıyor. Hidrojeni ayırmak için harcanan enerji, ayrıştırılan hidrojenden elde edilebilecek enerjiden fazla.

Amaç hidrojen ise, bunun ucuz yolu doğal gazı ya da kömürü dönüştürmek. (Fosil yakıtlardan üretilen hidrojene gri hidrojen deniyor ve Economist dergisinde geçen sene yayınlanan bir makaleye[6] göre üretim maliyeti 1 USD/kg).

Amaç, hidrojeni bir yenilenebilir enerji deposu ve taşıyıcısı olarak kullanıp fosil yakıtları devreden çıkarmaksa, o zaman en geçerli yöntem hidrojeni suyun elektrolizi yolu ile üretmek. Bu konuda değişik çalışmalar yapılıyor. Örneğin ısı ayrıştırma ("thermal splitting") gibi başka yöntemler de araştırılıyor ve bu yöntem belki ileride gündeme gelebilir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojene yeşil hidrojen deniyor ve yine Economist dergisinde geçen sene yayınlanan bir makaleye göre[6] üretim maliyeti 4-5 USD/kg. Ancak yakın gelecekte, yenilenebilir enerji kaynaklarının bol olduğu yerlerde (örneğin Batı Avustralya) 1-2 USD/kg'a kadar inmesi bekleniyor.

Elektrik enerjisi harcayarak suyu hidrojen ve oksijen atomlarına ayırdıktan sonra hidrojeni tankta depolayıp

gerektiğinde Yakıt Hücresi ("PEM Fuel Cell") ile tekrar elektrik üretilmesine çalışılıyor. Yakıt hücresinden elde ettiğimiz elektrik (üretilen elektrik, W_g) her zaman elektroliz için harcanandan (tüketilen elektrik, W_e) az oluyor. Mevcut teknolojiyi kullandığımızda, giren enerji ile çıkan enerji arasındaki farkı hesaplayalım.

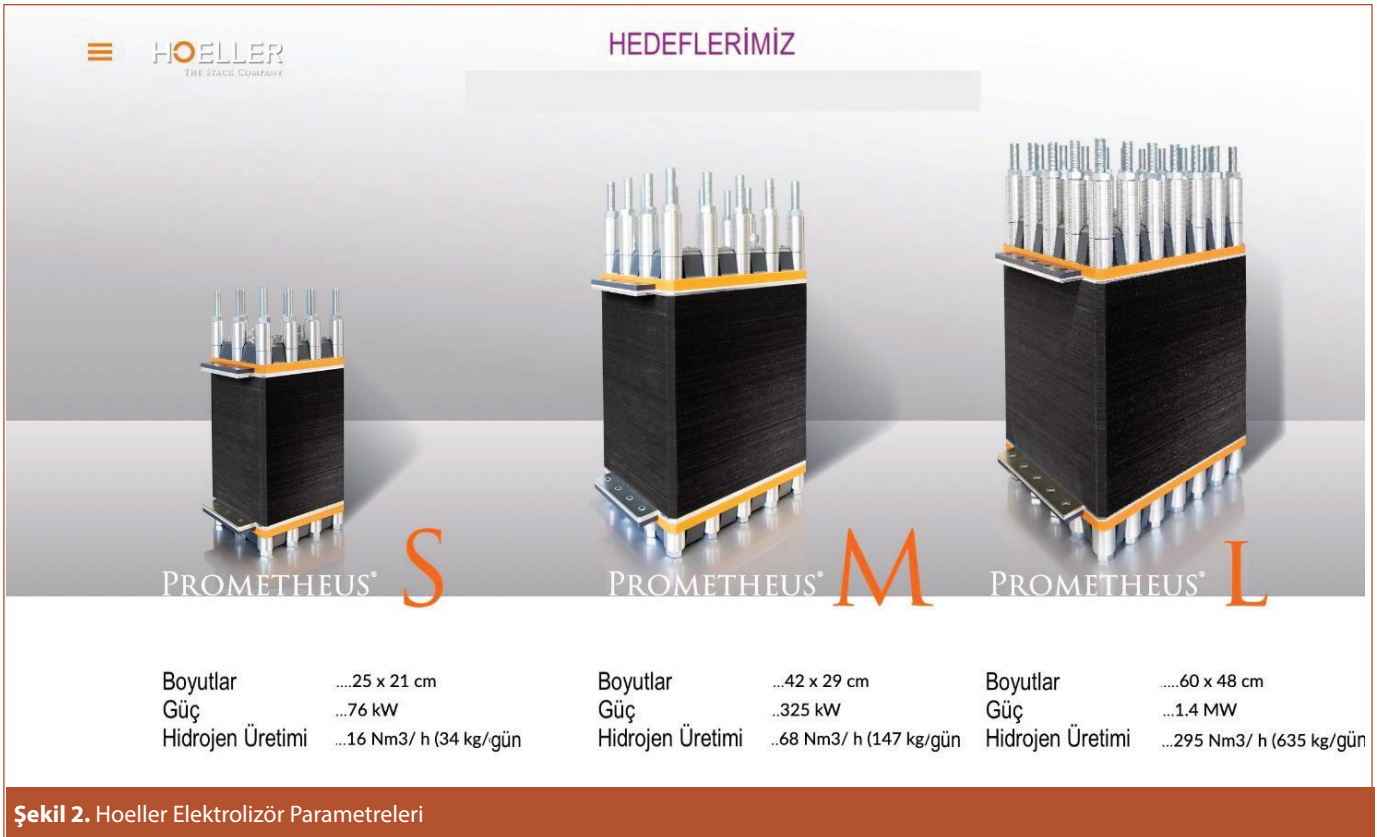
Rolls-Royce'un kullanacağı Hoeller elektrolizörlerinin, web sitelerinde [7] yapılan tanımlaması, Şekil 2'de gösterilmiştir.

