HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ DERNEĞİ

TÜRKİYE İÇİN HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ YOL HARİTASI

Prof. Dr. İbrahim Dinçer
Prof. Dr. İnci Eroğlu
Merve Öztürk

ISBN: 978-605-66381-9-0

İstanbul – 2021

TÜRKİYE İÇİN HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ YOL HARİTASI

Prof. Dr. İbrahim Dinçer
Prof. Dr. İnci Eroğlu
Merve Öztürk

ISBN: 978-605-66381-9-0

İstanbul – 2021

ÖNSÖZ

Gelişen ekonomilerde nüfus artışı ve yaşam standartlarındaki değişiklikler, dünya ekonomilerinin üretim altyapısı üzerinde benzeri görülmemiş bir baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle, sentetik malzemelere, yakıtlara, güce ve ısıl enerjiye olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmaktadır. Günümüz dünyasında bu ihtiyacı karşılayacak fosil yakıtların tükenmesi ve küresel ısınmanın artması nedeniyle fosil yakıtsız, temiz, verimli ve sürdürülebilir enerji kaynakları ve teknolojileri için güçlü bir talep mevcuttur. Bu bağlamda hidrojen, emisyonların azaltılması, enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik için hayati bir enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Hidrojen, günümüzün ve geleceğin birincil yakıtı olarak kabul edilmekte ve fosil yakıtların mevcut mirasını tamamen ortadan kaldırmakta, dünya çapında ekonomik ve çevresel koşulları iyileştirme ümidini de beraberinde getirmektedir.

Karbon çağını arkamızda bırakıp hidrojen çağına geçmemiz gereken kritik bir dönemde bulunmaktayız. Hidrojen dünya çapında benzeri görülmemiş bir ivme kazanmıştır ve temiz bir enerji çözümü olarak hidrojenin potansiyelini kullanabilmek için bir yol haritasına gereksinim bulunmaktadır. Bu rapor, hazırlandığı tarih itibariyle hidrojen teknolojilerinde ülkemizin nerede olduğunu gösteren kapsamlı ve bağımsız bir değerlendirmeyi ve hidrojenin potansiyelini temiz, güvenli ve düşük maliyetli bir enerji geleceğine ulaşabilmek için nasıl kullanmamız gerektiğini sunmaktadır.

Bölüm 1'de, sanayi devrimi ile artan fosil yakıt kullanımının etkisi ve COVID-19 salgını ile hidrojen enerjisi arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 21. yüzyılın neden hidrojen çağı olarak ele alındığı ve bu çağın beraberinde getireceği faydalar üzerinde durulmuştur. Bölüm 2'de hidrojen spesifik olarak ele alınmıştır ve detaylı özellikleri verilmiştir. Hidrojen ekonomisi için gerekli olan kaynak, sistem, faydalı çıktılar, standartları geliştirme, kapsam, insan kaynağı, ölçek büyütme, güvenlik, planlama, sektörler, çözümler, iş birliği, sübvansiyon, altyapı, strateji geliştirme, destekler, sürdürülebilirlik ve teşvik kriterleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bölüm 3'te hidrojen üretim teknolojileri ve bunların sınıflandırılması sunulmaktadır. Elektroliz yöntemi, kimyasal yöntemler, termoliz yöntemi, termokimyasal yöntemler, fotoliz yöntemleri, biyokütleden ısıl işlemle hidrojen gazı üretimi, ısıl işlemsiz biyolojik hidrojen gazı üretim yöntemleri ve doğal gazın reformu ile hidrojen üretimi açıklanmıştır. Bölüm 4'te hidrojenin depolanmasının gerekliliği, yöntemleri ve farklı depolama teknolojilerinin gelecek hedefleri ele alınmaktadır. Bölüm 5'te hidrojenin sektörel olarak nerelerde ve nasıl kullanıldığına dair bilgiler verilmektedir. Bu bölümde ayrıca Konya şehri Karatay ilçesinde Gazbir-Gazmer firmasının kurmuş olduğu hidrojen ve doğal gazın karıştırılıp evsel cihazlara beslenmesi ile ilgili vaka çalışması açıklanmıştır.

Bölüm 6'da hidrojenin enerji seçeneği olarak kullanımında büyük rol oynayan yakıt hücresi teknolojilerinin, sınıflandırılması ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bölüm 7'de hidrojenin üretim ve kullanım istatistikleri toplanmış ve detaylı olarak sunulmuştur. Bölüm 8'de Türkiye'deki hidrojen ile ilgili araştırma, yenilik ve teknoloji geliştirme çalışmaları sunulmuştur. Bölüm 9'da inovasyona dayalı ekonomi ve toplum hedefi kriterleri açıklanmış ve bir ülke için uygulanması gereken yol haritası döngüsü tanımlanmıştır. Bölüm 10'da hidrojen ekonomisi için gelecek hedefleri ve stratejik planlamalar tanımlanmıştır. Bölüm 11'de sonuçlar ve önerilerden bahsedilmiş ve son olarak çalışmalarda kaynak olarak gösterilen referanslar sunulmuştur.

Bu rapor, okuyucuya 21. yüzyıla katkıda bulunması beklenen hidrojen için kullanılan tüm önemli kavramlar ve teknolojilere giriş sağlamak için hazırlanmıştır. Bu raporun yeni bir pencere açacağı ve Türkiye'de hidrojen teknolojileri için bir yol haritası olacağı umulmaktadır.

ÖZET

Daha sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişte hidrojenin potansiyel rolü, son yıllarda küresel olarak büyük ilgi görmektedir. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, sürdürülebilir enerjinin temeli olarak kabul edilmektedir. Ancak hidrojen, diğer enerji türleriyle ve onların uygulama teknolojileriyle rekabet etmektedir. Bu durumda, hidrojenin geleceğin küresel enerji sisteminde öncü bir rol oynayıp oynayamayacağı sorusu ortaya çıkmaktadır.

İnsanoğlunun hidrojen ile tanışması elli yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Aya yolculuk yapan Apollo 11, elektrik ve suyu hidrojenle çalışan bir yakıt hücresi sisteminden sağlamakta ve roketleri itmek için yakıt olarak sıvı hidrojen kullanmaktaydı. Özellikle COVID-19 salgınıyla birlikte işsizlik sorunları gündeme gelmektedir. Hidrojen, sektörel anlamda birçok iş imkânı sağlama ve aynı zamanda yeni sektörler oluşturma kabiliyetine sahiptir. Gıda, ulaşım ve ziraat gibi sektörler hidrojen ile daha temiz ve çevre dostu bir boyuta kavuşacaktır. Hidrojene geçişte bütün sektörler yeniden dizayn edilecek ve endüstri artık hidrojenin etrafında şekillenecektir. Bu nedenlerle, ekonomik olarak başarıyı yakalamak isteyenler için hidrojende başarıyı yakalamak bir nevi ön şart olacaktır. Hidrojenin bir diğer avantajı ise ülkelerin kendi kendine yetebilirliğini sağlayabilecek olmasıdır. Özellikle Türkiye gibi enerji açısından dışarıya %90'a uzanan rakamlarda bağımlı olan ülkelerin bu bağımlılığını azaltması ve enerji güvenliğini sağlaması, hidrojen ekonomisinin oluşturulması ve buna bağlı olan sektörlerin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Bu sektörlerin geliştirilmesinde temel olarak iki önemli adım mevcuttur. Bunlardan birincisi yenilenebilir enerjiden, ikincisi ise atık sulardan hidrojen üretilmesi seçenekleridir. Atık sular arıtılırken içeriğindeki maddi değeri yüksek olan kloru ayrıştırıp faydalı bir kimyasal madde olarak ilgili sektörlerde kullanmak da mümkündür.

Türkiye'de %100 yenilenebilir enerjiden hidrojen üretimi mümkündür, yani hidrojen ekonomisinde sıfır bağımlılık hedeflenmelidir. Ülkemizde 2030 yılına kadar hidrojene geçiş süreci ile yaklaşık olarak 250 milyar TL'lik bir gelir beklenmektedir. Ayrıca hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde yaklaşık 170.000 istihdam oluşacağı düşünülmektedir. 2030 yılına kadar doğal gaz kullanılan tüm sektörlerde doğal gaza hacimsel olarak %20 hidrojen karıştırılması ile ömür çevrim analizleri sonuçlarına göre CO_2 emisyonları %18,5 azalırken, NO_x ve SO_2 emisyonları %17,5 ve %16,6 oranında azalacaktır. Bu, hidrojenin karbonsuz olması, kükürt ve azot gibi bileşenleri bünyesinde bulundurmamasının doğal bir sonucudur.

Türkiye'de Hidrojen Teknolojileri Derneği, hidrojen enerji teknolojilerinin araştırılması ve geliştirilmesinde yıllardır aktif olarak çalışmaktadır. Bu raporda, öncelikle hidrojen elementi, özellikleri ve tarihsel perspektifleri tartışılmaktadır. Ardından, hidrojen üretimi için mevcut ve gelecekteki teknolojileri/süreçleri ve kaynak malzemeleri incelenmektedir ve farklı üretim yöntemlerinin enerji gereksinimleri ve sera gazı emisyonları karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, hidrojen lojistiği de araştırılmıştır. Bu, bir yandan mevcut ve gelecekteki depolama yöntemlerini diğer yandan çeşitli taşıma seçeneklerini ve bunların avantajlarını içermektedir. Bu süreçten sonra, hidrojenin kullanımı için farklı potansiyel seçenekler açıklanmıştır. Malzemelerde kullanım veya enerji amaçlı/enerji taşıyıcısı olarak kullanım arasında bir ayrım yapılmıştır. Hidrojen kullanımının enerji amaçlı analizi, yanmalı motorlarda kullanıma değil, yakıt hücresine odaklanmıştır. Yakıt hücrelerinin dünyada özellikle ulaşım amaçlı kullanımı için üretim ve tüketim istatistikleri verilmiştir.

Türkiye'deki hidrojen ile ilgili çalışma verileri, projelerden yüksek lisans ve doktora tezlerine, patentlerden yayın ve kitap sayılarına kadar toplanmış ve geçmişten günümüze kadar olan artış gösterilmiştir. Bu teknolojide geride kalmamak için endüstri, akademi ve kamu arasında aktif iş birliği sağlanmalı ve yol haritaları hazırlanmalıdır. Bu rapor, hidrojen ekonomisine geçiş için bir kıvılcım oluşturacak ve öncü olacaktır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **1**
ÖZET **2**
Bölüm 1. Neden 21. Yüzyıl Hidrojen Çağı Olarak Kabul Edildi? **5**
1.1. Giriş 5
1.2. COVID-19 koronavirüs ve hidrojen 7
Bölüm 2. Hidrojen ve Özellikleri **11**
2.1. Giriş 11
2.2. Hidrojen çiftlikleri konsepti 14
2.3. Hidrojen ekonomisi için gerekli kriterler 14
2.4. Hidrojen renk kategorileri 22
Bölüm 3. Hidrojen Üretim Teknolojileri **23**
3.1. Giriş 23
3.2. Elektroliz yöntemi 24
3.3. Kimyasal yöntemler 26
3.4. Termoliz yöntemi 26
3.5. Termokimyasal yöntemler 27
3.6. Fotoliz yöntemleri 29
3.7. Biyokütleden ısıl işlemle hidrojen gazı üretimi 30
3.8. Isıl işlemsiz biyolojik hidrojen gazı üretim yöntemleri 31
3.9. Doğal gazın reformu ile hidrojen üretimi 33
3.10. Hidrojen üretim teknolojilerinin karşılaştırılması 34
Bölüm 4. Hidrojenin Depolanması **37**
Bölüm 5. Hidrojenin Sektörel Kullanımı **41**
5.1. Malzeme ve endüstriyel uygulamalar 42
5.2. Ulaşımda yakıt olarak kullanım 43
5.3. Vaka çalışması: hidrojenin doğal gaz hattına karıştırılması 44
Bölüm 6. Hidrojenin Enerji Seçeneği Olarak Kullanımı **46**
6.1. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi 46
6.2. Yakıt hücrelerinin çeşitleri 47
6.3. Ülkemizde Proton Değişim Membranlı PEM yakıt hücrelerinin geliştirilmesi 50
6.4. Ülkemizde katı oksit yakıt hücrelerinin geliştirilmesi 52
6.5. Rejenaratif yakıt hücresi sistemi 54
Bölüm 7. Hidrojen Üretimi ve Kullanımı İstatistikleri **55**
Bölüm 8. Hidrojen Araştırma, Yenilik ve Teknoloji Geliştirme Çalışmaları **59**
Bölüm 9. Yapılması Gerekli Çalışmalar, Planlama ve Koordinasyon **63**
Bölüm 10. Hedefler ve Stratejik Planlama **66**
Bölüm 11. Sonuçlar ve Öneriler **69**
11.1. Sonuçlar 69
11.2. Öneriler 70
Kaynaklar **71**

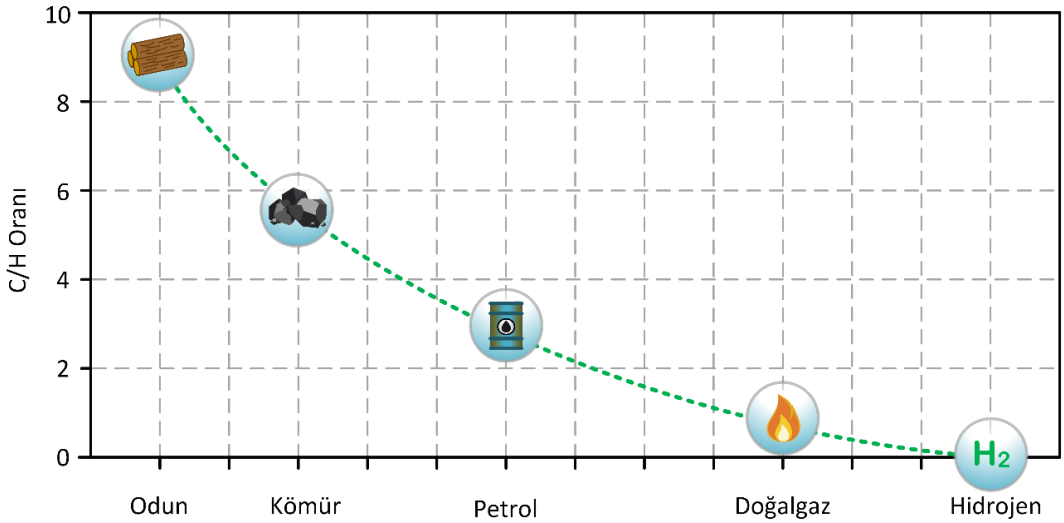
BÖLÜM 1

Neden 21. Yüzyıl Hidrojen Çağı Olarak Kabul Edildi?

Bu bölümde girişte temel enerji kaynaklarının ve bunların çevreye olan etkilerinin incelenmesi ile başlanıp COVID-19'un enerji sektörüne ve diğer sektörlere olan etkisi anlatılmaktadır. COVID-19 salgını ile karbon çağının bitip hidrojen çağının başlaması süreci nedenleriyle birlikte açıklanmaktadır.

1.1. Giriş

İnsanlık tarihinde, günlük aktiviteler için gerekli enerji ihtiyacı ilk olarak odun ile karşılanmıştır ve bu kaynak yerini zamanla kömüre (sanayi devrimi ile), petrole (birinci dünya savaşı ardından) ve doğal gaza (1980'lerden sonra artan oranlarda) bırakmıştır. Enerji taşıyıcısı ve karbon içermeyen bir yakıt olarak hidrojene doğru yönelen bu enerji yolculuğunun nihai bir hedefi vardır. Yüzyıllar boyunca karbon/hidrojen (C/H) oranının azaldığı ve hidrojen ile nihayet sıfır olduğu bu yolculuk Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu yolculuk, karbon içermeyen topluma veya ekonomiye doğru olan değişimin net bir göstergesidir. Bilim adamları odunun sahip olduğu karbon miktarının kömürden daha fazla olup olmadığını tartışmaktadırlar. Bunun yanında, odun selüloz ve ligninden oluştuğu için ve bileşiminin ağacın türüne göre değişebilmesi nedeniyle C/H oranının yaklaşık olarak 10 olduğunu belirten kaynaklar da mevcuttur. Ayrıca, ağaçların büyük bir kısmının selüloz olarak kabul edildiği göz önünde bulundurulmalıdır [1].

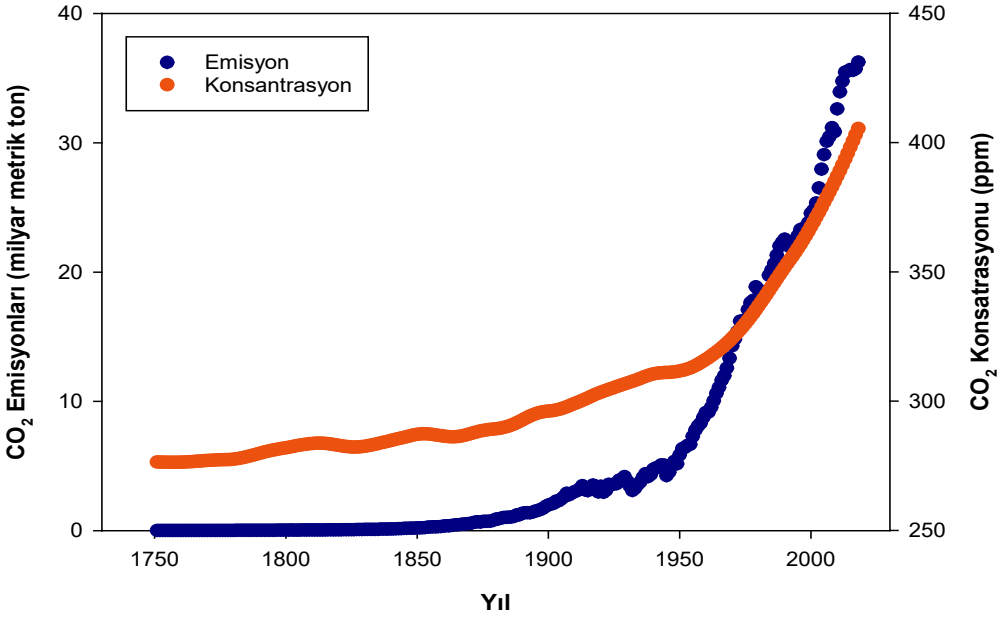


Şekil 1. Yakıtların karbon ve hidrojen oranının yüzyıllar boyunca değişimi (Kaynak [2]'den uyarlanmıştır)

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, 1800'lerin ortalarında büyük ölçekli sanayileşmenin başlamasından bu yana önemli ölçüde artmıştır. İnsan kaynaklı (antropojenik) sera gazı emisyonlarının çoğu fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan karbondioksittir (CO_2). Atmosferdeki CO_2 konsantrasyonları, küresel karbon döngüsünün bir parçası olan birçok proses tarafından doğal olarak düzenlenmektedir. Atmosfer ile dünyanın kara parçaları ve okyanusları arasındaki karbon akışı veya hareketi, bitki fotosentezi gibi doğal süreçlerin hakimiyetindedir. Bu doğal süreçler, her yıl üretilen (karbon eşdeğeri cinsinden ölçülen) bazı antropojenik CO_2 emisyonlarını emebilse de yaklaşık 1950'den itibaren CO_2 emisyonları bu doğal süreçlerin karbon emme kapasitesini aşmaya

başlamıştır. Bu nedenle atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarında sürekli bir artışa neden olmuştur. Şekil 2, 1751 ve 2018 yılları arasında dünyadaki CO_2 emisyonlarının ve konsantrasyonunun artışını göstermektedir. 1800'lerin ortalarından itibaren atmosferdeki CO_2 konsantrasyonlarının yaklaşık %40 arttığı gözlenmiştir. Artan sera gazı konsantrasyonları gezegeni ısıtma eğiliminde olup, zamanla dünyanın ortalama yüzey sıcaklığında bir artışa neden olmaktadır. Yükselen sıcaklıklar yağış modellerinde, deniz seviyesinde ve fırtına şiddetinde değişikliklere neden olabilir [3].

Halen tüm dünyada hidrojen üretimi fosil yakıtlardan (yaklaşık %50 doğal gazdan, %30 petrolden ve yaklaşık %15 kömürden) sağlanmaktadır. Farklı yakıtlardan üretilen her bir kilogram hidrojen başına, CO_2 eşdeğeri cinsinden yaşam döngüsü emisyonları Şekil 3'te verilmiştir. Yaşam döngüsü emisyonlarına göre, temiz hidrojen üretimi için nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak suyu hidrojen ve oksijene ayırmak gerektiği açıkça görülmektedir. Şekil 3, fosil yakıt kaynaklı geleneksel hidrojen üretimi yerine, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklı elektroliz, fotonik ve termokimyasal prosesler gibi yöntemlerle hidrojen üretimi gerekliliğini açıkça göstermektedir.



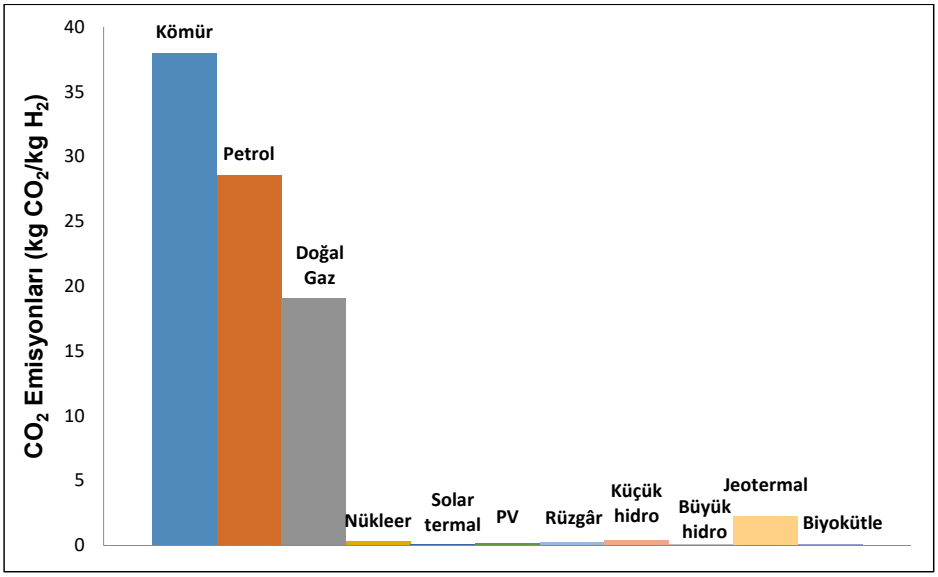
Şekil 2. 1751-2018 yılları arasında dünyada fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO_2 emisyonları ve atmosferik konsantrasyonları (Kaynak [3]'ten uyarlanmıştır)

Şu anda her bir bireyi, toplumu, şehri, ülkeyi, bölgeyi, sektörü ve ekonomiyi tam anlamıyla etkisi altına alan küresel bir koronavirüs salgını sürecindeyiz. Bu süreçte, herkes doğrudan veya dolaylı olarak virüsten etkilenmektedir. Sağlık, iş gücü, ekonomi ve finans, çevre, eğitim, enerji, gıda ve tarım, savunma, teknoloji, sürdürülebilirlik gibi toplumsal ihtiyaçların tüm boyutları da bu süreçten etkilenmiş durumdadır.