En sağdakini (L) alırsak,

- Harcanan elektrik, $W_e = 1.4 \text{ MW} = 1400 \text{ kW}$
- Bu elektrik harcaması ile üretilen hidrojen, $Q = 295 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- Üretilen hidrojenin ısı değeri, $H = Q \times \text{LHV} = 295 \times 2.78 \text{ kW} = 820 \text{ kW}$

LHV ("Lower Heating Value") = 2.78 kWh/Nm^3 — 1 Nm^3 hidrojeni yakınca elde edilen ısı (su buharıyla kaçan ısı hariç).

Nm^3 = Normal metreküp; yani 1 atmosfer basınç, 0°C , kuru gaz metre küpü.



- Elektroliz verimliliği (hidrojen ısı değerinin harcanan elektriğe oranı) = $820/1400=58\%$

Yani daha hidrojeni üretirken, koyduğumuz enerjinin %42'sini kaybediyoruz. Hidrojeni tekrar elektriğe çevirirken kullanılan hidrojen türbini (ya da yakıt hücresi) verimlilikleri de taş çatlasa %65'i geçmeyecektir. O zaman $H = 820 \text{ kW}$ 'lık hidrojeni tekrar elektriğe dönüştürdüğümüzde elimize ancak $W_g = 820 \times 0,65 = 533 \text{ kW}$ geçer. İkisini birleştirirsek, hidrojenden ürettiğimiz elektrik ile elektroliz sırasında harcanan elektrik oranına round-trip (girdi-çıkı) verimliliği diyoruz.

$$\eta_{rt} = \frac{W_g}{W_e}$$

Yukarıdaki hesaba göre bu oran $533/1400 = 0,38$ yani %38 oluyor.

38 bana çok düşük geldi. Bu rakamın elektroliz ve jenerasyon verimliliklerinin çarpımı olarak da ifade edebiliriz:

$$\eta_{rt} = \eta_e \times \eta_g$$

Elektroliz verimliliği Jeneratör verimliliği

Jeneratör verimliliğini arttırmak bence zor. Yukarıda kabul ettiğim %65 oranı bile, iyimsen bir oran bence.

Sonuç olarak, hidrojenin sabit elektrik depolamasının, diğer depolama yöntemlerinin önüne geçmesi için elektroliz verimliliğinin artması lazım. Bu yönde çok araştırma yapılıyor ve şu anki sonuçlar umut veriyor. Örneğin, Nature Communications dergisinin Mart 2022 sayısında yayınlanan bir makalede [2], Avustralya Wollongong Üniversitesinden bir ekip, kılcal kanallar kullanarak tasarlanan bir elektrolizörde verimliliğin %98 olacağını iddia ediyor. İnanılır gibi değil ama ya tutarsa!

Elektroliz verimliliğini arttırmaya yönelik başka bir çok makale var, en iddialısını aktardım burada. Bunların tümü laboratuvar çalışmaları. Ne zaman ticari ürün olarak ortaya çıkar bilmiyorum.

Elektrolizde ciddi verimlilik artışları elde edilene kadar, sabit depolama (yani gereğinden fazla olan elektriğin, ar-

zın talebin altında kaldığı bir zamanda kullanılmak üzere saklanması) alanında hidrojen enerjisinin pazar olanakları bence sınırlı. Aynı işi görecektir, girdi-çıkı verimliliği hidrojenenden daha yüksek ve maliyeti daha az seçenekler var çünkü.

4. ULAŞIM SEKTÖRÜNDE HİDROJEN

Ulaşım sektöründe durum biraz farklı. Atıksız ulaşım yakıtı olarak hidrojen dışında iki seçenek daha var.

İkisinin de değişik sorunları var. Bunlar:

- biyoyakıt
- elektrik (Lityum iyon pili ya da benzeri yolu ile)

4.1 Biyoyakıtlar

Bu birinci seçeneği ikiye ayırabiliriz:

- (a) mısır ve şeker kamışından üretilen etanol;
- (b) yosundan üretilen yakıtlar.

Mısır, şeker kamışı ya da onun gibi nişastalı ya da şekerli ürünlerden çıkarılan etanol kökenli biyoyakıtlar bence sürdürülebilir değil. Dünyada zaten bir açlık sorunu varken tarıma elverişli sınırlı alanlarda yetiştirdiklerimizi araba motorlarında yakmak etik değil; ayrıca, devlet teşvikleri olmazsa ticari de değil (ABD ve bazı başka ülkelerde, tarımsal sektörden oy almak için mısırdan etanol üretimi için çiftçilere devlet yardımı yapılıyor).

Yosundan yakıt üretimiye şu anda henüz gelişmiş bir teknoloji değil ve maliyeti hakkında ciddi bir kestirimde bulunmak olanaksız.

4.2 Elektrikli Taşıtlar

İkinci seçenek, yani elektrikli arabalara karşı hidrojenin bir avantajı var mı bilmiyorum. Binek arabalarında, Toyota dışındaki otomobil üreticileri kartlarını elektrikten yana oynuyor gibi. Çoğunluğun elektrik motoru tercihinin sebebi bence maliyetten çok kullanım kolaylığı ve güvenlik kaygıları.

Yoksa Economist dergisinin[6] Morgan Stanley kuruluşuna atıfla yakın gelecek için tahmin ettiği yeşil hidrojen maliyeti 1 USD/kg. Buna göre, bir kilo hidrojenin enerji değeri yaklaşık olarak 1 Amerikan galonu (3,78 litre) benzinle eş değerli olduğuna göre, bu pahalı değil aslında. Bu nedenle Toyota dışındaki otomobil sektörünün elektrikli

motor tercihini maliyet dışı kaygılara bağlıyorum. Geçen hafta izlediğim bir videoda, hidrojenle çalışan bir Toyota otomobilinin yakıt depolama basıncının 70 MPa olduğunu öğrendikten sonra, bu kaygıları ben de temelsiz görmüyorum.

Ben, yüksek tonajlı kamyon, gemi ve uçaklarda hidrojenin geleceğini daha parlak görüyorum. Örneğin, Queensland Airlines'ın bir reklamında, benim yaşadığım Queensland eyaletinde, her ne kadar hâlâ çözüm bekleyen bazı sorunlar olsa da, hidrojenle çalışan bir uçağın 2026 senesinde



Şekil 3. 2026'da Cairns - Cape York Seferlerine Başlayacağı Söylenen Hidrojen Yakıtlı Stralis Beechcraft 1900D Uçağı

seferlere başlama planları yaptıklarını öğrendim [3].