Birçok gelişmiş ve/veya gelişmekte olan ülkenin alınacak önlemleri tanımlamak, sağlıkla ilgili konularda harekete geçmek ve hükümetleri yönlendirmek için uzman gruplar, bilim kurulları, danışma komiteleri vb. oluşumlar kurduklarına tanık olmaktayız. Sağlıkla ilgili birçok çaba söz konusu iken aşağıdaki konularda da (bunlarla da sınırlı kalmamak üzere), tedbirler tüm dünyada hemen devreye alınmalıdır [2]:

- Ekonomi ve finans,
- Sanayi ve ticaret,
- Çalışan, çalışma ilişkileri ve kamu işleri,
- Ailevi konular, sosyal politikalar ve uygulamaları,

- İçişleri ve dış işleri,
- Sosyal medya ve halkla ilişkiler,
- Adalet ve eğitim,
- Kültür ve iletişim,
- Enerji ve çevre
- Ulaşım ve savunma,
- Bilim ve teknoloji,
- Gıda ve tarım,
- Sürdürülebilirlik,
- Spor ve turizm.



Şekil 3. Doğrudan fosil yakıtlardan ve yenilenebilir enerji ile nükleer kaynakların kullanılarak suyun ayrıştırılması yoluyla hidrojen üretiminde CO_2 emisyonları (Kaynak [2]'den uyarlanmıştır)

1.2. COVID-19 koronavirüs ve hidrojen

İnsanların yaşamak için dört temel ihtiyacı olduğu bilinmektedir. Bunlar;

- Hava (temel olarak azottan ve oksijenden oluşur)
- Su (hidrojen ve oksijenden oluşur)
- Enerji
- Gıda (temel olarak karbon, hidrojen ve oksijenden oluşur)

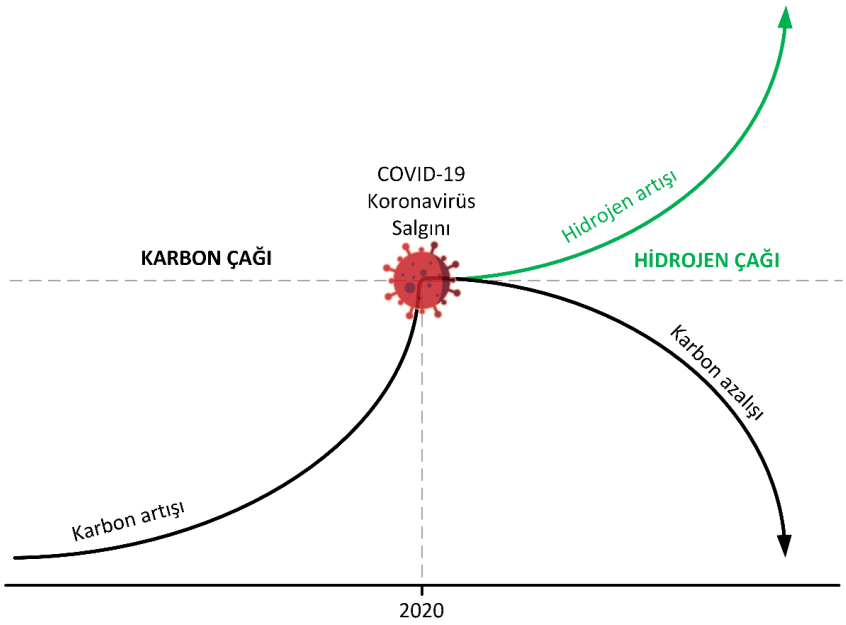
Daha iyi bir yaşam için ise gerekli olan ihtiyaçlar aşağıdaki gibidir:

- Temiz hava
- Temiz su
- Temiz enerji
- Temiz gıda

Hava, su ve yiyecek kaynaklarının enerjinin üretilme, dönüştürülme, taşınma, depolanma ve kullanılma şekillerine büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle, temiz enerji çözümlerine gereksinimimiz bulunmaktadır. Hâlihazırda, fosil yakıtların (petrol, kömür ve doğal gaz) artan kul-

lanımı dünyada su, hava ve gıda ile ilgili birçok soruna neden olmaktadır ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu olumsuz etkilere örnek olarak; solunum bozukluğu, kronik akciğer hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, bulantı, gastroenterit, sinir bozuklukları, kas ve beyin hasarları, böbrek ve karaciğer hasarları, cilt tahrişi, baş ağrısı ve yorgunluk, yüksek kanser riskleri ve daha fazlası gösterilebilir. Bunun yanında, insan vücudunun bağışıklık sistemi üzerinde de büyük oranda etkisi bulunmaktadır. Sağlık için bir diğer çevresel risk etmeni de hava kirliliğidir. Ülkelerin hava kirliliğini azaltma faaliyetleri ile kalp hastalığı, inme, astım ve akciğer kanseri gibi hem kronik hem de akut solunum yolu hastalıklarının yükü azaltılabilir [4].

Son zamanlarda her bir insanı doğrudan veya dolaylı olarak etkisi altına alan COVID-19 koronavirüs salgını özellikle yaşlı, bağışıklık sistemi zayıf olan ve çeşitli kardiyovasküler ve solunum yolu hastalıklarına sahip kişileri daha çok etkilemiştir. Bu artık karbon çağına devam edilemeyeceğini ve bu tür salgınlara karşı savunmaya geçilmesi gerektiğini gösteren bir dönüm noktasıdır. Bu nokta, Şekil 4'te görülebileceği gibi karbon çağının kapanıp hidrojen çağının başlaması için belirleyici bir an olmaktadır.



Şekil 4. Hidrojen çağı için tarihsel bir dönüm noktası olan COVID-19 koronavirüs salgını (Kaynak [2]'den uyarlanmıştır)

2020 yılında ortaya çıkan koronavirüs salgınına kadar hidrokarbon yakıtların (fosil yakıtlar) kullanıldığı karbon çağından; bu yakıtların kullanımının büyük ölçüde azalacağı ve hidrojen enerjisine olan talebin artacağı hidrojen çağına geçiş söz konusudur. Hidrojen çağının beraberinde getireceği faydaların aşağıdaki gibi olması beklenmektedir:

- Daha iyi bir ekosistem
- Daha iyi bir çevre
- Daha iyi verimlilik
- Daha iyi bir sürdürülebilir kalkınma
- Daha iyi sağlık durumu ve daha sağlıklı toplumlar
- Daha iyi bir ekonomi ve ekonomik kalkınma
- Yenilenebilir enerji alternatifleriyle daha iyi bir senkronizasyon

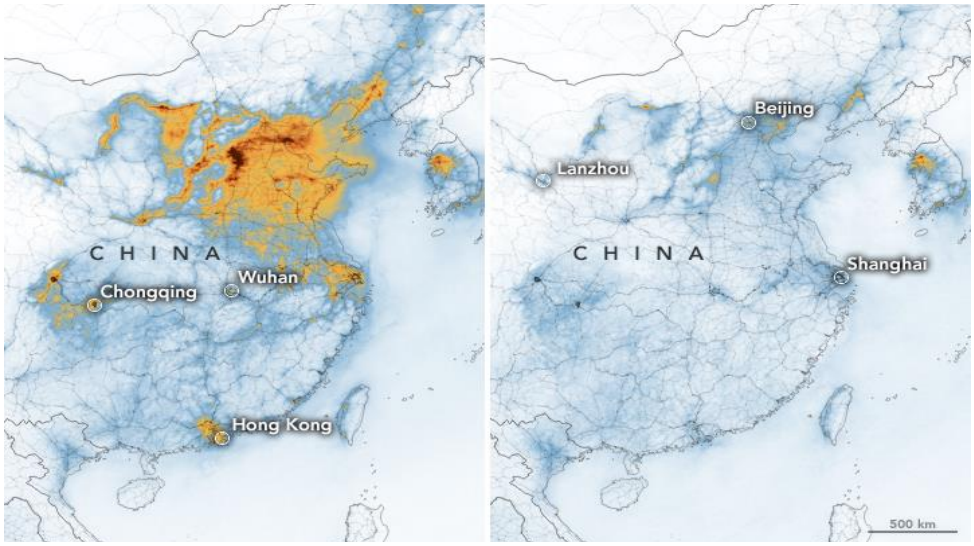
Dr. T. Nejat Veziroğlu 1974 yılında Uluslararası Hidrojen Enerjisi Konferansı, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi ve birçok etkinlik ile faaliyetlerine

başlayarak hidrojen hareketinin kurucu babası olmuştur. Dr. Veziroğlu'nun hidrojen uygarlığına geçiş olarak tanımladığı bu hareket, sürdürülebilir bir gelecek için insanlara ve toplumlara yardımcı olacak terimler geliştirmiştir. Hidrojen toplumuna yaptığı bu katkılardan dolayı, bu toplumun fikir babası olarak gösterilmiştir.

Gün geçtikçe, Türkiye gibi birçok ülkede Ulusal Hidrojen Dernekleri, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Uluslararası Enerji Ajansı ve Dünya Enerji Konseyi gibi kuruluşların hidrojene yönelik çalışmaları artış göstermektedir. Bu kuruluşların yanı sıra hükümetler de büyük girişimlerde bulunmuşlardır. Örneğin; dünya genelinden 13 endüstri lideri, İsviçre Davos'da Ocak 2017'de başlatılan Hidrojen Konseyi ile bir araya gelmiştir [5]. Ayrıca, Hidrojen Enerjisi Bakanlar toplantısı Japonya Tokyo'da Ekim 2018'de sorumlu bakan ve yetkililerle hidrojen kaynağının anlaşılması için gerçekleştirmiştir (sonraki aşamada Japonya'da Eylül 2019'da 10 yılda 10 bin hidrojen dolum istasyonu ve 10 milyon hidrojen enerji kaynaklı araç ve sistem hedefleyen bir başka toplantı gerçekleştirilmiştir).

Norveç'te hidrojen yakıtlı yolcu gemisi, Almanya'da hidrojen yakıtlı tren ve Birleşik Krallık'ta hidrojen yakıtlı uçak gibi birçok girişim başlatılmıştır. Ayrıca, Batı Avustralya'da sıfır emisyonlu bir topluluk oluşturmak için Shark Bay'deki bir sahil kasabası olan Denham'da yeni bir proje için çalışılmaktadır [6]. Bununla beraber dünyada birçok kasaba ve köy için emisyonsuz topluluklar oluşturulmaktadır.

COVID-19 koronavirüs salgını, bir yandan birçok problemi beraberinde getirirken bir yandan da dünyada sera gazı emisyonlarını azaltarak (NO_2 ve CO_2 gibi) hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olmuştur. Örnek olarak; yapılan bir araştırmaya göre, koronavirüs salgını Çin'deki CO_2 emisyonlarını geçici olarak büyük oranda azaltmıştır [7]. Çin'deki toplam karbondioksit emisyonları dört haftalık bir süre boyunca yaklaşık olarak %25 azalmış ve 200 milyon ton CO_2'e ulaşmıştır. Şekil 5'teki uydu görüntüleri ise koronavirüs karantinası sürecinde Çin'deki NO_2 emisyonlarının 2020 yılının ocak ve şubat ayları arasındaki düşüş eğilimini açıkça göstermektedir.



Şekil 5. Koronavirüs karantinası boyunca ocak ayında (sol) ve şubat ayında (sağ) Çin'deki NO_2 emisyonlarının gösterimi [8]

Avrupa Uzay Ajansı (ESA) ve birkaç bağımsız araştırmacının raporlarında açıklandığı üzere, koronavirüs karantinası süresince İtalya'daki hava kirlilik oranı da büyük oranda düşüş göstermiştir. İtalya'daki karantina dönemi ile, azot dioksit emisyonları önemli seviyede azalmıştır. Bu azot dioksit emisyonlarındaki düşüş, özellikle Kuzey İtalya'da Copernicus Sentinel-5P uydusu tarafından gözlenmiştir [9].

Türkiye'de ise Mart 2020'de başlayan salgın ve beraberinde gelen karantina süreci ile elektrik

enerjisinin üretimi ve tüketiminde meydana gelen değişim Tablo 1'de görülmektedir. Bu değerler 2020 yılının Mart, Nisan ve Mayıs aylarının ilk 30 günü için derlenmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de karantina sürecinde aylık elektrik enerjisi üretim ve tüketim değerlerinin değişimi (Kaynak [10]'dan uyarlanmıştır.)

Parametre	Mart 2020	Nisan 2020	Mayıs 2020
Aylık üretim (MWh)	23.738.796	20.152.593	20.089.513
Aylık tüketim (MWh)	23.849.906	20.153.742	20.173.859

Koronavirüs kaynaklı kısıtlamalar, daha temiz su ve hava gibi amaçlanmamış iklim faydalarını da beraberinde getirmiştir ki [11], hidrojen çağına geçiş ile bu faydalar kalıcı hale getirilebilecektir. Hidrojen enerjisine büyük oranda bir geçiş, endüstriyel tesislerin ve enerji santrallerinin baca gazları ve araçlardan egzoz gazları ile salınan partikülleri ortadan kaldıracak ve sağlık üzerinde önemli yararlar sağlayacaktır [12].

BÖLÜM 2

Hidrojen ve Özellikleri

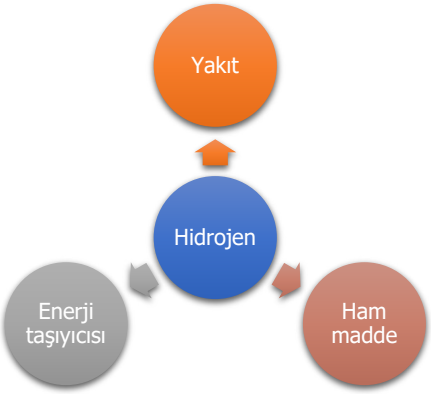
Bu bölümde girişte hidrojenin özellikleri ve kullanımının üçlü sacayağı anlatılmaktadır. Hidrojen ekonomisi için gerekli 18 kıstas ayrıntılı olarak sunulmuştur ve Türkiye'de hidrojen ekonomisine geçiş için bir yol haritası çıkarılmıştır. Hidrojenin üretiminden dağıtımına kadar geçirdiği süreci ele alan hidrojen çiftlikleri konsepti tanıtılmış ve hidrojen renk kategorilerine yer verilmiştir.

2.1. Giriş

Fosil yakıtlara bağımlılığın ve bu yakıtların çevreye olan zararlı emisyonlarının azaltılması temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile sağlanabilir. Daha düşük son kullanım emisyonları ve yeniden kullanılabilme potansiyelleri ile yenilenebilir enerji kaynakları (jeotermal, güneş, rüzgâr, dalga vb.) fosil yakıtların sürdürülebilir ikamesi olarak görülmektedir. Ancak bu kaynakların süreksiz ve tutarsız karakteristikleri, etkin depolama yöntemlerine olan gereksinimi gündeme getirmektedir.

Yenilenebilir enerji kimyasal enerji (hidrojen vb.) veya elektrik enerjisi formunda depolanabilir. Elektrik, günlük hayatta enerji depolama seçeneği olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Hidrojene olan ilgi ise, bir enerji taşıyıcısı olarak sahip olduğu olumlu özellikler nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Sürdürülebilir ilerlemeyi teyit etmek ve ekonomik ve çevresel sorunları çözmek için hem elektrik hem de hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir [13].

Günlük yaşamda, hidrojen kelimesi aslında, genellikle gaz halinde iki hidrojen atomundan oluşan H_2 molekülü için kullanılmaktadır. Hidrojen atomu, periyodik tablodaki ilk elementtir, kimyasal sembolü H'dir ve Büyük Patlamadan sonra oluşan ilk elementtir. Evrendeki en yaygın madde olmakla beraber, güneş gibi yıldızlar için en zengin enerji kaynağıdır. Bir proton (pozitif yüklü çekirdek birimi) ve bir elektrondan (negatif yük) oluşur. Atom numarası 1 olup, standart atom ağırlığı 1,008'dir. Hidrojen Dünya'da doğal olarak mevcut değildir. Metalik olmayan elementlerin çoğuyla kovalent bileşikler oluşturduğundan, Dünya'daki hidrojenin çoğu su veya organik bileşikler gibi moleküler formlarda bulunur. Oksijenle birleştiğinde suyu (H_2O) meydana getirirken, karbonla birleştiğinde metanı (CH_4), kömürü ve petrolü oluşturmaktadır. Ayrıca, gelişen her türlü maddenin (biyokütle gibi) içeriğinde bulunmaktadır [14]. Normal veya standart koşullar altında, hidrojen renksiz ve kokusuz bir gazdır, toksik değildir ve çevreye zarar vermez [15]. Hidrojenin Şekil 6'da gösterildiği gibi üç temel işlevi bulunmaktadır. Bunlar yakıt, enerji taşıyıcısı ve diğer kimyasallar ve alternatif yakıtlar (etanol, metanol, amonyak, dimetil eter vb.) için hammadde olarak kullanılabilmesidir.



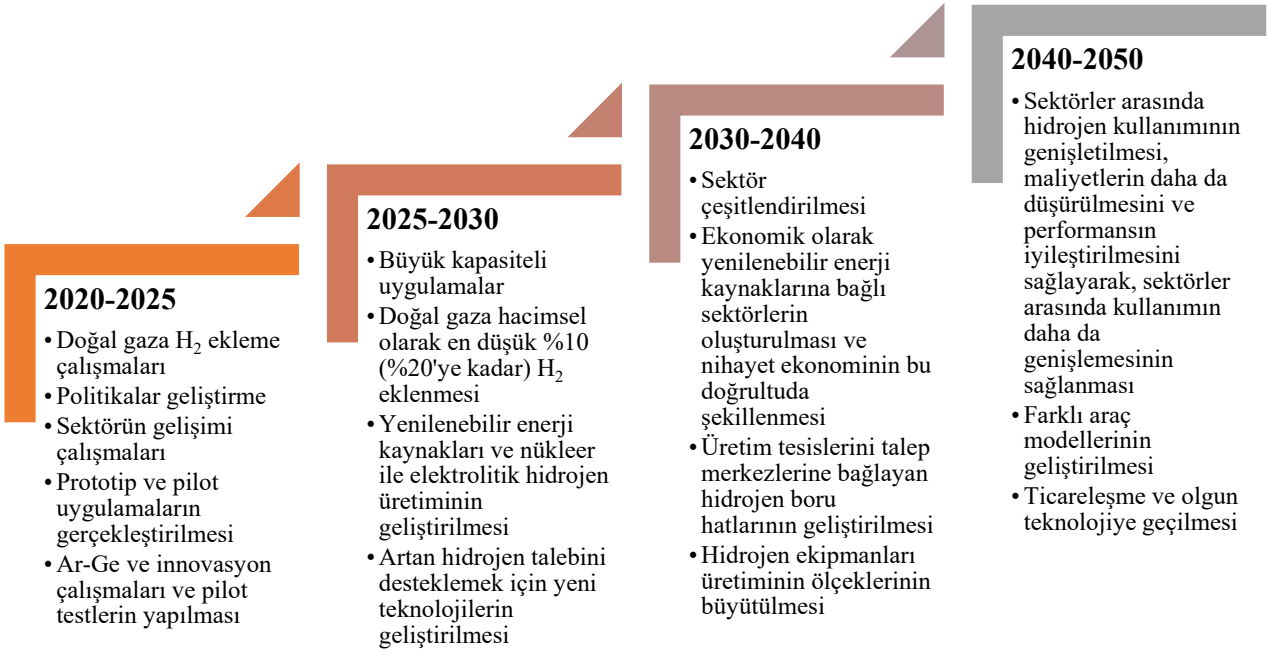
Şekil 6. Hidrojen kullanımının üçlü sacayağı

Hidrojen, şu nedenlerden dolayı önemli bir enerji taşıyıcısıdır: (i) sıfır emisyon ile sudan üretilebilmesi; (ii) doğada bol miktarda bulunması; (iii) iyi bir enerji dönüşüm etkinliğine sahip olması; (iv) gerekli düzenlemelerle farklı şekillerde depolanabilmesi (örneğin, gaz, sıvı veya metal hidritlerle); (v) minimum kayıpla uzun mesafeler boyunca transfer edilebilmesi; (vi) diğer yakıtlardan daha fazla yöntemle ek enerji biçimlerine dönüştürülebilmesi; (vii) Tablo 2'de verildiği gibi geleneksel fosil yakıtlardan daha yüksek alt ve üst ısıl değerlere sahip olması; ve (viii) yenilenebilir enerji ve sudan üretiliyorsa, üretimi, depolanması, taşınması ve nihai kullanımı ile çevreye zarar vermemesidir. Bununla birlikte, hidrojen üretim yöntemlerinin büyük bir kısmının olgun bir teknolojiye sahip olmaması yüksek üretim maliyetine ve/veya düşük verimliliklere neden olmaktadır [16].