Aynı dokümanda, 19 yolcu kapasiteli bu uçağın tasarımı Şekil 3'teki gibi verilmiş.

Sonuç olarak, hidrojenle çalışan otomobillerin yakın gelecekte yaygınlaşacağını sanmıyorum ama kamyon, gemi ve uçaklarda daha bugünden başlayan uygulamalar var ve artacağa benziyorlar.

Ulaşım sektörünün diğer elemanı trenler için, elektrik halinde fosil yakıtların rakipsiz tek alternatifi olmaya devam edecek. Hidrojenle çalışan tren göreceğimizi sanmıyorum.

5. ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN

Enerji taşıyıcısı derken, bir ülkeden bir başka ülkeye enerji naklini kastediyorum. Tıpkı, gaz ve petrolün, borularla ve gemilerle taşınması gibi. Güneş taşınmaz ama güneşten elde edilen enerji taşınabilir. Bu taşıyıcı, hidrojen olabilir mi?

Batı Avustralya'da AREH isimli bir firma, güneş enerjisi ile hidrojen üretilip satmayı amaçlıyor. Yılda yaklaşık 1,6 milyon ton yeşil hidrojen veya 9 milyon ton yeşil amonyak üretme kapasitesi hedefleniyormuş. Geçen ay BP ("British Petroleum"), AREH'in %40 hissesini satın aldı. Henüz ciddi bir yatırım olmadı, hepsi planlama aşamasında.

Buna benzer bir senaryo Çin için de geçerli. Çin'in batısında güneş enerjisi bol ama nüfus ve enerji talebi Doğu Çin'de. Batıdan doğuya enerjiyi hidrojen boru hatları ile taşımaktan bahsediliyor ama şu anda kesin başlamış bir proje yok.

Bana sorarsanız, sanki elektriği doğrudan HVDC ("High Voltage Direct Current") hatları ile taşımak daha akıllıca gibi geliyor. HVDC hat fiyatları ucuz değil (1 milyon USD/km gibi), ama kayıp, hidrojendeki yüzde 62'nin çok altında. Hidrojeni taşımak da ayrıca doğal gaz taşımak kadar kolay değil. Paslanma ve kaçak sorunları var. Belki deniz ötesi enerji taşımada hidrojen elektrik hattı döşemeye göre daha cazip geliyor.

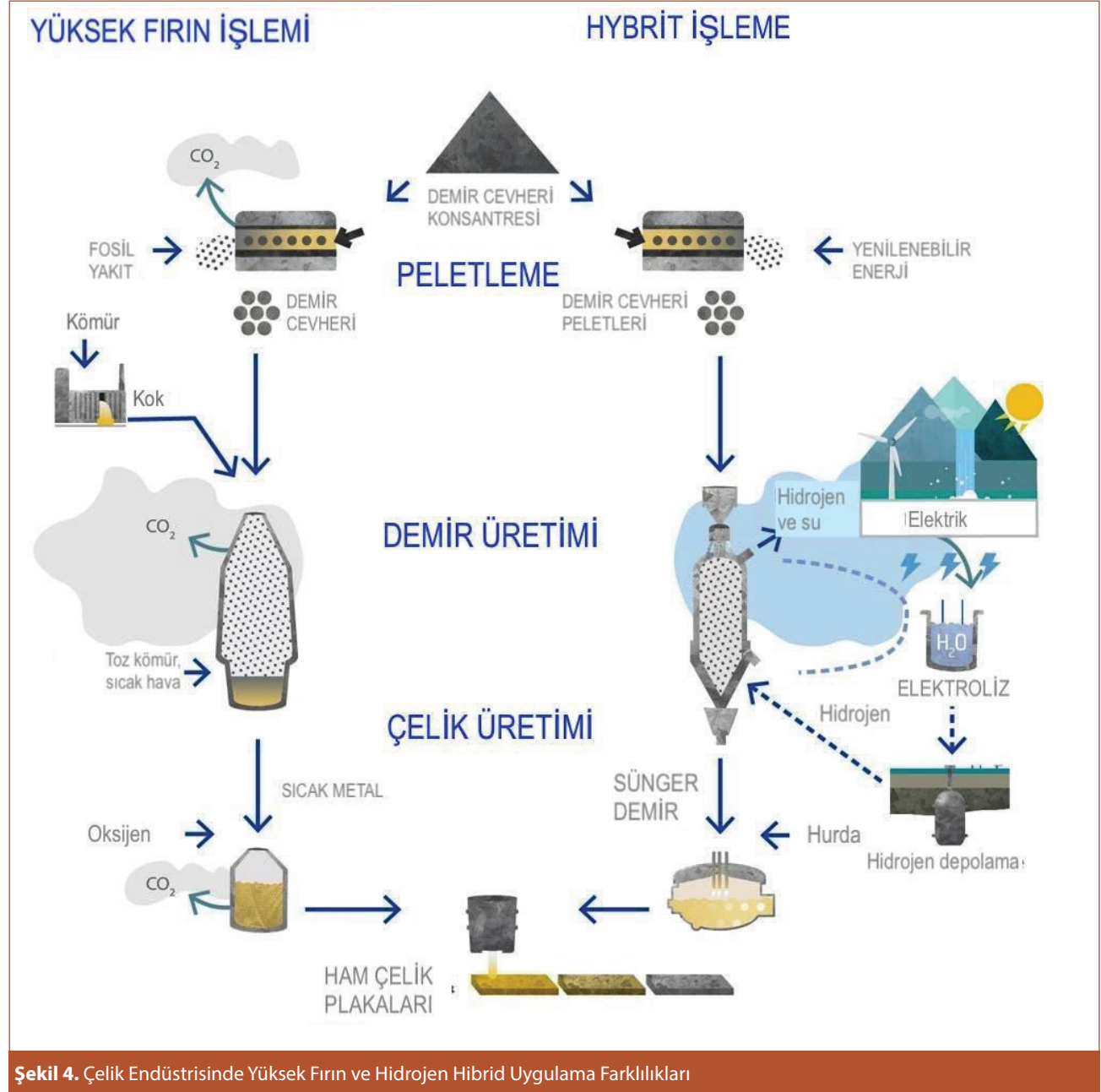
Bu konular araştırılmaya devam ediyor. HVDC hat maliyetlerine göre, taşıyıcı olarak elektrik yerine hidrojen kullanmak bazı şartlarda daha ehven olabilir belki.

6. HİDROJENİN DOĞRUDAN KULLANIMI

Bir de hidrojenin bir yakıt değil de kimyasal bir eleman olarak kullanıldığı ve kullanılabileceği yerler var. Bunlardan, CO₂ atıklarını azaltma potansiyeli en fazla olan sektör, çelik üretimi. Kok kömürü yerine hidrojen kullanacak çelik üretim teknolojileri artık pilot üretim aşamasına geldiler. Bunların içinde sonuca en yakın olanı, üç İsveç firmasının üzerinde çalıştığı HİBRİT teknolojisi.

Forbes dergisinde 19 Ağustos 2021 de yayınlanan bir makedede[8], İsveç Sanayi ve İnovasyon Bakanı İbrahim Baylan'ın bu teknolojiye verdiği öneme değinilirken, hidrojenle üretilen çeliğin 2026'dan itibaren piyasaya sürüleceği söyleniyordu.

Önümüzdeki on yılda, çelik üretiminde bir teknoloji devrimi yaşanacağını bekliyorum.



Şekil 4. Çelik Endüstrisinde Yüksek Fırın ve Hidrojen Hibrid Uygulama Farklılıkları