Tablo 2. 25 °C ve 1 atm şartlarında hidrojen ve diğer yaygın olarak kullanılan yakıtların alt ısıl değerleri (AID) ve üst ısıl değerleri (ÜID) [17]

Yakıt	AID (kJ/g)	ÜID (kJ/g)
Hidrojen	119,9	141,9
Metan	50,0	55,5
Dizel	42,5	44,8
Benzin	44,5	47,5
Metanol	18,1	20,0

Hidrojenden farklı olarak, elektrik enerjiyi uzun süre depolamaya uygun değildir. Daha önce de belirtildiği gibi, hidrojen kimyasal bir yakıttır ve mevcut altyapılar kullanılarak depolanabilir ve taşınabilir. Elektrik ise sürekli olmayan bir tabiata sahiptir. Bu nedenle mevcut kimyasal enerji depolama ve taşıma altyapıları elektrik için kullanılamamaktadır. Elektriğin diğer dezavantajı ise, sistem bileşenlerinin elektrik direncinden kaynaklanan iletim kayıplarıdır. Elektriğe göre belirgin avantajları sebebiyle, hidrojen enerji tedariki, depolaması ve taşınması için alternatif bir çözüm haline gelmiştir [16]. Daha ayrıntılı bilgi için Tablo 3'te hidrojenin detaylı özellikleri verilmiştir. Türkiye'de hidrojen ekonomisinde izlenecek yol haritası Şekil 7'de gösterilmektedir.



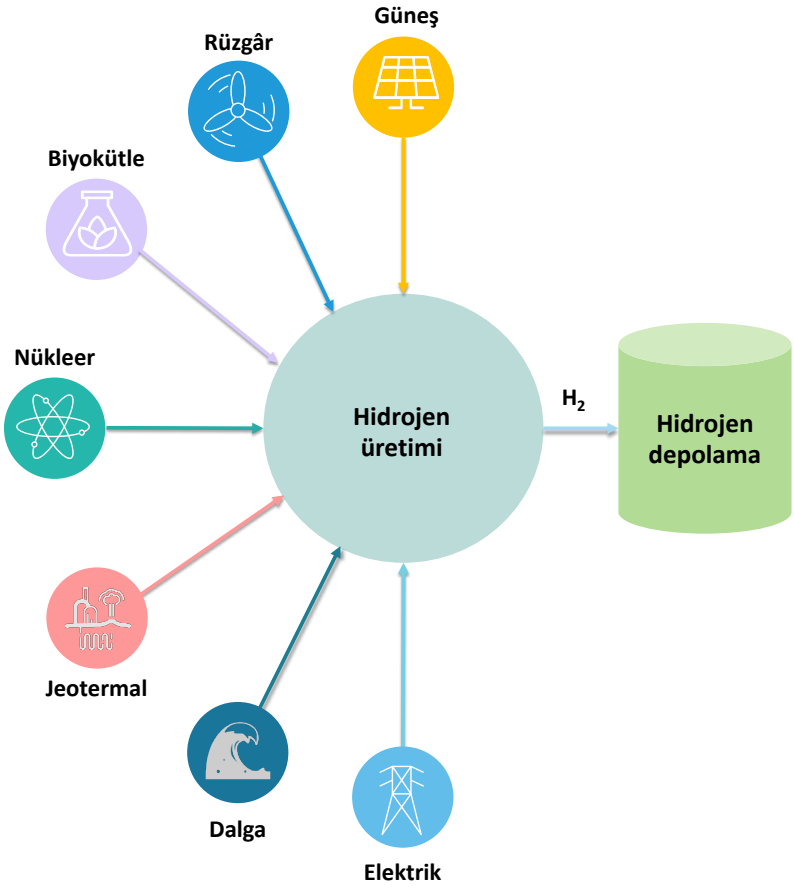
Şekil 7. Türkiye'de hidrojen ekonomisinde izlenecek yol haritası

Tablo 3. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri [17–19]

Hidrojenin Özellikleri	Değer	Birim
Molekül ağırlığı	2,02	g/mol
Kritik basınç	13,15	bar
Kritik sıcaklık	33,2	K
Kritik noktadaki yoğunluğu	0,0324	g/mL
Normal kaynama noktası (NKN)	20,268	K
NKN'deki sıvı yoğunluğu	0,0708	g/mL
NKN'deki buhar yoğunluğu	0,000134	g/mL
Üçlü nokta basıncı	0,0965	atm
Üçlü nokta sıcaklığı	13,803	K
Üçlü noktadaki katı yoğunluğu	0,0865	g/mL
Üçlü noktadaki sıvı yoğunluğu	0,077	g/mL
Üçlü noktadaki buhar yoğunluğu	0,0001256	g/mL
Erime ısısı	58,23	J/g
Süblimleşme ısısı	507,39	J/g
Buharlaşma ısısı	445,59	J/g
Normal şartlar altındaki (NŞA) buhar yoğunluğu	0.0838	kg/m^3
NKN'deki sıvı özgül ısısı (C_p)	9,69	J/g K
NŞA'daki gaz özgül ısısı (C_p)	14,89	J/g K
NKN'deki sıvı özgül ısı oranı (C_p/C_v)	1,688	-
NŞA'daki gaz özgül ısı oranı (C_p/C_v)	1,383	-
NKN'deki sıvı viskozitesi	$1,33 \times 10^{-4}$	g/cm s
NŞA'daki gaz viskozitesi	$8,75 \times 10^{-5}$	g/cm s
NKN'deki sıvı halinin yüzey gerilimi	$1,93 \times 10^{-3}$	N/m
NKN'deki sıvı için ısıl iletkenlik	1	mW/cm K
NŞA'daki gaz için ısıl iletkenlik	1,897	mW/cm K
NŞA'daki gaz için sıkıştırılabilirlik faktörü (Z)	1,0006	-
NKN'deki sıvı için sıkıştırılabilirlik faktörü (Z)	$1,712 \times 10^{-2}$	-
Gaz sabiti (R)	40,7037	mL atm/g K
NKN'deki sıvının hacimsel genleşme katsayısı	$1,658 \times 10^{-2}$	1/K
Havadaki stokiyometrik kompozisyonu	29,53	hacimce %
Havada patlayabilirlik sınırları	18,3-59	hacimce %
Minimum ateşleme enerjisi	0,02	mJ
Sıcak hava jeti ateşleme sıcaklığı	943	K
Havada kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	844	K
Havada tutuşabilirlik sınırları	4,1-74	hacimce %
Adyabatik alev sıcaklığı	2318	K
Alevden radyasyonla yayılan ısıl enerji	17-25	%
NŞA'daki havada yanma hızı	265-325	cm/s
NŞA'daki havada patlama hızı	1,48-2,15	km/s
NŞA'daki havada moleküler difüzivite	$6,1 \times 10^{-5}$	m^2/s
NŞA'daki havada difüzyon hızı	2	cm/s
Alt ısıl değer (kütle bazlı)	120	MJ/kg
Alt ısıl değer (hacim bazlı) - 1 atm basınçta	11	MJ/m^3
Üst ısıl değer (kütle bazlı)	142	MJ/kg
Üst ısıl değer (hacim bazlı) - 1 atm basınçta	13	MJ/m^3
Wobbe endeksi	45,86	MJ/m^3

2.2. Hidrojen çiftlikleri konsepti

Hidrojen ekonomisine geçişte en önemli konsept hidrojen çiftlikleri konseptidir. Üretimden dağıtıma hazır hale getirme işlemini gerçekleştirdiğimiz yere çiftlik denmektedir. Hidrojeni üretimden dağıtıma hazır hale getirdiğimiz sürece kadar olan proseslerin gerçekleştiği yer ise hidrojen çiftlikleri olarak isimlendirilmektedir. Hidrojen çiftliği konsepti Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Hidrojen çiftlikleri konseptinin şematik gösterimi

2.3. Hidrojen ekonomisi için gerekli kriterler

Hidrojen üretimindeki inovasyonun unsurları ve boyutları, hidrojen ekonomisine sorunsuz bir geçiş sağlayabilmek için nerede çalışmamız ve neyi anlamamız, analiz etmemiz, değerlendirmemiz ve uygulamamız gerektiğini belirlemek için kritik bir yaklaşım Şekil 9'da gösterilmiştir.

2.3.1. Kaynak

Hidrojen, amonyak, biyokütle, etanol, kömür, H_2S, metan, metanol, su gibi çeşitli kaynaklardan üretilebilir. Günümüzde, en düşük maliyetli üretim, kaynak olarak doğal gazın kullanıldığı buhar reformu yoluyla gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, bu seçenek ile emisyonların düşürülmesi/ortadan kaldırılması ve sınırlı olan fosil yakıt tedarik sorununu çözmek mümkün olmayacaktır. Benzer şekilde kömürden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılabilmesi için karbon tutma ve depolama teknolojisinin sisteme dâhil edilmesi gerekmektedir [16].

Türkiye'de H_2 üretimi için güvenilir, düşük maliyetli, bol ve temiz kaynakları belirleme ihtiyacı bulunmaktadır. Yenilenebilir kaynaklar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için en önemli fırsatı sunmaktadır. Emisyonları ve enerji kullanımını azaltmak amacıyla,

yenilenebilir kaynaklardan ekonomik yollarla H_2 üreten teknolojileri geliştirmek ve iyileştirmek için dünya çapında kapsamlı araştırmalar devam etmektedir. H_2 üretim potansiyelini tahmin etmek için özellikle teknolojik ve ekonomik kaynak potansiyelleri önemli rol oynamaktadır [20].

Şekil 9. Hidrojen ekonomisi için gerekli kriterler (Kaynak [21]'den uyarlanmıştır)

2.3.2. Sistem

Daha geniş bir perspektif ile hidrojen ekonomisi, enerji tedarik döngüsünde ana taşıyıcı olarak H_2 kullanan bir sistem (veya sistemler topluluğu) olarak düşünülebilir. Hidrojen ekonomisi, sürdürülebilir ve çevreye zararsız yeni enerji kullanımı yolları önermektedir.

Türkiye'de çevreye zarar vermeyen bir şekilde H_2 üretmek için verimli ve etkili sistemlerin belirlenmesine, geliştirilmesine ve uygulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir bütün olarak bakıldığında, bu sistemler tasarım, yapım, işletim ve bakım gibi tüm önemli yönleri ele almalıdır. Gereksinimlerin karşılanması ile sistem riski güvenli bir seviyeye indirilecektir. Verimli, düşük maliyetli, güvenilir ve temiz H_2 üretimi için çeşitli sistemler önerilmektedir. Ancak günümüzde, ticari olarak uygulanabilen yalnızca iki ana teknoloji bulunmaktadır [22]: Buhar metan reformu ve elektroliz.

- Buhar metan reformu yönteminde, H_2 üretmek için metan, buharla ısıl ayrışmaya uğrayarak CO ve/veya CO_2 yan ürünlerini meydana getirmektedir.
- Elektroliz yönteminde ise H_2O'nun, H_2 ve O_2'ye ayrışması için elektrik enerjisi kullanılmaktadır.

Bu geleneksel yöntemlere ek olarak, güvenli, düşük maliyetli ve temiz H_2 sağlayan birçok yenilikçi H_2 üretim sistemi de mevcuttur. Yenilenebilir enerjiye dayalı, entegre ve hibrit sistemler, birden fazla yenilenebilir kaynaktan sürdürülebilir bir şekilde H_2 üretebilmektedir. Ek olarak, H_2'yi minimum (bazı durumlarda sıfır) emisyon ile üreten fotoelektrokimyasal hücreler gibi yeni teknolojiler de bulunmaktadır [23]. Türü ne olursa olsun, yenilikçi sistemlerin benzer araştırma ve geliştirme ihtiyaçları vardır ve bunlardan bazıları aşağıdaki gibi listelenebilir [24]:

- Maliyet minimizasyonu
- Emisyon azaltımı

- Boyut küçültme
- Geliştirilmiş güvenilirlik ve dayanıklılık
- Optimize edilmiş servis, eğitim ve bakım programları
- Güvenlik, standartlar ve sertifikasyonun tanıtımı
- Artan sistem verimliliği
- Geliştirilmiş H_2 kalitesi

Ek olarak, bir H_2 üretim sisteminin taşıma, depolama ve dağıtım sistemleriyle etkin bir şekilde çalışması beklenmektedir. Şu anda, iletim boru hatları, gaz türbinleri ve sıkıştırma istasyonları en yaygın taşıma ve dağıtım seçenekleridir. Yer altı depoları, sıkıştırılmış tanklar ve hidritler, H_2 depolama sistemlerinin bazı örnekleridir. Dağıtım sistemleri arasında ise çelik ve plastik boru hatları listelenebilir [25].

2.3.3. Faydalı çıktılar

Bir enerji taşıyıcısı olarak H_2, enerji arzı ve talebi arasındaki yeni bağlantıları destekleyecektir. Bu, merkezi veya merkezi olmayan yollarla yapılabilir ve genel sistemin esnekliğini geliştirecektir. Farklı enerji sistemi bileşenlerini birbirine bağlayarak, düşük karbonlu enerji kaynakları ulaşım, endüstri ve binalar gibi farklı son kullanım seçeneklerinde kullanılabilecektir. Elektrik şebekesine sınırlı erişimi olan kırsal yerlerde, H_2 minimum emisyonla hizmetlere, şebekeden bağımsız erişim imkânı verebilir.

H_2, endüstride onlarca yıldır kullanılmaktadır. Ancak, mevcut dağıtım altyapısı ve teknolojisi, H_2'nin kapsamlı faydalı çıktılarını ve son kullanımını desteklemek için geliştirilmemiştir. H_2 oldukça düşük hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olduğundan; son kullanım noktalarına taşınması, depolanması ve taşınması yüksek maliyetler içermektedir. Bu durumun bir nedeni de H_2'nin son kullanımıyla ilgili verimsizliklerdir. H_2 dağıtımının başlıca zorlukları, yüksek taşınma maliyeti, düşük verimlilik, saflık ve sızıntı olarak sıralanabilir. Bir H_2 dağıtım altyapısı geliştirmek büyük bir zorluktur ve farklı teknolojilerin kombinasyonlarını geliştirmenin ve benimsemenin zaman alacağı tahmin edilmektedir. Taşıma altyapısı ile ilgili kaynaklar ve talepler bölgeye ve pazar türüne göre (kırsal, kentsel veya eyaletler arası gibi) farklılık göstermektedir. H_2 talebi geliştikçe ve teslimat seçenekleri büyüdükçe ve olgunlaştıkça altyapı seçenekleri de gelişecektir [26]. Hidrojen enerjili sistemlerde faydalı çıktıları artırmak önemlidir. Türkiye'de hidrojen ile ilgili kurulacak enerji sistemlerinde öncelikli olarak daha fazla faydalı çıktı (elektrik, ısıtma, soğutma, temiz su vb.) üretme hedefi konulmalıdır.

2.3.4. Kapsam

Herhangi bir araştırma ve geliştirme faaliyetinde kapsamın belirlenmesi ve buna göre ilerlenmesi gerekmektedir. H_2'nin kapsamı geniş bir alana sahiptir. Bu kapsam üretim, depolama, taşıma ve son kullanım cihazları gibi alanları içermektedir.

Türkiye'de H_2 ekonomisine başarılı bir geçiş için anahtar araştırma alanlarının kapsamının kısa bir özeti Tablo 4'te sunulmuştur. İyi tanımlanmış ve geliştirilmiş bir kapsam, potansiyel olarak bilim insanlarının ekonomik olarak katkıda bulunma potansiyeli yüksek olan alanlarda araştırma ve tasarıma yoğunlaşmasına izin vermektedir.

Mevcut enerji sistemlerinin birbiriyle bağlantılı olan özellikleri (üretim, dağıtım ve dönüştürme süreçleri dâhil) geniş çapta bir yakıt geçişini teşvik etmeyi amaçlayan karar vericiler için zorlayıcıdır. Bu zorluklardan bazılarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Yeni H_2 üretim, depolama, taşıma ve son kullanım sistemleri birlikte kurulmalıdır.
- Geleneksel fosil yakıt kullanımına dayalı mevcut sistemlerin performansı iyileşmeye devam etmektedir. Örneğin, daha verimli içten yanmalı motorlar ve hibrit tahrik sistemleri, mevcut fosil yakıt altyapısından daha iyi faydalanacaklardır.

- Mevcut altyapı, enerjiyi rekabetçi maliyetlerle sağlamakta, yeni teknolojilere ve yeni altyapılara geçişte engel oluşturmaktadır.
- Yeni H_2 tabanlı sistemler, geleneksel ve yeni sistemlerin bir arada kullanıldığı bir geçiş dönemine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu geçiş döneminde ne eski ne de yeni sistemler en yüksek verimlilikte çalışabileceklerdir.

Tablo 4. H_2 ekonomisine başarılı bir geçiş için temel araştırma alanlarının kapsamının özeti

Üretim	Dağıtım	Kullanım alanları	Diğer Önemli Etkenler
• Merkezi üretim • Dağıtılmış üretim • Üretim yerinde depolama	• Boru hatları • Kamyonlar, demir yolları • Pompalar, kompresörler • Sıvı/gaz depolama tankları • Terminaller • Sıvılaştırıcılar	• Ayrıştırma • Saflaştırma • Yakıt hücreleri • Yanmalı motorlar • Soğutma • Yakıt dağıtıcıları • Yeni son kullanım seçenekleri	• Sağlık ve güvenlik • Kodlar ve standartlar • Sensörler ve kontroller • İzinler

Kaynak: Hoffmann ve Dorgan, 2001 [27]

2.3.5. İnsan kaynağı

Araştırmadan ticarileştirmeye ve üretimden kullanıma kadar H_2 ekonomisinin her alanında iyi eğitimli personele ihtiyaç mevcuttur. Türkiye'de sadece eğitimli uzmanlar tarafından kullanılan H_2'den genel kullanıma geçiş, halkın kabulünü ve alışma sürecini gerektirecektir.

H_2 enerji sistemleri, personel eğitim faaliyetlerini desteklemek için kaynakların uygun bir biçimde kullanılmasını gerektirmektedir. Propan, doğal gaz ve sıvı doğal gaz için önceki deneyimler, tüm süreç boyunca personel eğitiminin gerekli olduğunu göstermektedir. Personel eğitimi, H_2 gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Personel eğitiminin tasarımı ve uygulaması, farklı H_2 enerji sistemlerinin özel gereksinimlerine göre yapılmalıdır. Bu nedenle, gösterime dayalı sistemlere, yerel ve küresel toplulukları bilgilendirmeye ve H_2 sistemlerinin potansiyelini gösteren önemli araştırma projelerine öncelik verilmelidir.

2.3.6. Ölçek büyütme

Yenilikçi H_2 sistemleri, çok çeşitli son kullanım seçeneklerini desteklemektedir. Saatlerden haftalara ve hatta aylara kadar daha uzun depolama sürelerine sahip yüksek güç kapasiteli uygulamalar bunlara örnek olarak verilebilir. H_2 yakıtlı enerji sistemlerinin, hâlihazırda geliştirilmiş, olgun ve geleneksel teknolojilerle rekabet edebilmesi için büyük ölçekli üretimi ve kullanımı desteklemesi gerekir.

Yenilikçi H_2 teknolojileri geliştirmeye yönelik laboratuvar ölçeğinde birçok çalışma mevcuttur. Bu laboratuvar ölçekli çalışmaların pratiğe yansıtılması gerekmektedir. Türkiye ekonomisi için bu çalışmaların yenilenebilir enerji, savunma, kimya vb. sektörlerde büyük ölçekli uygulamalara dönüştürülmesi büyük önem arz etmektedir. Ticari olarak geliştirilmiş endüstrilerde olduğu gibi, ölçek büyütmek H_2'nin üretim, taşıma ve depolama birim maliyetlerini azaltabilir.

2.3.7. Güvenlik

Hidrojen, benzin ve doğal gaz dâhil diğer yanıcı yakıtlardan daha fazla veya daha az tehlikeli değildir. H_2'nin bazı özellikleri, benzin veya diğer yakıtlara kıyasla güvenlik faydaları sağlamaktadır. Bununla birlikte, tüm yanıcı yakıtlar dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Benzin ve doğal gaz gibi, H_2 de yanıcıdır ve belirli koşullar altında tehlikeli bir şekilde davranabilmektedir. Basit yönergelere uyulduğunda ve davranışı kullanıcı tarafından anlaşıldığında H_2 güvenli bir şekilde kullanılabilir. Güvenlik, H_2 üretiminden kullanımına kadar değişen teknolojiler için ilgilenilmesi gereken önemli bir konudur. Yeterli güvenliği teyit etme ve izin tedarik süreçlerini basitleştirme amacıyla H_2 için kodlar ve stan-

dartlar oluşturulmalıdır. Örneğin, gelişmiş kaçak tespiti veya sensör teknolojileri, çalışma sırasında güvenliği sağlama açısından önemlidir.

Hidrojen, uçuculuğu ve yayılması nedeniyle güvenlikle ilgili bir dizi zorluğu da beraberinde getirir. H_2 ile çalışırken, kabul edilebilir basınç ve sıcaklık aralıkları gibi birçok güvenlik gereksinimi bulunmaktadır. Bu gereksinimler, kamuya açık H_2 dolum istasyonları için bir altyapı oluştururken son derece kritiktir. H_2 altyapısının kodları ve standartları ile uyum içerisinde çalışmak için izleme ve kontrol cihazları (gaz kaçak ve yangın/alev sensörleri gibi) gerekmektedir. İdeal olarak, bu izleme ve kontrol cihazlarının düşük bakım ve işletme maliyetlerine sahip olması istenir. Kentsel ve yüksek nüfuslu alanlarda geniş çapta H_2 dağıtım altyapısına izin verilebilmesi için boru hatları tasarlanırken güvenlik önlemleri de dikkate alınmalıdır. Farklı H_2 son kullanım seçeneklerinin başarılı bir şekilde ticarileştirilmesi, mevcut altyapı ile aynı veya daha fazla güvenlik ve uyum sunan etkili bir H_2 dağıtım altyapısı gerektirmektedir. Hidrojen mevcudiyeti durumuna yönelik yeni yönetmelikler oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Türkiye'de iş güvenliğine, çalışma güvenliğine ve kullanım güvenliğine yönelik yasaların ve düzenlemelerin hazırlanması gerekmektedir.

2.3.8. Planlama

Türkiye'de hidrojen üretimi, depolanması, taşınması ve son kullanımı için kapsamlı planlar geliştirilmelidir. Oluşturulan bir plan, önlemleri ve onlar için gerekli bütçeyi içermelidir. Hidrojen planı, hidrojen yatırımları için uygulanabilir olan mevcut planları desteklemelidir. Amaç, ortak bir hedefe doğru birlikte çalışmaları için mevcut programları organize etmektir. H_2 planı tüm ilgili H_2 faaliyetlerini bir araya getirmenin yanı sıra, başarılı bir H_2 ekonomisine geçiş sırasında bilgiyi dağıtmayı, yerel ve küresel faaliyetleri canlandırmayı kolaylaştırabilir.