7. TÜRKİYE İÇİN HİDROJEN ENERJİSİ

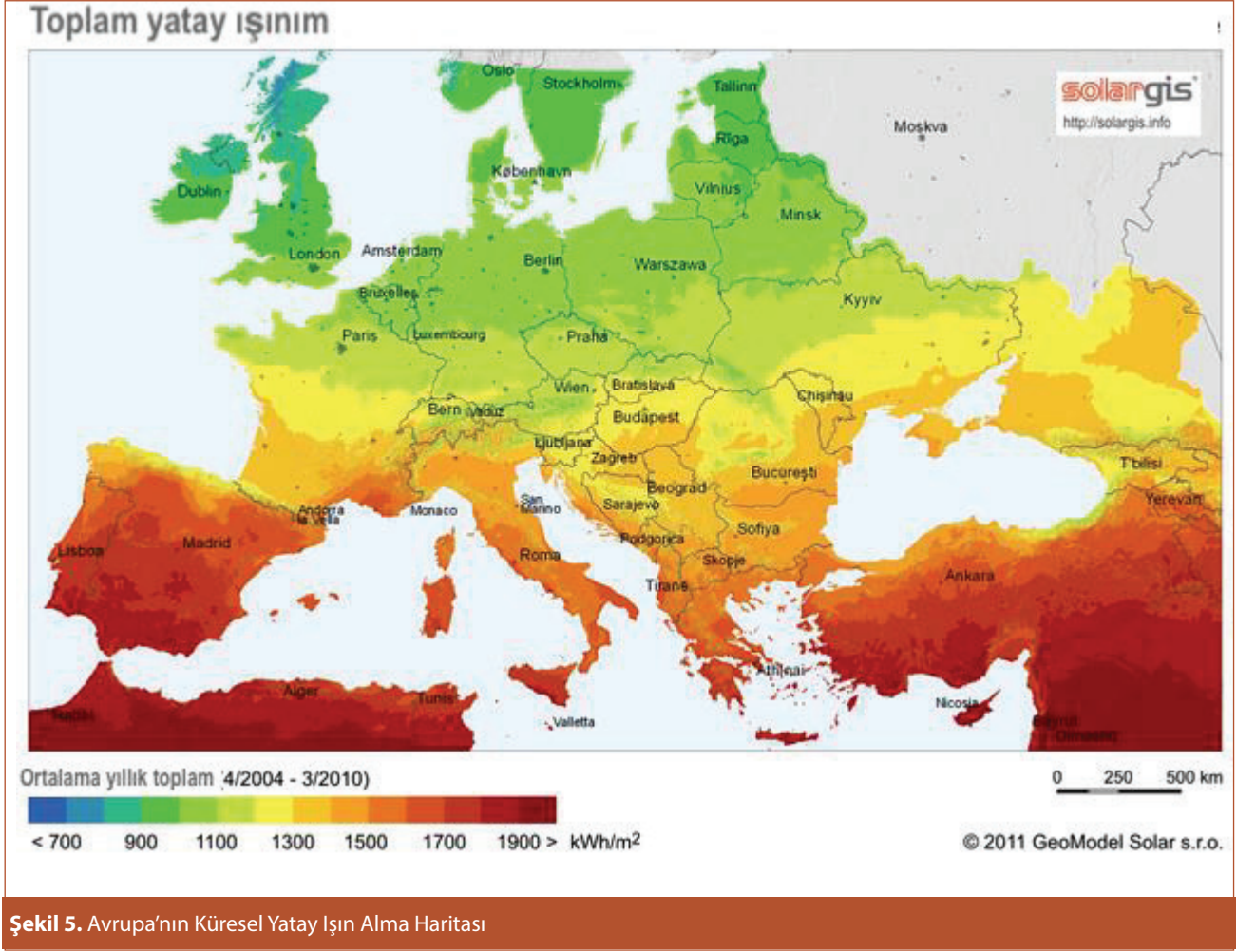
Çeşitli sektörlerde, hidrojenin rekabet şansını yukarıda irdelemeye çalıştım. Türkiye için aklıma gelenleri ve bu konudaki görüşlerimi günümüzde kanıtlanmış teknolojilerle sınırlandırarak, yazacağım şimdi.

Türkiye’de büyük barajlar var ve bu barajlar debi azlığından nadiren tam dolulukta çalışıyor diye biliyorum. O yüzden, sabit elektrik depolamaya gereksinim duyulursa, suyu barajlardan yukarı pompalayarak hidroelektrik po-

tansiyel enerjiye çevirmek en uygun seçenek bence. Kömür ve gaz yakarak üretilen elektriği, yüzde 62 kaybı göze alarak, hidrojene çevirmek akıl karı bir iş değil.