2.3.9. Sektörler

Sektörler, Türkiye'de hidrojen teknolojilerinin uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir bir H_2 ekonomisi, yenilikçi seçeneklerin geliştirilmesini ve uygulanmasını gerektirmektedir. H_2 ekonomisine geçiş sırasında her bir büyük sektör de bu değişime dâhil edilmelidir. Bugünün yatırım kararları, uzun vadede yenilikçi teknolojilerin gelişimini riske atmayacak şekilde alınmalıdır.

Yenilikçi H_2 sistemleri, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini en aza indirmemize ve ulaşım, endüstri, binalar ve elektrik üretimi gibi birçok sektörde enerji güvenliğini artırmamıza yardımcı olabilir. H_2, çeşitli sektörleri enerji iletimi ve dağıtımı seçenekleriyle birbirine bağlayabilme özelliğine sahiptir. H_2 aynı zamanda düşük karbonlu enerji sistemlerinin çalışma esnekliğini de artırır. H_2 ile düşük karbonlu sektörlere ulaşmak ve daha yüksek yenilenebilir payını enerji arz ve talep yapılarına dâhil etmek mümkündür.

H_2 kullanımı, enerji son kullanım sektörlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına izin verir. Sonuç olarak, enerji nihai kullanım sektörleri karbondan daha fazla arındırılmış olacaktır. Ek olarak, sistem esnekliğini desteklemek için yeni yöntemler H_2 sistemleriyle tanımlanabilir. Farklı nihai kullanım sektörleri arasında, emisyon azaltma stratejilerinin ve optimum çözüm yollarının avantajlarının ve dezavantajlarının doğru bir şekilde belirlenmesi sektörel entegrasyon için kritik bir noktadır.

2.3.10. Çözümler

Türkiye için çözüm bazlı bir strateji, doğru teknolojilerin geliştirilmesinde ve sektörel kullanım için uygulanmasında önemlidir. H_2, farklı endüstriler, şirketler, ajanslar, kurumlar, üniversiteler, yerel ve küresel kuruluşlar, paydaşlar vb. ile iş birliği yaparak küresel enerji sorunlarına çözüm bulmayı mümkün kılmaktadır.

H_2, artan emisyonlar, fosil yakıtların sınırlı doğası, yenilenebilir kaynaklardan ve düşük karbon

bazlı enerji sistemlerinden yararlanma ihtiyacı gibi enerji ile ilgili küresel sorunlara çözüm sağlamak için büyük bir potansiyele sahiptir. H_2 tabanlı çözümlerin verimli bir şekilde geliştirilmesini teşvik etmek için sıkı politikaların uygulanması gerekmektedir. Etkili politikalar yalnızca sosyal ve çevresel etkileri hesaba katmakla kalmayıp; maliyetleri en aza indirmeyi, sistem verimliliğini artırmayı ve yenilikçi H_2 sistemlerinin pazara girişini hızlandırmayı amaçlamaktadır [28]. H_2 ekonomisine geçiş sırasında çözüme dayalı bir strateji aşağıdaki gibi önemli faydalar sağlayabilir:

- Enerji arz güvenliği: H_2, alternatif kaynakların güvenli ve esnek arzının kullanılmasını sağlayarak ithal edilen enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir.
- Daha iyi çevre: H_2 daha temiz, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilmektedir ve son kullanımı CO_2 yaymamaktadır. H_2 sistemleri NO_x, SO_x, partikül vb. emisyonları daha da azaltabilecektir. "Gerçekten temiz" olarak kabul edilebilmesi için, H_2 yenilenebilir kaynaklardan veya tatmin edici karbon tutma ve depolama teknolojisine sahip karbon bazlı kaynaklardan üretilmelidir.
- Endüstriyel ilerleme: Yenilikçi H_2 sistemleri, yeni ürünler, ekipman ve hizmetler gibi çok sayıda fırsatı beraberinde getirmektedir.

2.3.11. İş birliği

Türkiye'de hidrojen ekonomisine ulaşmak için tüm paydaşlar, akademiler, endüstriler, devlet kurumları, sivil toplum örgütleri vb. bir araya gelmelidir. Paydaşların eğitimi ve katılımı potansiyel olarak halkın onayını artırabilecek ve sonuç olarak H_2 ekonomisine geçiş sırasında birçok olası sorunu ortadan kaldırabilecektir. Bu sorunlara örnek olarak, yeni teknolojilerle birlikte sıklıkla ortaya çıkan "benim arka bahçemde değil" yaklaşımı verilebilir. Yatırımla ilgili risklerin ortadan kaldırılması için, sanayi, kamu hizmetleri, enerji sektörleri, üreticiler, yerel, bölgesel ve ulusal yöneticilerin yakın iş birliği gerekmektedir.

Riskleri en aza indirmek için stratejiler geliştirilirken, yerel ve uluslararası paydaşlar sürece dâhil edilmelidir. Bu süreçte, H_2 altyapısı geliştirmenin riskini azaltmak için ekonomik araçlar ve yeni iş modelleri geliştirilecektir. Bu nedenle, paydaşların mevcut ve yeni H_2 teknolojileri ve enerji sistemleri hakkında kapsamlı bilgiye sahip olması hayati önem taşımaktadır.

2.3.12. Standartları geliştirme

Üretimden kullanıma kadar tüm hidrojen spektrumunu kapsayacak teknik standartların uygulanmasını ve geliştirilmesini sağlamak için Türkiye'de bir an önce doğru standartların geliştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir uygulama ile uyumluluğun, güvenliğin, kalitenin, tutarlılığın, güvenilirliğin ve ticari uygulanabilirliğin en üst düzeye çıkarılması beklenmektedir. Mevcut standartlar konuma göre farklılık gösterir ve başka bir bölgeye uygulanmaları gerektiğinde genellikle önemli revizyonlar gerektirmektedir. H_2 altyapısının farklı bileşenleri ile ilgili standartlardaki boşlukları en aza indirme ihtiyacı da bulunmaktadır. Bu nedenle, etkili bir H_2 altyapısının geliştirilmesi için standardizasyon hayati önem taşımaktadır. H_2 ekonomisine geçiş sürecinde standardizasyonun rolü şu şekilde özetlenebilir [26]:

- Yakıt üretimi sırasında bölgeye özgü emisyonları dâhil edecek bir metodolojinin geliştirilmesi
- Güvenliği sağlama amacıyla H_2 enerji sistemleri için performansa dayalı küresel teknik düzenlemelerin oluşturulması
- H_2 kullanımı için güvenlik yönetmeliği
- H_2 ölçüm düzenlemeleri
- H_2 yakıt ikmali altyapısı standardizasyonu
- H_2-fosil yakıt karışımı kalitesi ve güvenlik yönetmeliği
- Fosil yakıt karışımlarında maksimum ve minimum H_2 yüzdelerinin belirlenmesi.

2.3.13. Sübvansiyon

Türkiye'de birçok alanda devlet kendi sübvansiyon mekanizmalarını kurmuştur. Özellikle yenilenebilir enerji alanında birçok sübvansiyon yöntemi uygulanmıştır. Hidrojenin de böyle bir yardıma ihtiyacı bulunmaktadır. Bu hidrojen ekonomisine geçişte bir kaldıraç etkisi yapacaktır. H_2 tabanlı enerji sistemlerine geçiş sırasında sübvansiyonlar geçişi başlatmak ve hızlandırmak için çok büyük bir etkiye sahiptirler. Kısa ve uzun vadeli sübvansiyonlar, H_2 enerji sistemlerinin ilk kabulünü teşvik eder; ayrıca ölçek büyütme ve yenilikçi H_2 sistemlerinin yeni enerji pazarlarına tanıtılması sırasında da yardımcı olabilirler. Bu nedenle, bu sübvansiyonlar yalnızca temiz, verimli, düşük maliyetli ve güvenilir H_2'ye geçişe yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda halkın yararına olan avantajlara da sahiptir. Doğru kullanıldığında, sübvansiyonlar yenilikçi teknolojilerin çok hızlı ve etkin bir şekilde halka ulaştırılmasını destekleyebilir [29].

H_2 sektörünü olgunlaştırmak, H_2 ekonomisine ve uygulamalarına geçişi hızlandırmak için sübvansiyonlar sağlamak gereklidir. Örneğin, toplu taşıma ile ilgili sübvansiyonlar, yenilikçi H_2 teknolojilerinin başlatılmasına yardımcı olmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer bir örnek ise, yakıt vergisi muafiyetinin yanı sıra doğrudan sübvansiyonlar yoluyla sürüş maliyetindeki farkı (geleneksel fosil yakıt temelli olanlara kıyasla) düşürerek H_2 yakıtlı araçlarda erken tüketici ilgisi yaratmaktır.

2.3.14. Teşvik

Türkiye'de H_2 ekonomisine başarılı bir geçiş, H_2 yakıtına erişimin sağlanmasını, değer zincirlerinin güçlendirilmesini ve talebi artırmanın teşvik edilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, H_2 teknolojilerinin uygulanmasından öncelikli olarak sorumlu olan uygulayıcılar, teknoloji uzmanları, mühendisler vb. için teşvik paketleri uygulanmalıdır. Etkili politika desteği yoluyla yenilikçi H_2 teknolojileri için yatırımın teşvik edilmesi ve piyasaya erken dağıtılması maliyetleri en aza indirebilecektir. Yenilikçi H_2 sistemlerinin başarısını teşvik etmek için kapsamlı politikalar gerekmektedir.

Ulaşım, ağırlıklı olarak fosil yakıtlara dayanan ve bu nedenle sera gazı emisyonlarına giderek artan miktarlarda katkıda bulunan sektörlerden biridir. H_2 daha emniyetli, güvenilir, daha temiz ve uygun fiyatlı enerji sistemleri aracılığıyla ulaşım endüstrisinde sürdürülebilir çözümler sağlayabilir. H_2 tabanlı taşımacılığın erken aşamalandırılması için, araçlara erişim, yeterli yakıta erişim ve talepte yeterli büyüme sağlayacak enstrümanlar gerekmektedir. En büyük öncelik, H_2 yakıt ikmal istasyonlarının kurulmasına verilmelidir. Ayrıca, istasyon ağ operasyonunun ekonomisini iyileştirmek için talep canlandırılmalıdır. Taksilerde ve otobüslerde oluşacak yüksek bir pay da bu canlanmaya katkıda bulunabilir.

2.3.15. Altyapı

Çeşitli sektörlerde hidrojen üretimi, depolanması, taşınması, dönüşümü ve kullanımının her aşamasında yapısal bir yaklaşım geliştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, her adımın parçaları veya unsurları arasındaki ilişkileri ve düzenlemeleri kapsamaktadır. Burada H_2 zincirinde yaşanan temel sorunların bir özeti Tablo 5'te sunulmuştur.

2.3.16. Strateji geliştirme

Türkiye'de yenilikçi hidrojen teknolojileri ve bunların gerçek uygulamaları için stratejiler geliştirmek gerekmektedir. Böyle bir strateji, H_2 ekonomisine geçme nihai hedefine ulaşmak için tasarlanmış bir eylem planını veya politikayı kapsamaktadır. Mevcut fosil yakıt altyapısında H_2 enerji sistemlerinin kullanılması, bu yeni enerji sistemlerinin maliyetini düşürmek için olası bir başlangıç yaklaşımıdır. Bununla birlikte, aşağıdaki durumlarda daha iyi bir strateji olarak, H_2 tabanlı enerji sistemleri için ayrı, bağımsız bir altyapı geliştirmek önerilebilir [22]:

- Mevcut altyapı hâlihazırda neredeyse tam kapasitede kullanılmaktadır; bu nedenle, H_2 için

yalnızca çok sınırlı bir kısım kullanılabilir.

- Ayrıca mevcut altyapının tanımlanamayan bir kısmı korozyon gibi fiziksel hasarlardan etkilenmiştir ve bu parçalar H_2'ye hizmet etmeye uygun değildir.
- Mevcut boru hatlarının malzemeleri ve üretim yöntemleri H_2 ile uyumlu olmayabilir.
- Mevcut sistem, basınç dalgalanmalarıyla değişen talep yüklerini yönetebilmektedir, ancak bu seçenek H_2 ile çalışmayabilir.
- H_2, mevcut dağıtım altyapısındaki işletim basınçlarını aşan birçok son kullanım uygulaması için önemli ölçüde yüksek dağıtım basınçları gerektirir.
- Fosil yakıtlardan kaynaklanan safsızlıklar muhtemelen H_2 son kullanım sistemlerine zarar verir. Bu nedenle, mevcut altyapıyı kullanmak için ayırma ve temizleme gerekebilir.

Tablo 5. H_2 zincirinde yaşanan bazı temel sorunlar

Alan	Temel Sorunlar
Depolama ve dağıtım	• Mevcut kompresörlerin ekonomikliği, güvenilirliği ve verimliliği • Depolama boyutu gereksinimleri ve maliyeti • Dağıtımın güvenilirliği ve karşılanabilirliği • Bazı durumlarda -40 °C ön soğutma gerekliliği • Maliyet ve doğruluk ölçümü
Boru hatları	• Kırılganlık • Sermaye maliyeti • Uygun fiyat, güvenilirlik ve verimlilik
Sıkıştırılmış gaz	• Sermaye maliyeti • Ağırlık gereksinimleri
Sıvı H_2	• Sermaye maliyeti • Sıvı buharlaşmasıyla ilgili kayıplar • Sıvılaştırma işleminin enerji gereksinimleri
Genel	• Kalite • Olası sızıntılar • Güvenlik ve eğitim

2.3.17. Destekler

Yenilikçi hidrojen hızla gelişip ortaya çıktığı için, Türkiye'de hedeflenen planlara ulaşmada akademik, teknik, mali, kurumsal ve politik olarak acil bir desteğe ihtiyaç duyulmaktadır. Bu destek, laboratuvardan ticari ölçeklere geçişte H_2 enerji sistemi bileşenlerinin araştırılması, tasarımı, geliştirilmesi, oluşturulması ve test edilmesi için gereklidir. Yenilikçi H_2 sistemlerine yatırımı desteklemek için aşağıdaki gibi pek çok neden vardır [27]:

- Çeşitli ve yerel olarak mevcut kaynakların kullanılması
- Sudan ve yenilenebilir enerjilerden büyük ölçekli H_2 üretimi olasılığı
- Sahada yer almak isteyen önemli endüstriyel oyuncular (büyük enerji tedarikçileri gibi)
- Bilimsel topluluklardan ve endüstriden destek
- Endüstriyel gelişme fırsatı
- Çevre dostu olma (azaltılmış emisyonlar ile)
- Uluslararası araştırmaya ön planda katılım

2.3.18. Sürdürülebilirlik

Yirmi birinci yüzyılın vizyonu, sürdürülebilir enerji sistemlerinin mevcut kaynakların kullanımının arz ve talep kısımlarında önemli rollere sahip olmasıdır. Hidrojen esaslı enerji sistemleri bu konuda elzem kabul edilmektedir. H_2, kusursuz bir şekilde sürdürülebilir olduğu düşünülen yenilenebilir kay-

naklardan üretilebilir. Yenilenebilir enerjilerin ve yenilikçi H_2 üretim yöntemlerinin maliyeti düşmekte ve H_2 bazlı enerji dönüşüm sistemlerinin verimliliği artmaktadır. Bu nedenle, H_2'nin gelecekteki sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması beklenmektedir.

Yenilikçi H_2 teknolojileri, nihayetinde çeşitli boyutlardan, enerjik, çevresel, ekonomik, sosyal ve politik boyutları kapsayan bütünsel bir sürdürülebilirlik sağlamayı amaçlamaktadır. Uygun fiyatlı, temiz, güvenilir ve sürdürülebilir H_2 sistemlerinin geliştirilmesi, H_2 tabanlı enerji sistemlerinin başarısı için oldukça önemlidir [28].

2.4. Hidrojen renk kategorileri

Hidrojen üreticileri, pazarlamacılar, devlet kurumları ve diğer kuruluşlar hidrojeni, üretimi için gerekli olan enerji kaynaklarına göre sınıflandırabilir veya tanımlayabilir [30]. Bu sınıflandırma genel olarak yeşil, mavi veya gri hidrojen şeklindedir.

Yeşil hidrojen, yalnızca yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektriği kullanılarak suyun elektrolizi ile üretilir. Kullanılan elektrik %100 yenilenebilir kaynaklardan sağlandığı için, seçilen elektroliz teknolojisine bakılmaksızın, hidrojen CO_2'siz üretilmektedir.

Gri hidrojen, fosil yakıtlardan elde edilir ve günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Kural olarak, doğal gaz, ısıtma yoluyla doğal gaz üretimi sırasında hidrojen ve CO_2'ye (buhar reformu ile) dönüştürülür. Üretim sırasında oluşan CO_2 genellikle kullanılmaz.

Mavi hidrojen, gri hidrojendir, ancak karbon yakalama ve depolama teknolojisi ile üretilen CO_2 yeraltında biriktirilir ve depolanır. Hidrojen üretimi sırasında üretilen CO_2 böylece atmosfere girmez ve hidrojen üretimi iklim açısından nötr hale getirilebilir.

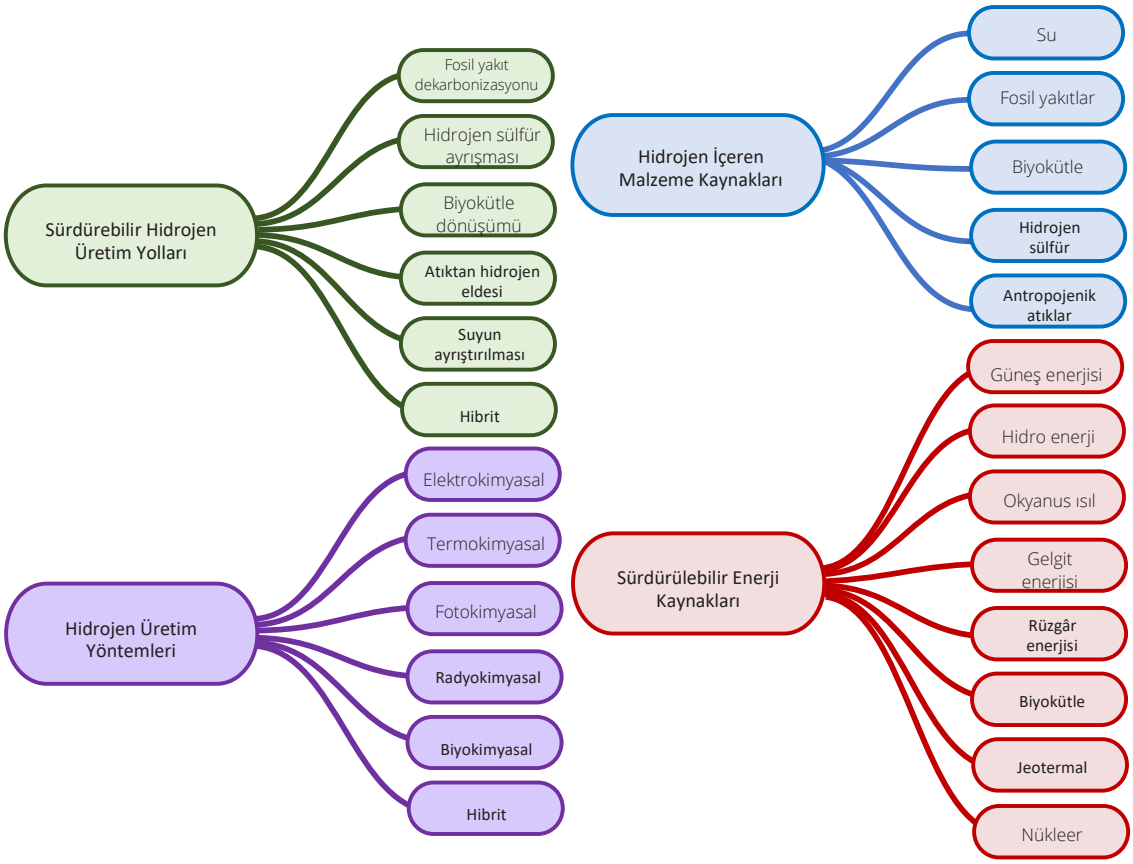
BÖLÜM 3

Hidrojen Üretim Teknolojileri

Bu bölümde hidrojenin farklı kaynaklardan üretiminde kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak işlenmektedir. Bunlar elektroliz yöntemi, kimyasal yöntemler, termoliz yöntemi, termokimyasal yöntemler, fotoliz yöntemleri, biyokütleden ısıl işlemle hidrojen gazı üretimi, ısıl işlemsiz biyolojik hidrojen gazı üretim yöntemleri ve doğal gazın reformu ile hidrojen üretimidir.

3.1. Giriş

Hidrojen üretim yollarını belirlemek için, doğal hidrojen kaynaklarının, doğal kaynaklardan hidrojeni çıkarmak için kullanılabilecek mevcut enerji kaynaklarının ve uygulanabilir hidrojen üretim yöntemlerinin envanterinin çıkarılması gerekmektedir. Bu maddeler Şekil 10'da özetlenmiştir. Hidrojen içeren doğal kaynaklar, Şekil 10'da gösterildiği gibi su, fosil yakıtlar, biyokütle, hidrojen sülfür ve antropojenik atıklardır. Üre içeren belediye kanalizasyon suları, gübre gibi tarım atıkları, mahsul artıkları, çöp gazı üreten diğer atıklar, geri dönüştürülmüş plastik ve selülozik malzemeler hidrojenin çıkarılabileceği insan kaynaklı atıklardır.

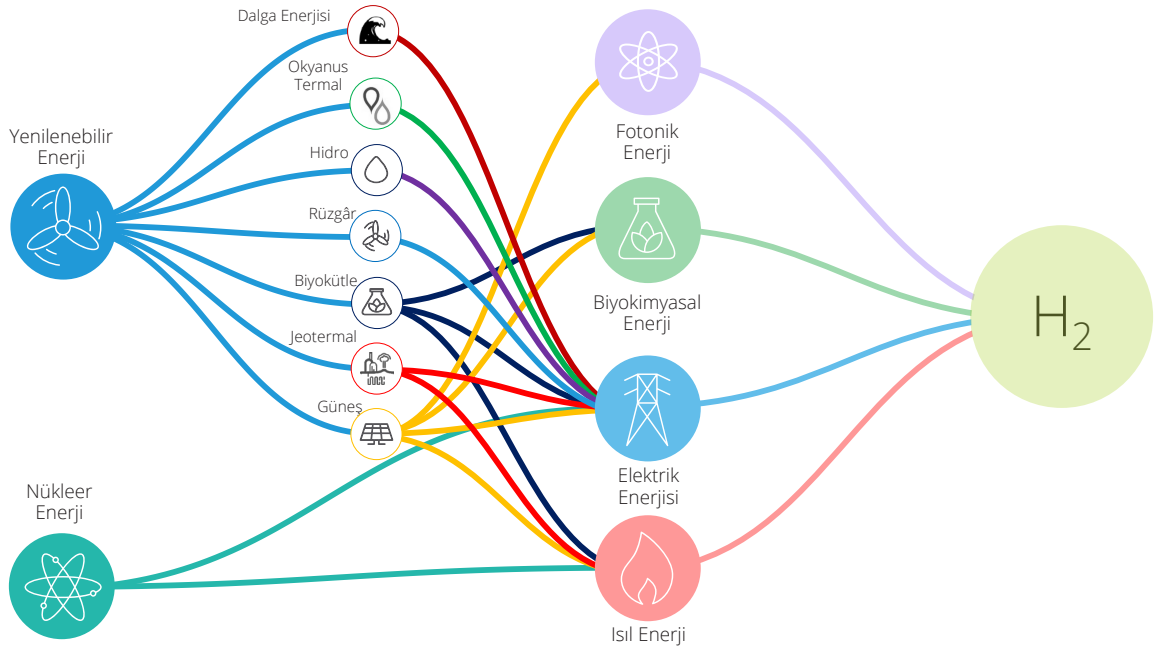


Şekil 10. Hidrojen üretimi için kaynak ve yöntemlerin sınıflandırılması (Kaynak [31]'den uyarlanmıştır)

Herhangi bir kaynaktan temiz ve kirletici olmayan bir şekilde hidrojeni çıkarmak için sürdürülebilir enerji gereklidir. Şekil 10'da sürdürülebilir olarak kabul edilebilecek ana enerji kaynakları listelenmiştir. Bunlar sırasıyla; güneş, hidro, okyanus ısısı, gelgit (okyanus akıntıları dâhil), rüzgâr, biyokütle, jeotermal ve nükleer olarak özetlenebilir. Bu kaynakların herhangi birinin dikkatli kullanımı, çevre

üzerinde çok az etki bırakarak veya etki bırakmadan elektrik ve/veya yüksek sıcaklıkta ısı ve/veya nükleer radyasyon üretebilir. Bu tür enerji, Şekil 10'da listelenen yöntemlerden biri aracılığıyla hidrojen üretimi için kullanılabilir. Bu yöntemler, elektrokimyasal, termokimyasal, fotokimyasal, radyokimyasal, biyokimyasal ve hibrit olmak üzere altı sınıfa ayrılmıştır. Yeşil ve sürdürülebilir hidrojen üretim yol haritası Şekil 11'de görülmektedir. Bu patikanın izlenmesi ile hidrojen üretimi çevreci ve daha temiz olmasının yanında, sürdürülebilir etkiye de sahip olacaktır. Şekil dikkatli incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretiminde çok önemli bir rol oynadığı aşikârdır.

Mevcut teknolojik gelişme düzeyinde, doğal gaz yakıtlı büyük ölçeklerde hidrojen üretimi, literatürde bulunan en uygun maliyetli hidrojen üretim yöntemidir. Tüm enerji sistemlerinde arz güvenliği kritik bir gerekliliktir. Bu nedenle, tüm hidrojen üretim sistemlerinde enerji ve malzeme tedarik güvenliği dikkate alınmalıdır. Günün sonunda hidrojen üretiminin amacı, sürdürülebilir, temiz, uygun fiyatlı ve güvenilir enerji sistemlerine sahip olmaktır. Bu nedenle hidrojenin fosil yakıtlar yerine temiz enerji kaynakları kullanılarak üretilmesi gerekmektedir. Üretim verimleri ve maliyetleri, sistem verimlilikleri, genel sistem güvenilirlikleri ve herhangi bir olumsuz çevresel etki, sürdürülebilir hidrojen üretimindeki araştırmanın öncelikli odak alanlarıdır. Hidrojen enerji sistemleri olmadan karbon içermeyen enerji sistemlerini gerçekleştirmenin olası olmadığı çok iyi bilinmektedir. Bu nedenle bu bölümde, mümkün olan en yüksek sistem verimliliği ile mümkün olan en düşük üretim maliyeti, çevresel ve sosyal etkiye sahip olanları bulmak için bazı önemli hidrojen üretim yöntemleri tartışılmakta ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 11. Yeşil hidrojen yol haritası (Kaynak [32]'den uyarlanmıştır)

Hidrojen üretim yöntemleri, altı ana ve alt başlıklar altında her bir üretim yönteminin verimliliği ile Şekil 12'de verilmiştir.

3.2. Elektroliz yöntemi

Hidrojen, elektrik enerjisinin gerekli olduğu elektrokimyasal yöntemlerle üretilebilir. Elektrik enerjisinin çevreye zarar vermeyen süreçlerle elde edilmesi ile yeşil hidrojen elektrokimyasal olarak üretilebilir. Ticari olarak büyük ölçekli alkali elektrolizör üniteleri, gelişmiş bir teknoloji ile uzun zamandan beri mevcuttur. Yakın zamanda, proton değişim elektrolizörleri, küçük ölçekli hidrojen üretiminde ticari olarak temin edilebilir hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık buharı ile çalışan katı oksit

elektrolizörleri gün geçtikçe gelişmektedir. Özellikle nükleer enerjiden türetilmiş proses ısısı ve gücü ile birleştiğinde çok yüksek yeşil hidrojen üretimi potansiyelleri vardır. İlk su elektroliz çalışmaları 1789'da Jan Rudolph Deiman ve Adriaan Paets van Troostwijk tarafından yapılmıştır [33]. Birçok elektroliz teknolojisi mevcut olmakla birlikte, kullanılan elektrolit ve akışkan açısından Alkali, PEM, SOE ve Klor- alkali olarak özetlenebilir. Alkali elektroliz teknolojisi %80 verimliliğe sahiptir ve en gelişmiş elektroliz yöntemidir [34, 35]. Aynı zamanda ticari olarak en yaygın elektroliz yöntemidir [36, 37]. Kloralkali işlemi, cıva hücreli, diyafram hücreli ve membran hücreli olarak özetlenebilecek üç farklı yöntemden biri kullanılarak gerçekleştirilir [38]. Alkali ve PEM elektrolizörleri 80 °C'de, SOE ise 700-1000 °C'de çalışır. Elektrolizörden hidrojen elde etmek için gerekli olan elektrik birçok kaynaktan elde edilebilir. Kısaca bahsetmek gerekirse; rüzgâr enerjisinden, jeotermal enerjiden, güneş enerjisinden, gelgit enerjisinden, derinliği değişen okyanusların sıcaklık farkından ve diğer birçok enerji kaynağından elektrik elde edilebilir. Bu yöntemlerle elektrik üretilirken emisyon yayılmamasından dolayı temiz ve yeşil hidrojen üretilebilir.

Savunma sanayinde, derin denizde yaşamak için sudan oksijen üretmek için nükleer enerjili su elektrolizörleri kullanılmıştır. 1970'lerdeki enerji krizi, bilim adamlarının elektrolize ilgisini artırmıştır. Ardından yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretiminin mümkün olduğu görülmüştür. 1980 yılına gelindiğinde, dünya çapındaki yedi büyük üretici, saatte 535 ila 30.000 standart metreküp (2–100 MW aralığında eşdeğer bir elektrik enerjisi tüketimi ile) kapasitelerde çalışan alkalin elektroliz tesisleri ile üretilen hidrojeni kullanarak amonyak üretmeyi başarmıştır [38].

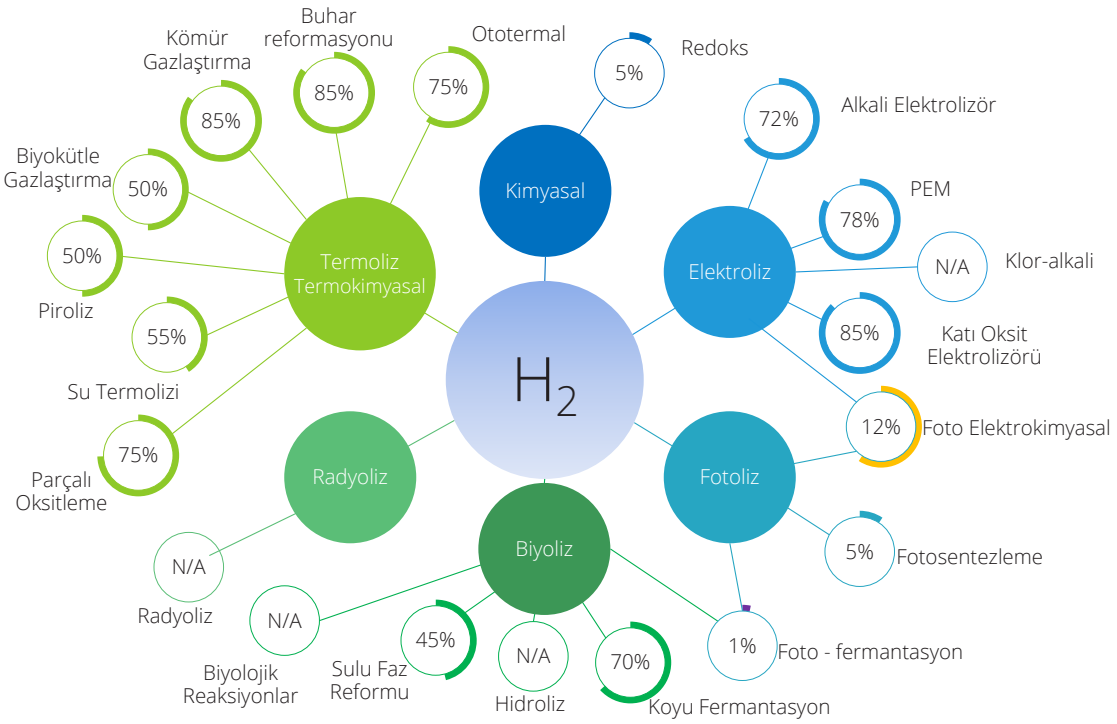
Hidrojen üretim yöntemleri sistemlere eklenerek çoklu üretim sistemleri oluşturulabilir. Elektriğin üretilebileceği birçok yöntem ile elektrolizör entegre edilerek farklı kaynaklardan hidrojen elde etmek mümkün olabilir. Örneğin rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik ile hidrojen üretimi hem yeşil hem de sürdürülebilir bir hidrojen üretim yöntemidir. Yatay eksenli veya dikey eksenli rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini elektriğe dönüştürmek için kullanılır. Günümüz teknolojisinde en uygun maliyetli yenilenebilir enerji biçimlerinden biridir. Rüzgâr enerjisinin ürettiği elektrik şebekeye verilebilir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ve dolayısıyla hidrojen eldesi rüzgâr hızının yüksek olduğu yerlerde (kıyı ve kıyı altı alanlar gibi) daha fazladır. Güneş enerjisinin kısıtlamalarına benzer şekilde, rüzgâr enerjisi üretimi de rüzgâr hızının değişken olmasından etkilenir. Hidrolik santrallerdeki elektrik enerjisi üretimine benzer şekilde, rüzgâr enerjisi de esasen önce elektrik üretmek için kullanılır ve daha sonra elektrik, hidrojen üretimi için kullanılmaktadır. Buna ek olarak, rüzgâr enerjisiyle hidrojen üretimindeki en büyük sorun, rüzgâr enerjisinin dalgalı yapıda olmasıdır. Elektrolizörler dalgalı voltajlara hızlı uyum sağlayabildikleri için rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektrik ile çalışmaya uygundur.

Bir başka elektrik ve dolayısıyla hidrojen üretim yöntemi ise jeotermal kaynakların kullanılmasıdır [39]. Jeotermal enerji, jeotermal kaynakların çoğu 250 °C'ye kadar sıcaklık seviyeleri sağlasa da yeryüzünün bazı bölgelerinde yaklaşık 35-500 °C aralığında sıcaklık seviyelerinde bulunan bir termal enerji şeklidir. Jeotermal ısı proses ısıtması için kullanılır veya ısı motorları vasıtasıyla elektriğe dönüştürülebilir. Jeotermal enerji, çeşitli flaş döngüleri ve organik Rankine çevrimleri aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılabilir. Jeotermal kaynağın sıcaklık seviyesine bağlı olarak, elektrik üretim sürecinin enerji verimi %5 ile %25 arasında değişmektedir [38].

Elektrik üretebilen gelgit, dalga ve okyanus termal enerji dönüşüm tesisleri gibi çeşitli okyanus enerjisi teknolojileri, su elektrolizörleri ile kolayca entegre edilebilir. Gelgit enerjisi, elektrik üretmek için gelgitin gücünü kullanırken, dalga enerjisi sistemleri bir okyanusta veya denizde oluşan dalgaları kullanmaktadırlar. Osilatörler denize yerleştirilir ve dalgalar osilatörlerle temas ettiğinde salınırlar. Bu salınımlı hareketi elektrik üretmek için kullanılır. Okyanus termal teknolojisi, okyanus suyunun üst ve derin alt seviyeleri arasındaki sıcaklık farkını kullanmaktadır. Bu termal fark, elektrik üretmek için kullanılabilmektedir. Bunun yanında elektriğin herhangi bir yöntemle elde edilmesi ile elektrolizörlerde kullanımıyla hidrojen üretimi mümkün olmaktadır.

3.3. Kimyasal yöntemler

Kimyasal hidrojen üretimi; su, metal, metal hidratlar, gaz bazlı hidratlar, metal hidroksitler gibi kaynaklardan hidrojen üretimine dayanır. Bunların en temel örneği redoks reaksiyonlarından hidrojen üretimidir. Redoks reaksiyonları, indirgeme ve oksidasyon içeren bir tür reaksiyondur. Redoks reaksiyonlarından hidrojen üretimi ticari olarak çok gelişmemiştir [40].



Şekil 12. Hidrojen üretim yöntemleri ve verimleri (Kaynak [41]'den uyarlanmıştır)

3.4. Termoliz yöntemi

Termal enerji ile bir bileşiğin kimyasal ayrışması termoliz olarak belirtilir (benzer şekilde, elektrik enerjisiyle suyun ayrıştırılması elektroliz olarak adlandırılmaktadır). Su termolizi teknik olarak 2500 K üzerindeki sıcaklıklarda mümkündür, ancak gerçekleşmesi oldukça zor bir işlemdir. En büyük problemlerden biri, hidrojenin ayrışma sırasında oksijenle tekrar reaksiyona girerek su oluşmasıdır. Bu durumu önlemek için özel işlem koşulları, katalizörler ve ayırma cihazları gerçek bir sürece dâhil edilmelidir. Su termolizi aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşmektedir [42]:

$$H_2O(l) \xrightarrow{\text{Isı}} H_2(g) + 0{,}5O_2(g) \tag{1}$$

Ayrışma miktarı, sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir; 2000 K'de %1, 2500 K'de %8,5 ve 3000 K'de %64 oranında ayrışabilir. Bu yöntemde yüksek sıcaklıklara dayanan malzemelere duyulan ihtiyaç ve hidrojenin karışımdan ayrılması çözülmesi gereken önemli problemlerdir [34, 43]. Suyun termolizi, tek geçişli bir işlemdir. Termoliz reaktöründe, yüksek sıcaklıkta esas olarak hidrojen, oksijen ve buhardan oluşan bir karışım meydana gelir. OH, atomik H ve O ve iyonlar gibi diğer ara türler de bu çok yüksek sıcaklıkta rol oynar. Termoliz işlemini gerçekleştirmek için birçok teknik husus dikkate alınmalıdır: malzeme seçimi, ısı geri kazanım sistemleri, ısı kaynakları, katalizör kullanma imkânı, ürün ayırma ve saflaştırma vb. Termoliz ile hidrojen üretim yönteminde en büyük sorun, yan reaksiyonların etkisidir. Su 2000 K sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında, termal olarak birçok türe ayrışmakta ve içerik olarak H_2O, H_2, O_2, O, H ve OH ortaya çıkmaktadır [44].

3.5. Termokimyasal yöntemler

Hidrokarbonun oksijen ile hidrojene dönüştürülmesi için kısmi oksidasyon (parçalı oksitleme) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem sıcaklık kontrollü yanma ile sağlanır. İşlem için katalizöre gerek yoktur. İşlem, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Kısmi oksidasyon kısaca, hidrokarbonların 1300-1500 °C sıcaklık ve 3-8 MPa basınç aralıklarında maruz kaldığı bir gazlaştırma işlemidir. Kısmi oksidasyon ile oluşan gaz karışımı CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4, H_2S ve COS içerir. Üretilen gazın bir kısmı yakılarak endotermik prosesler için gerekli ısıyı sağlar. Proses sıcaklığını 700-1000 °C'ye düşürmek için katalizör kullanılabilir [41, 45]. Piroliz yönteminde ham organik madde, 500-900 °C sıcaklık aralığında 0,1-0,5 MPa basınçta oksijensiz ve havasız ortamda ısıtılarak gazlaştırılır. Su ve hava olmadığından CO ve CO_2 oluşmaz. Piroliz yöntemleri sıcaklık aralığına göre tanımlanır: düşük (<500 °C), orta (500-800 °C) ve yüksek (>800 °C). Yüksek enerji içerikli organik materyallerin dönüşümü için genellikle hızlı bir piroliz işlemi tercih edilir. Son yıllarda organik atıkların ve kömür karışımlarının ikili pirolizi yüksek enerji içerikleri nedeniyle tercih edilmektedir [46].

Termokimyasal su ayırma, ısı enerjisi verilerek kimyasal reaksiyonla suyun hidrojene ve oksijene dönüştürülmesidir. Termokimyasal su ayırma çevrimleri son 35 yıldır bilinmektedir ve 1970'lerin ve 1980'lerin sonlarında kapsamlı bir şekilde çalışılmalarına rağmen, son zamanlarda çok az ilgi görmüşlerdir. Teknik fizibilite ve yüksek verimlilik potansiyeli hakkında hiçbir kuşku olmamakla birlikte, kanıtlanmış düşük maliyetli ve yüksek verimli çevrimler henüz ticari olarak geliştirilmemiştir [31]. Termokimyasal su ayırma çevrimleri iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar sadece ısı enerjisi gerektiren saf termokimyasal hidrojen üretim çevrimleri ve ısı ve elektrik enerjisini birlikte gerektiren hibrit termokimyasal hidrojen çevrimleridir.

ABD Savunma Bakanlığı, 1963 yılında Energy Depot adlı bir araştırma programında termokimyasal döngüleri geliştirmeye başladı. Proje kapsamında, bir savaş bölgesinde yüksek sıcaklıkta ısı üretmek için bir nükleer askeri savaş reaktörü (MCR) tesisinin geliştirilmesine odaklanıldı. Bu sayede ısı, havadan ve sudan sentetik yakıtlar üretmek için uygun teknolojilerle kullanıldı. Öngörülen yakıtlar hidrojen, amonyak ve hidrazin olmakla beraber, bunların büyük değişiklikler yapılmadan içten yanmalı motorlarla hareket ettirilen mevcut askeri teçhizata güç sağlayabileceği düşünülüyordu [47].

İki aşamalı termokimyasal su ayırma döngüleri 1966 yılında bilimsel bir çalışmada önerildi. Başlangıçta oksit ve hidrit tipi olmak üzere iki tür iki aşamalı döngü belirtilmiştir. Termokimyasal döngülerle termal enerjiden hidrojen üretimi üzerine ilk uluslararası toplantı 1969'da İtalya'nın Ispra kentinde yapıldı ve burada Mark 1 adı verilen bir proses gelecek vaat eden bir termokimyasal döngü olarak önerildi. Mark 1, Ca, Br ve Hg bazlı kimyasal elementlerle çalışmakta ve 1000 K mertebelerinde yüksek sıcaklık gerektirmektedir [48]. Mart 1974'te Miami'de düzenlenen Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji konferansında, önde gelen yedi laboratuvarda önerilen ve geliştirilen yaklaşık 30 termokimyasal su ayırma döngüsü açıklandı. Bunlardan başlıcaları, ISPRA (Euratom), Jülich Merkezli (Aachen Üniversitesi), Argonne Ulusal Laboratuvarı, Los Alamos Bilimsel Laboratuvarı, General Atomics, General Electric ve Allison General Motors Laboratuvarıdır. Avrupa Komisyonu, 1973–1983 dönemi için Mark döngülerinin geliştirilmesi amacıyla sağlanan bir yıllık bütçeyle, Almanya'daki Aachen Üniversitesi ile birlikte İtalya'daki Ispra'da bir Ortak Araştırma Merkezi kurulumunu başlattı. Araştırmanın ilk aşamasından sonra- cıva bazlı bileşiklerle- Ispra-Mark programında demir-klor döngülerinden hibrit sülfürik asit döngülerine ve sülfür-iyot döngülerine kadar değişen birçok termokimyasal hidrojen üretim döngüsü geliştirildi. Programın sonunda Mark döngüsünün toplam 24 versiyonu rapor edildi [38]. Termokimyasal çevrimler içerisinde iki adımlı, üç adımlı, dört adımlı, beş adımlı, altı adımlı ve benzeri gibi geri dönüştürülmüş kimyasalları içeren birçok çok adımlı proses geliştirilmiş çevrimler mevcuttur. Burada "adımlar" kimyasal reaksiyonların sayısını (veya bazen önemli kurutma, ekstraksiyon, kristalizasyon gibi fiziksel süreçleri) belirtmektedir.

Termokimyasal döngülerde hidrojen üretimi için üç tür ısı kaynağı öngörülmektedir: konsantre güneş santralleri, nükleer santraller ve jeotermal santraller. Genel olarak, güneş santralleri daha düşük üretim ölçeklerinde ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilirken, nükleer sistemler ara sıcaklıklar ve daha yüksek üretim ölçeklerinde çalışmaya uygundur.