En uygun çözüm güneş gibi gözüküyor. Hidrojen üretmek için Türkiye coğrafyasında güneşi bol olan bölgeler var. Örneğin Şekil 5’teki haritada, Güney ve Güneydoğu Anadolu, Avrupa’da güneş enerjisi arzında başı çeken Güney İspanya’ya eşdeğer gibi gözüküyor [9].

Bu haritaya bakınca, kendime ‘bu harita doğru mu’ diye



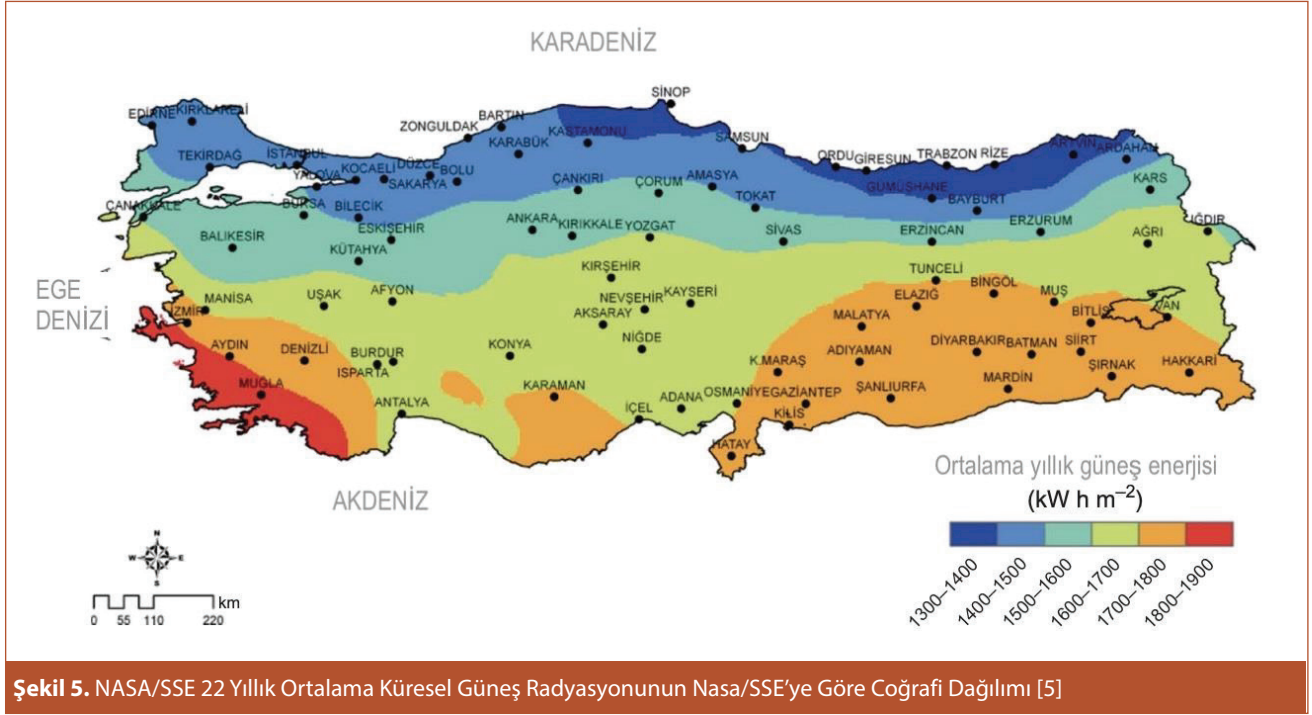
Şekil 5. Avrupa'nın Küresel Yatay Işın Alma Haritası

sormadan edemedim. Bu haritanın, hepsi değilse bile en azından Türkiye ve Suriye taraflarının doğruluğu konusunda emin değilim. Enlem ve boylama göre atmosferin üstüne düşen güneş enerjisinin, uydu fotoğrafları ile takriben saptanan bulutluluk ve diğer hava faktörlerini de işin içine katarak düzeltilmesi, yani son aşamada modelleme ile üretilmiş bir harita gibi geldi bana.