Termokimyasal su ayırma döngüleri için reaksiyonlar Tablo 6'da verildiği gibi dört kategoride kategorize edilebilir. Bir hidroliz reaksiyonunda su, bir reaktan ile birleşir ve bazı ara ürün veya ürünler üretir. Hidrojen gelişen bir reaksiyonda, reaksiyona giren maddeler hidrojen içeren bir bileşikle birleştirilir ve hidrojen üretilir ve bazı geri dönüştürülebilir ürünler oluşur. Oksijen gelişen bir reaksiyonda, oksijen gazı ve geri dönüştürülebilir ürünler oluşturmak için belirli reaktanlarla birleştirilen oksijen içeren bir bileşik oluşacaktır.

Tablo 6. Termokimyasal döngülerde ana reaksiyon denklemleri

Reaksiyon Türü	**Genel Reaksiyon Denklemi**
Hidroliz	$H_2O + \Sigma R \rightarrow \Sigma P$
Hidrojen reaksiyonu	$HX + \Sigma R \rightarrow H_2 + \Sigma P$
Oksijen reaksiyonu	$XO + \Sigma R \rightarrow 0{,}5O_2 + \Sigma P$
Yenileme	$\Sigma R \rightarrow \Sigma P$

Bir termokimyasal döngünün en önemli koşullarından biri, her reaksiyon aşamasının veriminin (veya oransal dönüşümünün) yeterince yüksek olması gerekliliğidir. Örneğin, döngünün üç adımı varsa ve dizideki her reaksiyon %90 verime sahipse, toplam verim %73 olacaktır; döngünün dört adımı varsa, toplam verim %66'dır. Düşük verim, kimyasal ayırma ve geri dönüşüm ile ilgili sorunlara neden olur. Daha küçük verimler için, süreç ya uygulanamaz hale gelebilir ya da üretim yöntemi diğer hidrojen üretim yöntemleri ile rekabet edemeyebilir. Bu nedenle, adım sayısını olabildiğince azaltmak veya her reaksiyon adımı için yüksek verim elde etmek önemlidir. Genel bir gösterge olarak, bir termokimyasal reaksiyon aşağıdaki hususlara göre pratik veya uygulanamaz olarak değerlendirilmektedir [38].

- Reaksiyon verimi 0,001'den küçükse, reaksiyon gerçekleştirilemez.
- Reaktif dönüşümü 0,001 ile 0,1 arasında ise reaksiyon marjinal bir verime sahiptir.
- Dönüşüm 0,1'den yüksekse, reaksiyonun verimi iyidir ve kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

Saf termokimyasal döngülerdeki en büyük teknolojik zorluklardan biri, 1000 K veya daha yüksek sıcaklık gereksinimiyle ilgilidir. Bu nedenle malzeme seçimi ile ilgili konular çok önemli bir yer tutar. Buna ek olarak, yeşil hidrojen üretimi, konsantre güneş radyasyonu ve yüksek sıcaklıkta proses ısısı için yeni nesil nükleer reaktörler gibi kaynaklarla sınırlı olmaktadır. Bu teknolojiler pahalıdır ve henüz ticari olarak gelişmemiştir. Elektrokimyasal reaksiyonlar, teknik ve ekonomik açıdan onları tercih edilebilir kılan üç ana avantaja sahiptir: (i) reaksiyonun sıcaklığı, saf bir termokimyasal işleme göre düşürülebilir, (ii) mümkün olmayan termokimyasal dönüşüme sahip reaksiyonlar, elektrokimyasal olarak gerçekleştirilebilir ve (iii) reaksiyon ürünleri kendiliğinden ayrılabilir.

Kömür, biyokütle veya katı atık gibi bir yakıt, hidrojen gazına veya sentez gazına (hidrojen + karbon monoksit) dönüştürüldüğünde, işlem gazlaştırma olarak adlandırılır. Bir akışkan yakıt (gaz veya sıvı: alkoller, doğal gaz petrol) sentez gazına dönüştürüldüğünde, bu proses reformu olarak adlandırılır. Birincil kaynak bir fosil yakıt ise, tüm süreci yeşil yapmak için karbon tutulması işlemi uygulanabilir. Doğal gazın, petrolün ve diğer hidrokarbonların buharla reforme edilmesi ve kömürün ve diğer katı karbonlu malzemelerin (örneğin, biyokütle) buharla gazlaştırılması, basitleştirilmiş net reaksiyonla ifade edilebilir. Reaksiyon kinetiğine ve hammaddelerdeki safsızlıkların varlığına bağlı olarak, dönüştürme sırasında başka bileşikler de oluşabilir.

$$C_xH_y + xH_2O \xrightarrow{\text{Yüksek Sıcaklıkta Isı}} \left(\frac{y}{2} + x\right) H_2 + xCO \quad (2)$$

Buhar metan reformu, sentez gazı üretimi ve ardından bir gaz su dönüşüm reaksiyonu ile devam eder. Doğal gazın stokiyometrik buhar reformu yaklaşık 1000 K sıcaklıkta katalitik olarak gerçekleştirilir. Biyoyakıtlar, reformasyon yoluyla hidrojene dönüştürülebilir. Bu yöntem, karbon nötr olması açısından yeşil bir hidrojen üretim süreci olarak görülmektedir. Çöp gazı veya biyogaz da termokimyasal yöntemlerle, örneğin ıslah yoluyla hidrojene dönüştürülebilir. Biyogaz tipik olarak %60 ila %70 metan ve eser miktarda azot, amonyak, hidrojen ve hidrojen sülfit ile %30 ila %40 karbondioksit içerir. Metan biyogazın ve çöp gazının "aktif" bileşeni olduğundan, bunların yeniden şekillendirilmesi, buhar-metan reformuyla aynı yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

Gazlaştırma, bir katının (kömür, biyokütle, katı atık) veya bazen ağır bir sıvı (petrol, katran, zift) yakıtın, esas olarak hidrojene ve karbon monoksitten (CO) oluşan bir sentez gazına termokimyasal dönüştürülmesidir. Yalnızca karbondioksit (CO_2) ve su üreten yanma işlemlerinin aksine, gazlaştırma, oksijen sınırlı bir ortamda meydana gelen kısmi bir oksidasyon sürecidir. Nem içeriği %35'in altında olan biyokütle, buhardan hidrojeni çıkarmak için birincil enerji olarak da kullanılabilir. Nem içeriği çok yüksekse, biyokütle gazlaştırma veya süper kritik buhar gazlaştırma uygulanmadan önce kurutulmalıdır. Süper kritik buhar gazlaştırma, süper kritik basınç ve sıcaklıkta buhar kullanan bir süreçtir ve nem içeriğinden bağımsız olarak biyokütleyi hidrojene dönüştürmek için kullanılabilir.

Ototermal gazlaştırmada işlem adyabatiktir. Genel olarak, gazlaştırıcının adyabatik sıcaklığının, gazlaştırma ortamının tipine göre önemli ölçüde değiştiği kabul edilmektedir. Ayrıca, gazlaştırıcı daha yüksek bir sıcaklıkta çalıştığı için, hava ile gazlaştırmanın verimi, buharla gazlaştırmadan daha yüksek olmaktadır.

3.6. Fotoliz yöntemleri

Elektromanyetik radyasyonun yeryüzündeki ve uzaydaki her şeyi çevrelediği hemen herkes tarafından bilinmektedir. Bu temel etkileşim biçimi, yayılması için maddi bir destek gerektirmez. 6000 K civarında bir sıcaklığa sahip bir foton spektrumundan oluşan güneş ışığı, dünyaya ulaşmadan yaklaşık 8 dakika önce hareket eder. Yeryüzündeki yaşam, ışığa ve dünyanın sistemlerinde ışığın neden olduğu fotofiziksel ve fotokimyasal süreçlere bağlıdır. Foton madde ile etkileşime girdiğinde, çok sayıda fotofiziksel süreç meydana gelebilir. Bu nedenle, fotonlar sudan veya diğer maddelerden hidrojen üretmek için kullanılabilir. Su bölünmesinden hidrojen üretmek için bilinen fotofiziksel, fotokimyasal ve fotoelektrokimyasal yöntemler vardır. Fotonik radyasyonun ilginç bir özelliği, saydam veya yarı saydam ortamdaki yüzeyler yerine madde ile hacimler boyunca etkileşime girme yeteneğidir. Bir hacmin her noktasına enerji iletme imkânı, su ayrıştırma işlemleri için çekicidir. Bununla birlikte, saf su görünür ve yakın ultraviyole (NUV) aralıklarında radyasyonu emmez, bu nedenle su molekülünü yüzeyde güneş radyasyonu kullanarak doğrudan ayıramazsınız. Bu nedenle, güneş radyasyonunun maksimum enerjiye sahip olduğu görünür spektrum aralığında ışıkla uyarılan kimyasal reaksiyonları teşvik etmek için fotokataliz gereklidir. Fotokataliz, ışıkla tahrik edilen bir kimyasal reaksiyonun hızlandırma yöntemidir.

Hem homojen hem de heterojen fotokataliz sistemleri, fotonik radyasyona (ışığa) maruz kalma altında sudan hidrojen üretebilmektedir. Homojen çok bileşenli fotokatalitik sistemlerle sudan hidrojen üretimi için birçok yaklaşım vardır ve bazıları süper moleküler cihazlara dayanmaktadır. Homojen kataliz, gelecek için ümit verici görülmesine rağmen, düşük verimliliği ve son derece küçük üretim ölçeği (genellikle saatte mikro molden daha az) ve katalizörler için çok pahalı malzemeleri (Ru, Ir, Rh, vb.) nedeniyle çok pratik görünmemektedir. Hidrojen üretimi için homojen fotokataliz tipik olarak sulu veya susuz (sıvı) çözeltilerde gerçekleştirilir. İşlem, sıvı fazda çözünen en az bir katalizö-

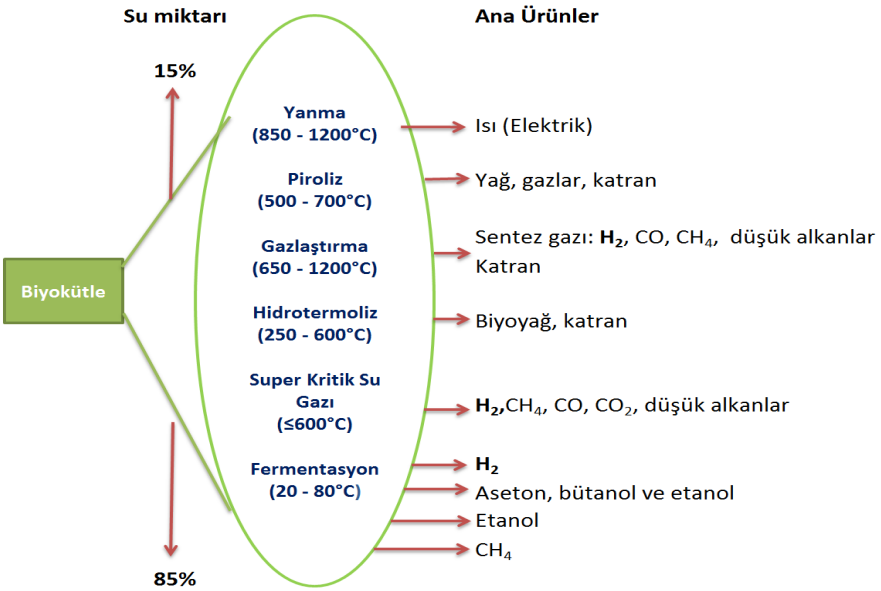
rü içerir (bilindiği gibi, homojen kataliz, katalizörün, reaksiyon katılımcıları/ürünleri ile aynı fazda olduğu anlamına gelir). Homojen fotokataliz, bir çözelti içindeki karmaşık moleküler yapıların ve suyun etkileşimine dayanır. Çoğu durumda, sudan hidrojen ve hidroksil üretmek için oksijen üreten reaksiyonlar homojen fotokataliz yoluyla gerçekleştirilir.

Sudaki hidrojen, foto-elektroliz ve güneş radyasyonu kullanılarak foto-elektrokimyasal işlemiyle ayrılır. Foto elektrot, bağımsız fotovoltaik, katalitik ve koruma katmanlarından oluşur. Bu elektrot üzerindeki fotovoltaik katman, ışığı emebilen yarı iletken malzemeden yapılmıştır. Fotovoltaik katman, suyun elektrolizi için gerekli olan elektrik enerjisinin üretimini sağlar. Hidrojen üretirken elektronlar elektrolite salınır [38].

3.7. Biyokütleden ısıl işlemle hidrojen gazı üretimi

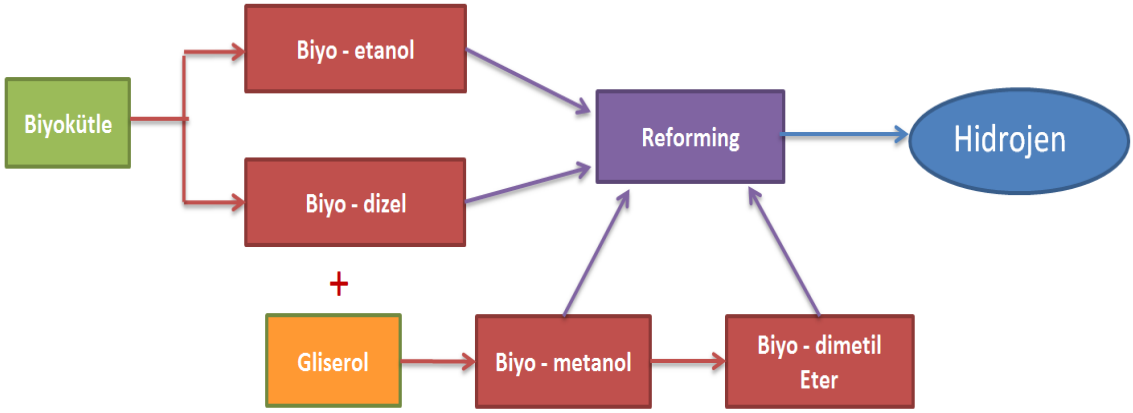
Biyokimyasal enerji, canlı organizmalar tarafından ihtiyaç duydukları malzemeleri inşa etmek için manipüle edilir. Bu tür enerji genellikle glikoz, sukroz, selüloz, karbonhidratlar ve proteinlerde depolanır. Fotosentetik mekanizmalar, bitkilerin ve mikroorganizmaların bu yakıtları üretmesine izin verir. Biyolojik hücrelerin çalışması ve enzimleri sentezlemek için özel mekanizmaları vardır. Bunlar, belirli kimyasal reaksiyonları katalize etmek için metalik, aktif merkezlere sahip karmaşık supramoleküler yapılardır. Canlı sistemlerdeki anahtar süreçlerden biri metabolizmadır. Tutarlı bir şekilde çalışmak için, canlı sistemlerdeki kimyasal reaksiyonlar belirli yollar veya metabolik diziler halinde düzenlenir. Bir hücredeki materyalin büyük bir kısmı, reaksiyonların yollarını yönlendiren yapısal genlerde kodlanan protein zincirleridir. Isı, yüksek enerjili kimyasallarla beslenen kimyasal reaksiyonla ilişkili bir yayılma süreci olarak metabolizma sırasında üretilir. Sentez sürecinden elde edilen materyaller oldukça düzenlidir ve düşük entropiye sahiptir. Hücre ayrıca gerektiğinde bu bileşikleri katabolizma adı verilen bir işlemle parçalayabilir. Hidrojen, çeşitli biyokimyasal substratlardan üretilebilir; ancak, herhangi bir biyokimyasal hidrojen üretim işleminin verimliliği genellikle düşüktür.

Biyokütleyi enerjiye çeviren sistemler Şekil 13'te gösterilmektedir. Bu dönüşümler biyokütledeki su miktarının yüzde 80'den az olduğu durumlarda ısıl işlemlerle gerçekleştirilir. Bunlardan en önemlileri piroliz, gazlaştırma ve süper kritik su gazlaştırmasıdır. Biyokütle yüzde seksenden fazla su içeriyor ise ısıl olmayan fermentasyon yöntemiyle hidrojen üretilir.



Şekil 13. Biyokütleyi enerjiye çeviren teknolojiler

Biyokimyasal hidrojen üretmenin dolaylı bir yolu, biyogaz (metan) ve biyoyakıt (metanol, etanol, biyodizel ve biyodimetileter) reformundan geçer. Biyogaz, biyometanol, biyoetanol ve biyodizel gibi biyoyakıt üretmek için iyi kurulmuş teknolojiler mevcuttur. Bu yakıtlar kendi başlarına değerli ürünlerdir, ancak yeşil hidrojen üretmek için de kullanılabilirler. Bu bağlamda biyogaz reformu uygulanabilir. Ayrıca biyometanol ve biyoetanol hidrojene dönüştürülebilir (Şekil 14).



Şekil 14. Biyoyakıtlardan reforming ile hidrojen eldesi

3.8. Isıl işlemsiz biyolojik hidrojen gazı üretim yöntemleri

Biyohidrojen üretimi yenilenebilir olması nedeni ile mevcut teknolojilere önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Mikrobiyal hidrojen üretimi birçok mikroorganizma tarafından oksijensiz ortamda gerçekleşen doğal bir reaksiyondur. Biyohidrojen üretimi direkt biyofotoliz, indirekt biyofotoliz, ışıksız fermentasyon ve ışıklı fermentasyon olmak üzere dört temel mekanizma ile gerçekleştirilebilir [49], [50]. Bu dört mekanizma Tablo 7'de özetlenmiştir [51].

Tablo 7. Biyohidrojen üretim mekanizmaları, kullanılan mikroorganizmalar, reaksiyonları, katalizör enzimleri, avantaj ve dezavantajları

Mekanizma	Organizma	Reaksiyon	Enzim	Avantaj	Dezavantaj
Biyofotoliz	Yeşil/Mavi-yeşil algler	$2H_2O \xrightarrow{\text{ışık}} 2H_2 + O_2$	[FeFe] Hidrojenaz	Su ve güneş ışığından üretilir	O_2 duyarlılığı, reaktör tasarım zorlukları, düşük H_2 verimi
Indirekt Biyofotoliz	Mavi-yeşil algler	$12H_2O + 6CO_2 \xrightarrow{\text{ışık}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ $C_6H_{12}O_6 + H_2O \xrightarrow{\text{ışık}} 12H_2 + 6CO_2$ $N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP \rightarrow$ $2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i$	[NiFe] Hidrojenaz Nitrojenaz	Heterosist oluşumu H_2 üretimini O_2 üretiminden ayırır	Reaktör tasarım zorlukları
Fermentasyon	Anaerobik bakteriler	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$	Hidrojenazlar	Yüksek H_2 üretim hızı, atıkların kullanılabilmesi, karışık mikroorganizma kültürleri kullanılabilir	Organik maddenin tam olarak parçalanamaması nedeniyle düşük verim
Foto-fermentasyon	Mor kükürtsüz bakteriler	$N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP \rightarrow$ $2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i$ $C_xH_yO_z + (2x - z)H_2O \xrightarrow{\text{ışık}} (y/2 + 2x - 2)H_2 + xCO_2$	Nitrojenaz	Küçük organik asitlerden veya organik asit atıklarından güneş enerjisi ile hidrojen üretilir	Biyoreaktör tasarım zorlukları, düşük hidrojen üretim hızı

Direkt biyofotolizde, algler ve siyanobakteriler fotosentez mekanizmasıyla ışık enerjisiyle su moleküllerini hidrojen ve oksijene ayırır. Üretilen hidrojen iyonları, hidrojenaz enzimi tarafından hidrojen gazına dönüştürülür. Dolaylı biyofotoliz, hidrojen üretiminin iki veya üç aşamada elde edildiği süreçleri kapsar [50, 52]. İlk aşamada karbonhidrat ve oksijen su, karbondioksit ve güneş enerjisinden elde edilir. İkinci aşamada, Siyanobakteriler karbonhidratlardan, sudan ve güneş enerjisinden hidrojen üretmek için kullanılır. Hidrojen, Siyanobakterilerin sahip olduğu nitrojenaz ve hidrojenaz enzim-

leri kullanılarak da elde edilebilir. Direkt ve indirekt biyofotoliz ile mikroalglerden biyohidrojen üretiminde karşılaşılan zorluklar (O_2 duyarlılığı, düşük hidrojen üretim verimi ve maksimim ışık enerjisi verimini elde etmeye bağlı reaktör tasarımının güçlüğü) nedeniyle uygulamadan uzak görülmektedir.

Işıksız fermentasyon yöntemiyle hidrojen üretiminde mikroorganizmalar karbonhidratça zengin substratları organik asit ve alkollere çevirerek bu sırada H_2 ve CO_2 üretirler. H_2 üretimi hidrojenaz enzimi tarafından katalizlenir. Işıksız fermentasyon ile bir mol glukozden maksimum 4 mol H_2 üretilir. Atık su veya zirai atıklar fermentatif hidrojen üretimde kullanılabildiğinden sistem hem enerji üretiminde hem de atıkların giderilmesinde rol oynayabilir. Fakat kontaminasyonun engellenmesi için atıkların önişlemden geçirilmesi gerekmektedir. Zirai atıklardan fermentatif biyohidrojen üretiminde biyokütlenin yapısında bulunan karmaşık karbonhidratların (nişasta, selüloz, lignoselüloz, hemiselüloz) kimyasal, enzimatik ve ısısal biyokütle önişlem yöntemleriyle bakterilerin tüketebileceği basit karbonhidratlara (şekerlere) dönüştürülmesi gerekir. Maksimum hidrojen veriminin elde edilmesi oluşan çeşitli şekerlerin (glikoz, zayloz, sokroz, zayluloz, arabinoz, mannoz, vb.) mikroorganizmalar tarafından ne kadar iyi tüketilebildiğine bağlı olduğundan, mikroorganizma seçimi önemli kriterlerden birini oluşturmaktadır [51].

Fermentatif biyohidrojen üretiminde mezofilik ve termofilik bakteri suşları, yaygın olarak da *Clostridium* türleri kullanılır. Reaktörler genellikle çeşitliliği bilinmeyen karışık kültürlerle beslenir. Kullanılan bakterinin çeşidi biyoreaktörde hidrojenin yanı sıra oluşacak yan ürünlerin (organik asit ve alkol) önemli ölçüde değişmesine yol açar. Kullanılan kültürler metanojenik bakterilerden arındırılarak metan üretimi engellenir. Fermentatif hidrojen üretiminde hidrojen gazı üretim reaksiyon hızı yüksek olmasına rağmen, substratın tam olarak parçalanamaması nedeni ile hidrojen üretim verimi düşüktür [53]. Ayrıca, üretilen hidrojenin saflığı diğer biyohidrojen üretim metotlarına (biyofotoliz, fotofermentasyon) göre oldukça düşük olduğundan (%30-40), H_2 saflaştırma sistemine ihtiyaç vardır. Fermentatif biyohidrojen üretiminde çeşitli biyoreaktör sistemleri pilot ve demo ölçekte gerçekleştirilmesine rağmen, bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.

Fotofermentatif hidrojen üretimi mor kükürtsüz fotosentetik bakteriler (PNSB) tarafından oksijensiz ortamda organik asitlerin ışık enerjisi kullanılarak parçalanması sonucu gerçekleşir. Hidrojen üretiminde O_2 oluşmadığından alglerde gözlenen O_2 inhibisyonu fotosentetik bakterilerde gözlenmez. Hidrojen üretimi nitrojenaz enzimi tarafından katalizlenir. Nitrojenaz enziminin asıl fonksiyonu nitrojen fiksasyonu olmasına rağmen, moleküler nitrojenin yokluğunda ve nitrojen kaynağı azlığında enzim H_2 üretimini katalizler (Reaksiyon 3).

$$2e^- + 2H^+ + 4ATP \rightarrow H_2 + 4ADP + 4P_i \quad (3)$$

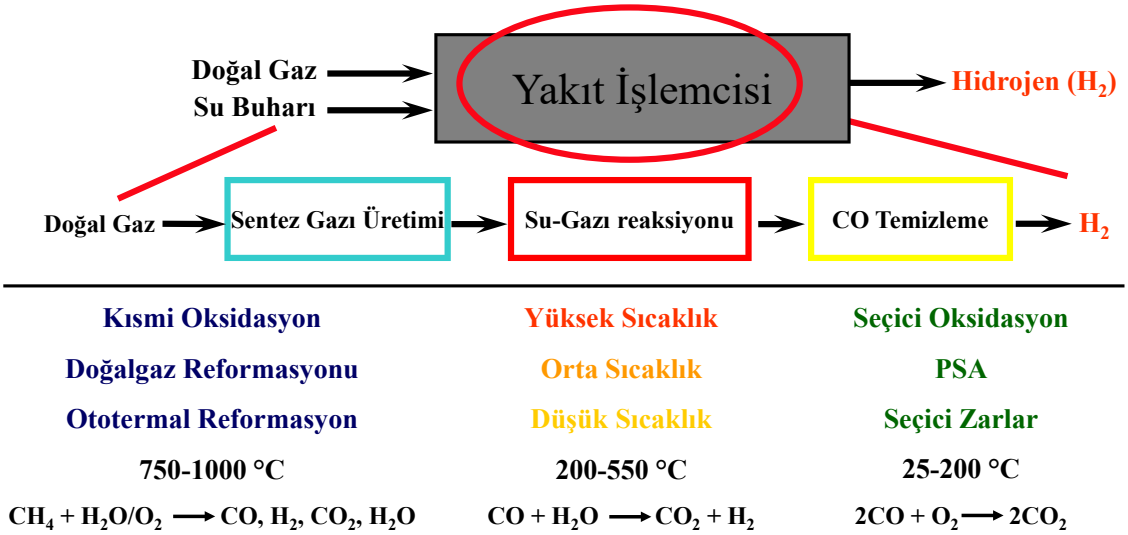
Nitrojenaz enzimi O_2 ve amonyum iyonu tarafından inhibe edildiğinden, fotofermentatif hidrojen üretiminin oksijensiz ortamda, nitrojen yokluğunda ve nitrojen kaynağı (amonyum veya amino asitler) kıtlığında gerçekleştirilmesi gerekir. Fermentatif hidrojen üretiminde olduğu gibi fotofermentatif hidrojen üretiminde de atıklar kullanılabildiğinden, sistem hem enerji eldesi hem de atık giderimi faydası sunmaktadır.

Fotofermenatif hidrojen üretiminde güneş ışığından faydalanıldığından maksimum güneş ışığı emilimini sağlayacak biyoreaktörlerin tasarlanması üretilen hidrojenin miktarını etkileyen en önemli faktördür. Işığın etkin kullanımı hidrojen üretim verimini ve hızını arttıracağından biyoreaktörler için gerekli arazi ihtiyacı azalacak ve sistemin ekonomik açıdan uygulanabilirliği mümkün olacaktır. Işık emilim verimi, yüzey/hacim oranı ile doğru orantılı olarak değişir. Reaktör iç çapının artması, reaktörün iç kısmında bulunan mikroorganizmalara ışığın ulaşmasını ciddi ölçüde azaltacağından, reaktör derinliğinin 2-4 cm'yi geçmemesi önerilir. Fotofermentatif hidrojen üretiminde üç tip biyoreaktör kullanılmaktadır. Bunlar; i) dikey panel reaktörler; ii) dikey kolon reaktörler ve iii) borusal reaktörler olarak sınıflandırılabilir [54]. ODTÜ Hidrojen Araştırma Laboratuvarı'nda fotosentetik hidrojen üretimi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar endüstriyel atıklardan (zeytinyağı,

şeker ve süt endüstrisi atıkları) hidrojen üretimi, fotobiyoreaktör tasarımı, fotofermentatif bakterilerin hidrojen üretiminin genetik modifikasyonlarla iyileştirilmesi şeklinde sınıflandırılabilir [55]. Avrupa Birliği 6. Çerçeve Programında 5 yıllık HYVOLUTION entegre projesi çerçevesinde biyokütleden ısıl işlemsiz 2 MW gücüne eşdeğer hidrojen üreten bir tesisin tasarımı yapılmış ve maliyeti analiz edilmiştir. Proje süresince birçok zirai/endüstriyel atıktan (patates kabuğu, miscantus, şeker fabrikası yan ürünleri koyu şerbet ve melas, arpa sapı gibi) fermentatif ve fotofermentatif hidrojen üretimi laboratuvar, pilot ve tatbikat düzeyinde gösterilmiştir [56, 57].

3.9. Doğal gazın reformu ile hidrojen üretimi

Bugün dünyada üretilen hidrojenin %95'i reformasyon teknolojisi kullanılarak fosil yakıtlardan üretilmektedir. Şekil 15'te doğal gazdan hidrojen üretim teknolojisi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 15. Doğal gazdan hidrojen üretimi teknolojisi [58]

Doğal gaz yüzde doksan yedinin üstünde metan (CH_4) ihtiva etmektedir. Doğal gazdan hidrojen üretiminde en yaygın olarak tercih edilen teknoloji Doğal Gazın Buharlı Reformasyonu (DBR) prosesidir. Kısmi Oksidasyon ve Ototermal Oksidasyon prosesleri daha ekonomik olmamakla birlikte olgunlaşmış teknolojilerdir. Sentez gazı üretiminde en çok araştırma yapılan konular katalizör ve reaktör geliştirilmesidir [59]. Sentez gazında önemli miktarda karbonmonoksit ve karbondioksit bulunmaktadır. Özellikle karbonmonoksitin giderilmesi hidrojenin saflaştırılması için çok kritiktir. Su gazı reaktörlerinde karbonmonoksit su buharıyla tepkimeye girer, karbondioksit ve hidrojene dönüşür. Bu işlem hidrojen üretimini arttırır ve karbonmonoksit miktarı önemli ölçüde azaltır. Ancak saf hidrojen elde edebilmek için, özellikle bu hidrojen PEM yakıt hücrelerinde kullanılacak ise, karbonmonoksit miktarının 10-80 ppm değerlerine düşürülmesi gereklidir. Yakıt işlemcinin son basamağı saflaştırma ünitesidir. Saflaştırma işlemlerinde karbonmonoksit kısmi oksidasyon ve seçici membranlar ile giderilir. Karbondioksit ise basınçla salınım adsorpsiyonu (PSA) işlemi veya vakumla salınım adsorpsiyonu (VSA) işlemleriyle temizlenir. Böylece saf hidrojen elde edilir.

3.10. Hidrojen üretim teknolojilerinin karşılaştırılması

Hidrojen üretim metotlarının doğal gazın buharlı reformasyonu maliyetine göre karşılaştırılması Tablo 8'de verilmektedir. Bu tabloda yeşil ile gösterilen metotlar yenilenebilir hidrojen üretim metotlarıdır. Her ne kadar yenilenebilir hidrojen üretim maliyeti yüksek görünse de Güneş Enerji Santrallarının (GES) ve Rüzgâr Enerji Santrallarının çoğalmasıyla elektrik maliyetinin azalması, elektrolizör maliyetlerinin düşmesiyle yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretim maliyetinin de azalacağı konusunda tahminlerde bulunulmasına vesiledir. Ülkemiz güneş enerjisinin yoğun olduğu bir bölgede olması hasebiyle gelecekte hidrojen üretim maliyetinin GES'lerden elde edilen elektrikle suyun elektrolizinden üretilecek bir kilogram hidrojenin maliyetinin 1,6-2,0 dolara mal olacağı Uluslararası Enerji Ajansı tarafından öngörülmektedir.

Tablo 8. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması [60, 61]

Yöntem	Enerji (kWh/Nm^3)		Teknolojideki son durum	Verim (%)	Maliyet DBR oranı
	Teorik	Pratik			
Doğalgazın Buharlı Reformasyonu (DBR)	0,78	2-2,5	Olgun	70-80	1
Metan/Doğal Gaz Piroliz			ArGe	72-54	0,9
H_2S Metan Reformasyonu	1,5	-	ArGe	50	<1
Kuru Gaz Reformasyonu			ArGe	47-58	~1
Kısmi Oksidasyon	0,94	4,9	Olgun	70	1,8
Nafta Reformasyonu			Olgun		
Atık Petrolün Buharlı Reformasyonu			ArGe	75	<1
Kömür Gazlaştırma	1,01	8,6	Olgun	60	1,4-2,6
Kömürün Kısmi Oksidasyonu			Olgun	55	
Buhar-Demir işlemi			ArGe	46	1,9
Kloralkali Elektrolizi			Olgun		
Suyun Elektrolizi (Elektrik)	3,54	4,9	Olgun	62-82	3-10
Suyun Elektrolizi (Güneş)			ArGe	10	>3
Suyun Yüksek sıcaklıkta Elektrolizi			ArGe	48	2,2
Termokimyasal Su Ayrışımı			ArGe	35-45	6
Biyokütle Gazlaştırma			Olgun	45-50	2,0-2,4
Fermentasyon			ArGe	20-60*	
Fotofermentasyon			ArGe	24-46*	
Karanlık+Foto Fermentasyon	1,2-3		ArGe	30-48*	
Su Fotolizi			Ön ArGe	<10	
Suyun Fotoelektrokimyasal Ayrışımı			Ön ArGe	0,5-12	
Suyun Fotokatalitik Ayrışımı			Ön ArGe		

*Teorik H_2 üretim veriminin yüzdesi olarak verilmiştir [57].

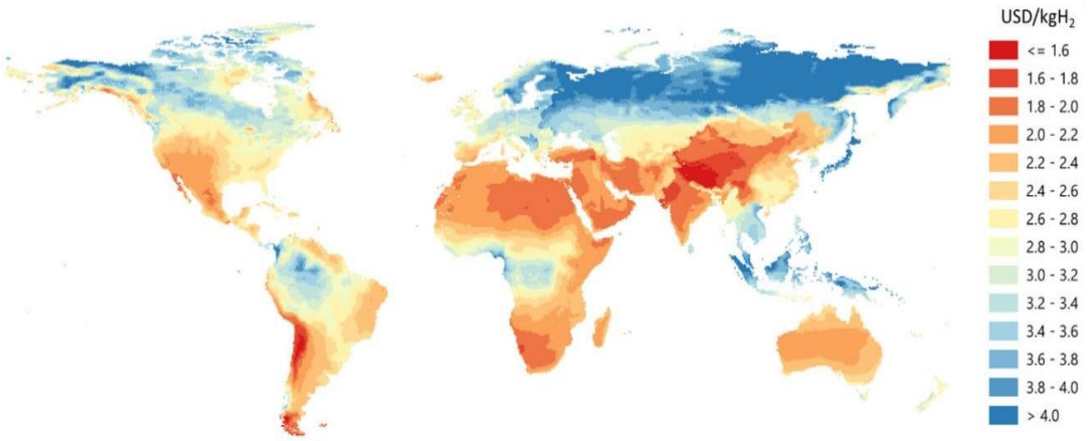
Tablo 8'de siyah ile gösterilen teknolojiler fosil yakıtlardan elde edilen dolayısıyla karbondioksit salınımı olan gri hidrojen üretimidir. Bu tekniklerden kömürün gazlaştırma ve kömür kısmi oksidasyonu uygulanan en eski teknolojilerdendir. Doğal gazı olmayan ancak kömür veya linyit yatakları

olan Türkiye, Güney Afrika ve Çin gibi ülkelerde halen bu teknolojiler uygulanmaktadır. İstanbul, Ankara ve İzmir'de 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında kurulan HAVAGAZI fabrikalarında kömürün kısmi oksidasyonu ve/veya buharla muamelesiyle gazlaştırılmasıyla üretilen havagazı 1990 yılına kadar, uzun bir süre ev ve iş yerlerinde kullanılmıştır. Havagazının bileşimi üretiminde kullanılan yönteme göre değişkenlik göstermekteydi, tipik bileşimi %50 hidrojen, %27 metan, %3 karbonmonoksit, %2 uçucu hidrokarbonlar gibi kalorili gazlar, %13 karbondioksit ve %5 azot gibi kalorisiz gazlardan oluşmaktadır. Doğal gazın şehirlere gelmesiyle havagazı şebekesinin yerine yeni doğalgaz şebekesi döşenmiştir. Havagazının tüm dünyada 230 yıllık bir mazisi bulunmaktadır [62].

Yirminci yüzyılda Almanya'da kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen sentez gazı ile sıvı yakıt üretmek için Fischer-Tropsch Sentezi geliştirilmiştir. Bu teknoloji kömürün sıvılaştırılması olarak da adlandırılmaktadır. Güney Afrika Cumhuriyeti'nde halen uygulanmaktadır. Bu proses doğalgazdan elde edilen sentez gazına da uygulanabilmektedir.

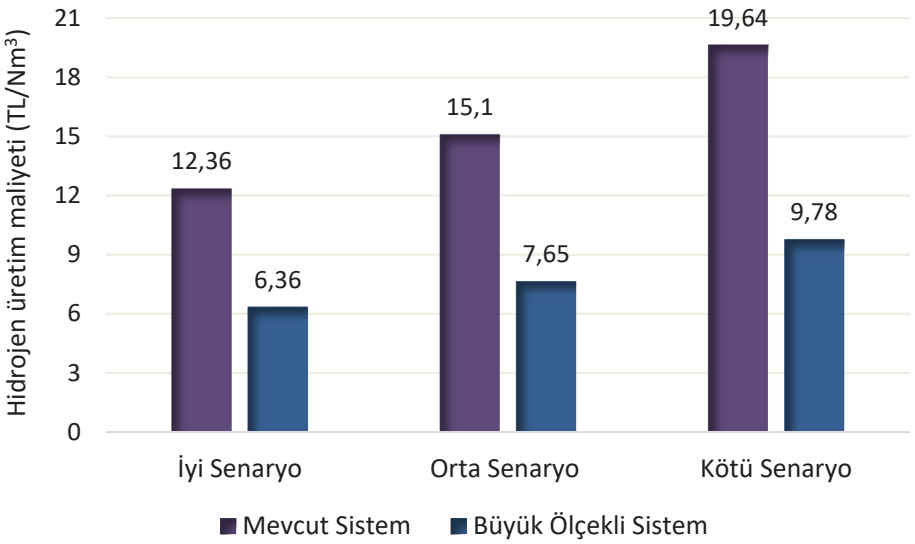
Yirminci yüzyılın en önemli buluşlarından biri de amonyak üretimi prosesinin geliştirilmesidir. Nobel Kimya ödülü alan bilim adamları Fritz Haber ve Carl Bosch yapay azot bağlama işlemi mucitleridir. Haber-Bosch prosesinde havadaki azotla kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen hidrojen katalitik reaktörlerde amonyağa dönüştürülür. Amonyak önemli bir kimyasaldır, yapay gübrenin ham maddesidir. Tablo 8'de de görüldüğü gibi hidrojenin kömürün gazlaştırılması prosesinden eldesi doğalgazın buhar reformasyonu prosesi (DBR) ile elde edilmesinden 1,4-2,6 kat daha maliyetlidir. Özellikle doğalgazı olan ülkeler DBR prosesiyle elde edilen hidrojenin havadaki azotla tepkimeye girmesiyle amonyak üretmeye başlamışlar ve amonyak maliyetini çok düşürmüşlerdir. Ülkemizde Haber-Bosch prosesi kullanılarak amonyak üreten fabrika Kütahya'da 1961 yılında hizmete girdi, ancak kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen hidrojenle üretilen amonyak, doğalgaz prosesi ile elde edilen amonyak ile rekabet edemedi. Ülkemizde amonyak önemli ölçüde ithal edilmektedir.

Ülkemizde hidrojen Petrol Rafinerilerinde nafta reformasyonu ile ve kloralkali tesislerinde üretilmektedir. Düşük kapasiteli saf hidrojen üretimleri, elektrik enerjisi kullanarak, elektrolizörlerle suyun ayrıştırılmasıyla üretilmektedir. Dünya genelinde, hibrit güneş PV ve kara rüzgâr sistemlerinden uzun vadede hidrojen üretim maliyetleri Şekil 16'da gösterilmektedir. Ülkemiz düşük maliyetli hidrojen üretimi potansiyeline sahiptir.



Şekil 16. Hibrit güneş PV ve kara rüzgâr sistemlerinden uzun vadede hidrojen maliyetleri [63]

Türkiye'de Gazbir-Gazmer tarafından Konya'da kurulan laboratuvarda güneş panellerinde üretilen elektriğin elektrolizöre beslenmesi ile hidrojen üretiminin mevcut durum olarak kabul edilmesi ve büyük ölçekli bir sistem için hidrojen üretim maliyetleri hesaplanmış ve Şekil 17'de verilmiştir. Bu hesaplamalarda elektrik ve su maliyetleri hesaba katılmıştır. Elektrolizör ömrüne göre iyi, orta ve kötü senaryolar belirlenerek hesaplamalar şekilde verilmiştir.



Şekil **17.** Hidrojen üretim maliyetlerinin karşılaştırılması

İyi, orta ve kötü senaryolar sırasıyla 9000 saat, 12000 saat ve 15000 saat elektrolizör ömrü dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 17'de gösterildiği gibi, orta senaryoya göre hidrojen üretim maliyetleri mevcut kullanılan sistem ve büyük ölçekli bir sistem için Nm^3 başına sırasıyla 15,1 ve 7,65 TL bulunmuştur.

BÖLÜM 4

Hidrojenin Depolanması

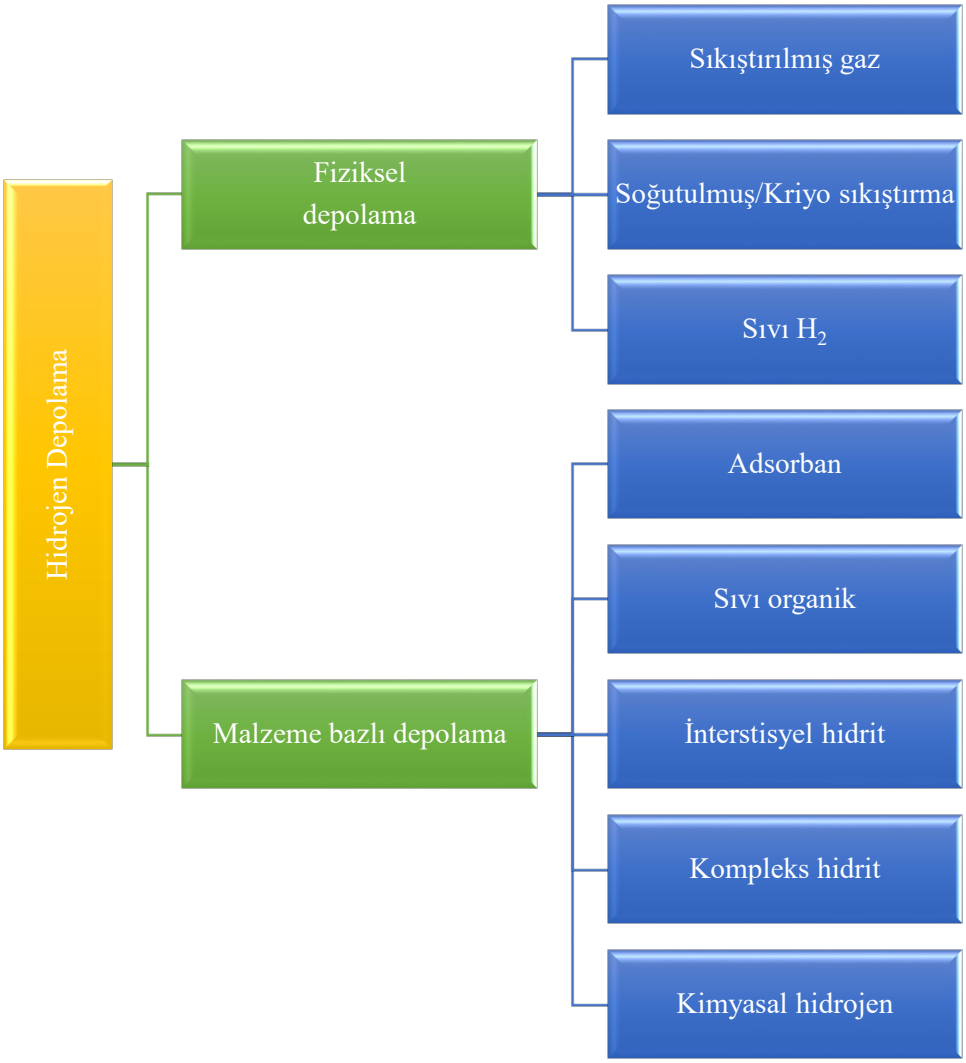
Enerji dönüşümü sürecinde, elektrik üretiminde yenilenebilir enerjilerin oranı önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle, rüzgâr gücü ve fotovoltaik kaynaklı elektrik üretiminde çok büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Bununla birlikte, sürekli olmayan ve üretimini talebe göre kısıp artıramayan yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti zamanla değişmektedir. Fakat fiziksel özellikleri nedeniyle elektrik temini, arz ve talebin sürekli dengelenmesini gerektirmektedir. Yenilenebilir enerjilerin oranı elektrik üretiminin kabaca dörtte birini aşarsa, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek için özel/ek önlemler gerekecektir. Aksi takdirde yenilenebilir enerjilerin üretimini veya kullanımını sınırlamak gerekebilir [15].