Bir başka kaynak olarak, 2011 senesinde yayınlanan bir makaleyi okudum. Devlet Meteoroloji Ofisi uzmanı Bülent Aksoy imzalı bu makalede[10], Türkiye genelinde yapılan doğrudan güneş enerji ölçümlerinin bir güneş kaynak haritası yaratacak yeterlilikte olmadığını belirtiyor. Aksoy'un NASA/SSE ("The National Aeronautics and Space Administration" - Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi / "Surface Meteorology and Solar Energy" - Yüzey Meteorolojisi ve Güneş Enerjisi) verilerini kullanarak hesapla-

dığı sayılara göre Türkiye güneş potansiyeli Şekil 6'daki gibi imiş.

Şekil 5 ve Şekil 6 haritaları arasında büyük bir fark yok ama Aksoy'un haritası bence daha güvenilir bir harita. Muğla civarı, Karaman'ın güneyi ve Hatay'dan başlayarak tüm Güneydoğu Anadolu'da hatırı sayılır güneş parlaklığı ("irradiance") olduğu çok olası. Ancak, bir bölgenin güneş enerji potansiyelini değerlendirebilmek için, güneş parlaklığı dışında başka faktörleri de irdelemek lazım. Örneğin Muğla yöresi, Şekil 6'da kıpkırmızı gözüküyor ama yerleşim yoğunluğu, bitki örtüsü ve engebeli arazi göz önüne alındığında, Muğla civarında büyük güneş santralleri kurmaya elverişli saha sayısı kısıtlı olabilir. Tarım ve başka amaçlarla kullanılmayan, topoğrafyası uygun alanlar olarak bakıldığında, Türkiye'deki güneş enerji potansiyelinin yukarıdaki haritalarda gözüktüğü



Şekil 5. NASA/SSE 22 Yıllık Ortalama Küresel Güneş Radyasyonunun Nasa/SSE'ye Göre Coğrafi Dağılımı [5]

kadar olmadığı üzerine bir Avrupa Birliği araştırma raporu okumuştum ama o raporu şimdi bulamadım.

8. SONUÇ

Şekil 5'ten benim çıkardığım sonuç şu şekildedir. Türkiye eğer iç ve dış pazarlar için hidrojen üretmek istiyorsa, bunun Suriye ile birlikte yapılması en uygunu olur. Teknolojinin bir kısmı ve proje mühendisliği Türkiye'den, saha Suriye'den. Bazı siyasi engeller aşılabildiği takdirde bu, her iki ülke için muazzam bir proje olur. Bu konunun daha ayrıntılı irdelenmesi için ayrı bir değerlendirme yapmak gerekir düşüncesindeyim.

KAYNAKÇA

1. <https://www.powerengineeringint.com/hydrogen/rolls-royce-breaks-into-hydrogen-production/>, (son erişim tarihi:27.07.2022)
2. **Hodges, A., Hoang, A.L., Tsekouras, G. ve arkadaşları.** 2022. "A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen". Nat Commun 13, 1304. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28953-x>, Son erişim tarihi:27.07.2022
3. "Queensland Airline Skytrans unveils plans for Australia's first hydrogen-fuelled plane" | Air transport | The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2022/jun/30/queensland-airline-skytrans-unveils-plans-for-australias-first-hydrogen-fuelled-plane> Son erişim tarihi: 20.07.2022
4. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15359738>, Son erişim tarihi: 20.07.2022
5. **Aksoy, B.** 2011. "Solar radiation over Turkey and its analysis", International Journal of Remote Sensing, DOI:10.1080/01431161.2010.508056
6. The Economist, <https://www.economist.com/briefing/2021/10/09/creating-the-new-hydrogen-economy-is-a-massive-undertaking>, Son erişim tarihi: 20.07.2022
7. <https://hoeller-electrolyzer.com/eng/our-objectives.html> . Son erişim tarihi: 20.07.2022
8. <https://www.forbes.com/sites/davidrvetter/2021/08/19/how-sweden-delivered-the-worlds-first-fossil-fuel-free-steel/?sh=6000b13e6b55> Son erişim tarihi: 20.07. 2022
9. By SolarGIS © 2011 GeoModel Solar s.r.o., CC BY-SA 3.0
10. **Bülent Aksoy** (2011): Solar radiation over Turkey and its analysis, International Journal of Remote Sensing, DOI:10.1080/01431161.2010.508056