Diğer arz ve talep önlemlerinin yanı sıra, enerji depolama, gelişmiş sistem entegrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Günümüze kadar, pompalı depolamalı hidroelektrik santralleri, küresel elektrik üretiminin %3'ünden daha azını oluşturmalarına rağmen, elektrik depolama kapasitesine hâkim olmuştur. Küçük ölçekli tesisler için bataryalarda kısa süreli elektrik depolaması dinamik bir şekilde gelişmektedir. Bununla birlikte, daha yüksek miktarda elektriğin daha uzun süreli depolanması, hidrojen biçiminde kimyasal depolama gibi yeni depolama türleri gerektirmektedir [64].

Yenilenebilir enerji fazlalığı ile üretilen elektrikten elektroliz yoluyla hidrojen elde edilebilir. Üretilen hidrojen farklı depolama teknolojileri ile depolanabilir ve bir enerji ihtiyacı olduğunda kullanılmak üzere saklanabilir. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, 120,1 MJ/kg ile diğer yakıtlara göre en yüksek kütle bazlı alt ısıl değere sahiptir. Üst ısıl değeri de 141,88 MJ/kg'dır. Hidrojenin kütle bazlı enerji yoğunluğu sıvı hidrokarbonların enerji yoğunluğundan neredeyse üç kat daha yüksektir. Bununla birlikte, hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğu nispeten düşüktür. Ortam koşulları altında, sadece 0,01 MJ/L olan çok düşük bir hacimsel enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle, pratik kullanım amaçları için, depolama yöntemleriyle hidrojenin yoğunluğu önemli ölçüde artırılmalıdır. Uzun süreler boyunca denenmiş ve test edilmiş olan en önemli hidrojen depolama yöntemleri, sıkıştırma, soğutma veya ikisinin bir kombinasyonuna (hibrit depolama) dayalı fiziksel depolama yöntemlerini içerir. Ek olarak, çok sayıda yeni hidrojen depolama teknolojisi araştırılmaktadır. Bu teknolojiler, malzeme tabanlı depolama teknolojileri adı altında bir araya toplanabilir. Bunlar katıları, sıvıları veya yüzeyleri içerebilir. Şekil 18, mevcut hidrojen depolama yöntemlerine genel bir bakışı göstermektedir. Henüz sadece sıkıştırma ve sıvılaştırma yoluyla fiziksel depolamanın ticari bir önemi bulunmaktadır.

Fiziksel depolama yöntemleri, hidrojen depolama sektöründe en olgun teknolojiye sahip olan ve en sık kullanılan depolama yöntemidir. Yüksek basınçlı depolama ile soğutulmuş hidrojen depolaması arasında bir ayrım yapılabilmektedir. Sıvılaştırmak için hidrojenin çok düşük sıcaklıklara soğutulması gerektiğinden, kriyojenik hidrojen depolama terimi de kullanılır. Son olarak, sıkıştırma ve soğutma birleştirilirse, buna hibrit depolama da denir. Ticari olarak en önemlisi, sıkıştırılmış gaz olarak hidrojen depolamasıdır. Son kullanıcılar için, farklı tasarımlarda (350-700 bar) yüksek basınçlı depolama tankları mevcuttur. Sıvılaştırma ile depolama için daha yüksek bir yoğunluk elde edilebilir, ancak bu hidrojenin -253 °C'ye soğutulmasını gerektirmektedir. Depolama yoğunluğu ne kadar yüksekse, soğutma ve sıkıştırma için gereken enerji miktarı o kadar fazla olur, bu nedenle daha verimli depolama yöntemleri araştırılmaktadır. Elektriğin aksine, hidrojen uzun süreler boyunca büyük miktarlarda başarıyla depolanabilmektedir. Geniş yeraltı boşlukları gibi düşük basınçlı yeraltı depolama tesisleri, yenilenebilir kaynaklı elektriğin fazlası olan hidrojenle doldurulabilir ve elektrik sektörü

için bir tampon depo olarak kullanılabilir. Ancak, henüz kullanımda olan çok az yeraltı hidrojen depolama tesisi bulunmaktadır. Yeni depolama ortamları, malzeme tabanlı hidrojen depolama teknolojileridir. Bunlar arasında metal hidritler, kimyasal hidrojen depolama malzemeleri (sıvı organik hidrojen taşıyıcılar gibi) veya sorbentler (metalik organik çerçeveler, zeolitler ve karbon nanotüpler gibi) bulunur. Bu teknolojilerin çoğu hâlen araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Şu anda, hidrojen genellikle basınçlı gaz tanklarında ve bazı durumlarda kriyojenik sıvı tanklarında kamyonla taşınmaktadır. Bununla birlikte, her bir kamyon römorku yalnızca 0,5 ila 1 ton gaz halinde hidrojen veya 4 tona kadar sıvı hidrojen taşıyabilmektedir. En uzunu ABD ve Batı Avrupa'da olmak üzere bölgesel hidrojen boru hatları da mevcuttur. Uzun vadede, doğal gaz tedarik altyapısı (boru hatları ve yer altı depolama tesisleri) hidrojenin depolanması ve taşınması için de kullanılabilir. Taşıma maliyetleri açısından, sıvı hidrojen uzun mesafeli taşıma için uygun iken, sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojen daha kısa mesafeler için daha küçük miktarlarda uygundur. Boru hatları ise büyük hacimlerde taşıma için avantajlı olmaktadır [15].



Şekil 18. Hidrojen depolama yöntemlerinin sınıflandırılması

Farklı sektörlerde hidrojen kullanımının yaygınlaşması için ekonomik, verimli ve güvenli hidrojen depolama yöntemlerinin geliştirilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Esas olarak hidrojen depolama teknolojilerinden beklenilen koşullar aşağıda verilmiştir:

- Yüksek verim,
- Düşük maliyet,
- Yüksek dayanıklılık,

- Düşük hacim ve ağırlık,
- Standartlara uyum,
- Kısa dolum süresi,
- Uzun ömürlü olma.

Hidrojen ekonomisi (ve hidrojen enerji sistemleri) muhtemelen iki tür hidrojen depolama sistemine ihtiyaç duyacaktır. Bir tür ulaşım uygulamaları için kullanılmalı, diğeri ise sabit kullanıma uygun olmalıdır. Hem ulaşım hem de sabit uygulamaların belirli gereksinimleri ve kısıtlamaları mevcuttur. Ulaşım endüstrisinin, yenilikçi hidrojen enerji sistemlerinin ilk büyük ölçekli son kullanıcısı olması beklenmektedir. Ulaşım endüstrisi için hidrojen depolama gereksinimleri, sabit son kullanım gereksinimlerine kıyasla çok daha dikkatli karşılanmalıdır. Ulaşım endüstrisi için ideal hidrojen depolama sistemi için işletme gereksinimleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir [17]:

- En az 500 çevrimlik bir ömür ile hidrojen alımı ve salınımının tersinirliği,
- 4 bardan az çalışma basıncı,
- -50 ile 1508 °C aralığında çalışma sıcaklığı,
- Hidrojen alımı ve salınımının hızlı kinetiği,
- Gravimetrik depolama yoğunluğu, depolama sisteminin ağırlıkça %9'undan az olmaması,
- Hacimsel depolama yoğunluğu, depolama sisteminin 70 g H_2/L'sinden daha fazla olmaması,
- Güvenli çalışma,
- Halkın kabulü,
- Sistem maliyeti 20 \$/kg H_2'den daha ucuz olmalıdır.

Taşımacılık endüstrisi için ideal hidrojen depolama çözümü için işletme gereklilikleri katıdır ve birbiriyle bağlantılıdır. Bu gereklilikler, güvenilir, uygulanabilir, uygun fiyatlı ve temiz hidrojen depolama sistemleri ile tam olarak desteklenen bir taşıma sektörüne geçiş sırasında temel bilimsel zorlukları temsil eder. Şu anda, temelde tüm bu gereksinimleri bir arada karşılayabilecek hiçbir hidrojen depolama sistemi bulunmamaktadır.

Tablo 9'da Avrupa Enerji Depolama Birliği tarafından her bir hidrojen depolama teknolojisi için 2030 yılı için hedeflenen işletme şartları ve maliyet değerleri sunulmuştur.

Tablo 9. Hidrojen depolama teknolojilerinin hedefleri (Kaynak [65]'ten uyarlanmıştır)

Depolama Teknolojisi	Yoğunluk (kg H_2/m^3)	İşletme Sıcaklığı (K)	İşletme Basıncı (bar)	Maliyet (\$/kg H_2)
Sıkıştırılmış gaz	17-33	Ortam	350 & 700	400-700
Kriyojenik	35-40	20	1	200-270
Kriyo-sıkıştırma	30-42	20	350	400
Sorbentler	20-30	77	80	-
Metal hidritler	<150	Ortam-553	1-30	>500
Kimyasal hidritler	30	353-473	1	160-270
Kompleks hidritler	<120	423-573	1-50	300-450

Boru hattı altyapısı, bir enerji kaynağı olarak hidrojenin kapsamlı ve büyük ölçekli kullanımı için en iyi seçenek olmaktadır. Bununla birlikte, boru hatları yüksek seviyelerde başlangıç yatırımı gerektirmekte ve bu ancak karşılık gelen büyük hacimlerde hidrojen ile kendini amorti edebilmektedir. Bununla birlikte, hidrojen dağıtımı için boru hattı altyapıları geliştirmenin bir yolu, mikro ağlar olarak bilinen yerel veya bölgesel ağlardır. Bunlar daha sonra bölgeler arası ağlarda birleştirilebilir. Dünya çapında hâlihazırda büyük çoğunluğu hidrojen üreticileri tarafından işletilen toplam 4.500 km'den fazla hidrojen boru hattı bulunmaktadır [66]. En uzun boru hatları ABD'de, Louisiana ve Teksas eya-

letlerinde işletilmektedir ve onu Belçika ve Almanya izlemektedir. Dünya genelindeki hidrojen boru hatları Şekil 19'da görülmektedir.

Şekil 19. Dünya genelinde hidrojen boru hatları

Yenilenebilir enerjinin hidrojen biçiminde taşınması ve depolanması için bir başka olasılık, onu kamuya açık olan doğal gaz şebekesine beslemektir. 20. yüzyıla kadar, hidrojen bakımından zengin şehir gazı veya hacimce %50'nin üzerinde hidrojen içeriğine sahip kok fırın gazı, örneğin Almanya, ABD ve İngiltere'deki hanelere, uzun mesafelerde olmasa da gaz boru hatları yoluyla dağıtılmıştır.

Birçok ülke mevcut doğal gaz hatlarına hidrojeni eklemeyi düşünmüştür. ABD'de son kullanıcılar veya boru hattı altyapısı üzerinde önemli bir olumsuz etki olmaksızın hacimce %5 ile hacimce %15 aralığında hidrojen verilmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda, daha büyük hidrojen ilaveleri bazı durumlarda tesisatın pahalı dönüşümlerini gerektirmektedir [67]. Almanya'da bu oran hacimce %10'a kadar gerçekleştirilmiştir [68]. Prensip olarak, mevcut doğal gaz şebekesinde hacimce %10 hidrojene kadar gaz tesisatlarına, dağıtım altyapısına vb. zarar verme riski olmaksızın taşınabilir.

Uzunlukları göz önüne alındığında, birçok ülkede büyük gaz ağları önemli miktarda hidrojen depolayabilir. Doğal gaz boru hattıyla taşınan hidrojeni doğal gaz/hidrojen karışımından geri kazanmak için bir dizi farklı teknik yöntem mevcuttur. Bunlar, basınç salınımlı adsorpsiyon, membran işlemi veya elektrokimyasal gaz ayırma olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, tüm ayırma işlemleri ek teknik çaba ve enerji girdisi gerektirmektedir.

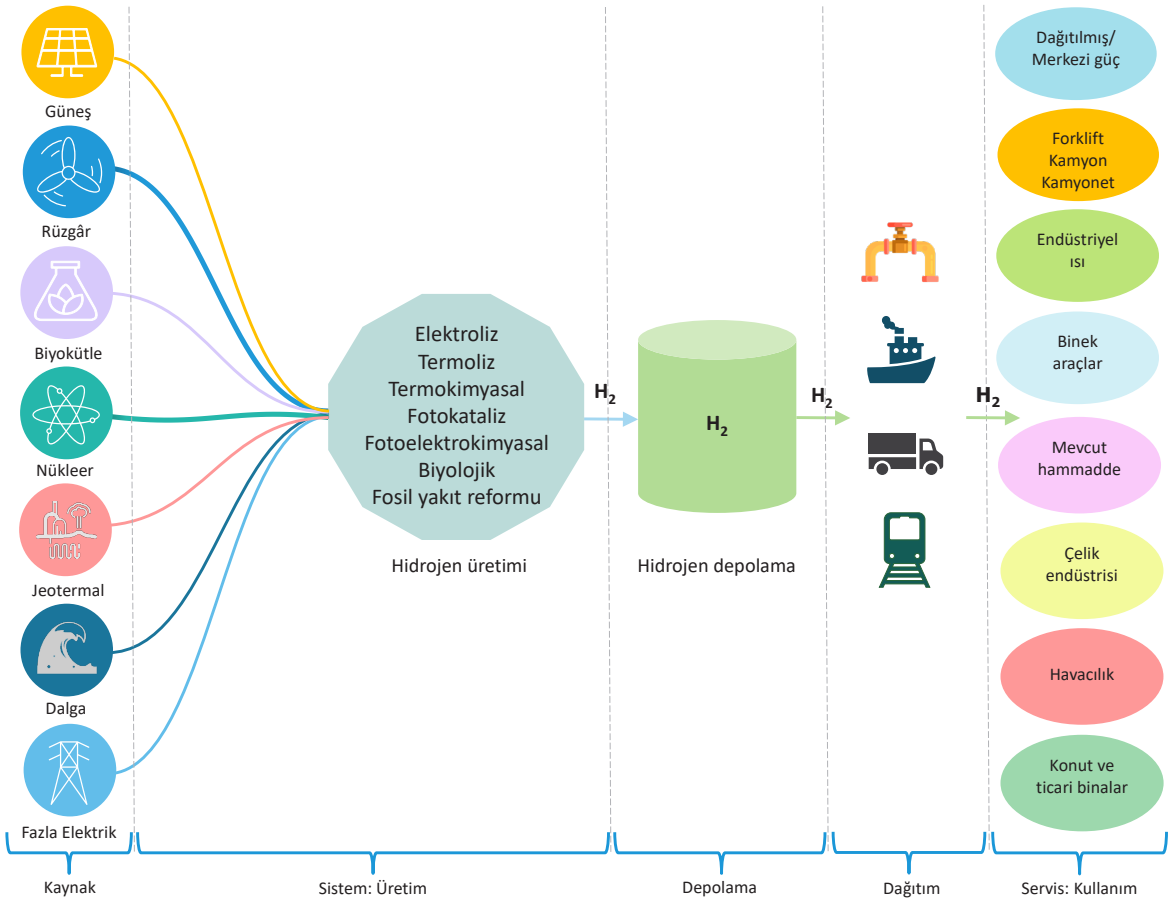
BÖLÜM 5

Hidrojenin Sektörel Kullanımı

Hidrojen çok yönlüdür ve farklı şekillerde kullanılabilmektedir. Bu kullanımlar iki temel kategoriye ayrılabilir [69]:

- Bir hammadde olarak hidrojen kullanımı: Önemi kabul görmüş olan bu kullanım büyümeye ve gelişmeye devam edecektir.
- Enerji geçişini sağlayan bir enerji vektörü olarak hidrojen kullanımı: Hidrojenin bu bağlamda kullanımı çoktan başlamıştır ve giderek artmaktadır. Önümüzdeki dönemde bu alanın çarpıcı bir biçimde büyüyeceği beklenmektedir.

Hidrojenin malzeme uygulamalarına örnek olarak, diğer maddelerin veya ara ürünlerin hidrojen yardımı veya ilavesi ile daha fazla işlenmesi veya rafine edilmesi gösterilebilir. Çoğu durumda, basınç, sıcaklık ve reaksiyonu hızlandıran katalizörler aracılığıyla istenen sonuçları verecek özel işlemler gerekmektedir. Bir enerji kaynağı olarak kullanımında, daha yüksek değerli enerji (elektrik), ısı ve mekanik enerji üretmek için hidrojende bulunan enerjinin kullanımı söz konusudur. Burada da kullanılan enerji dönüştürme teknolojisine bağlı olarak bir dizi farklı kullanım yolu mevcuttur. Hidrojenin yenilenebilir enerji ve fazla elektrik kaynaklarından üretilmesi, depolanması, dağıtımı ve kullanım alanları Şekil 20'de gösterilmektedir.

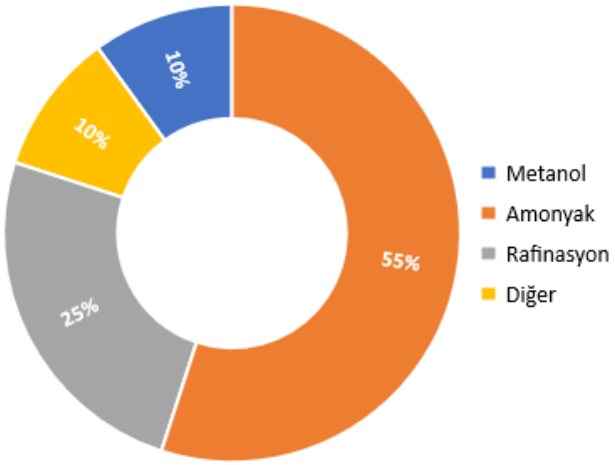


Şekil 20. Hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretimi, depolanması, dağıtım ve kullanım alanları

5.1. Malzeme ve endüstriyel uygulamalar

Hidrojen, kimyasal üretim ve endüstride ara ürünler ve/veya son ürünler üretmek, işlemek veya rafine etmek için kullanılan çok yönlü bir temel kimyasaldır. Dünya çapında 45 milyon ton/yıl ile 50 milyon ton/yıl arasında hidrojen üretildiği [70] ve Avrupa'da ise yaklaşık 7,8 milyon ton/yıl hidrojen kullanıldığı tahmin edilmektedir [71].

Hidrojen, kimyasal ürün sentezinde, özellikle amonyak ve metanol oluşturmak için büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Ara petrol ürünlerinin işlenmesinde hidrojenin kullanıldığı rafineriler diğer bir kullanım alanıdır. Böylelikle Şekil 21'de gösterildiği gibi dünyada üretilen hidrojenin yaklaşık %55'i amonyak sentezi için, %25'i rafinerilerde ve yaklaşık %10'u metanol üretimi için kullanılmaktadır. Dünya çapındaki diğer uygulamalar, küresel hidrojen üretiminin yalnızca yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır.



Şekil 21. Hidrojenin küresel kullanım dağılımı (Kaynak [15]'ten uyarlanmıştır)

Spesifik üretim proseslerindeki ve/veya belirli bir uygulama alanındaki ticari önemi hakkında kullanılan hidrojen miktarından nihai sonuçlar çıkarmak her zaman mümkün değildir. Küresel hidrojen üretiminin sadece küçük bir kısmı (yaklaşık %4) serbestçe alınıp satılmaktadır [72].

5.1.1. Amonyak

Amonyak karbonsuz bir kimyasal seçenektir ve üç atomlu hidrojeni içermektedir. Hem hidrojen taşıyıcısı ve depolama ortamı olarak düşünülebilir hem de birçok sektörde kullanımı mümkündür. Amonyak, soğutucu akışkan, ısı makinelerinde veya elektrik üreten sistemlerde çalışma akışkanı, birçok sistemde yakıt ve temizlik ürünlerinde veya gübrelerde ham madde olarak kullanılan en yaygın kullanıma sahip kimyasallardan biridir.

En önemli hidrojen-nitrojen bileşiği, amonyaktır (NH_3). Teknik olarak amonyak, büyük ölçüde Haber-Bosch prosesi ile elde edilmektedir. Bu süreç, hidrojen ve nitrojeni doğrudan sentez yoluyla birleştirmektedir. Bunun için ilk önce başlangıç malzemeleri olan nitrojen ve hidrojenin elde edilmesi gerekmektedir. Söz konusu nitrojen, havanın düşük sıcaklıkta ayrıştırılmasıyla elde edilirken, hidrojen günümüzde genellikle doğal gaz buhar reformundan üretilmektedir. Amonyak 500 °C sıcaklıkta ve 200 bar basınçta sentezlenmektedir. Üçlü bağlı atmosferik nitrojenin (N_2) reaksiyona eğilimi çok az olduğundan, reaksiyonun gerçekleşmesi için demir bazlı bir katalizörün varlığı gerekmektedir. Hidrojen ve nitrojen elementleri aşağıdaki reaksiyon denklemine göre 3:1 oranında reaksiyona girmektedirler:

$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3 \tag{4}$$

Amonyak, keskin bir kokuya sahip renksiz bir gazdır. Suda kolaylıkla çözünebilmektedir. Amonyağın neredeyse %90'ı gübre üretiminde kullanılmaktadır. Bu amaçla amonyağın büyük bir kısmı katı gübre tuzlarına veya katalitik oksidasyondan sonra nitrik aside (HNO_3) ve tuzlarına (nitratlara)

dönüştürülür [73]. Yüksek buharlaşma enerjisi nedeniyle amonyak, soğutma tesislerinde çevre dostu ve ucuz üretilen bir soğutucu olarak da kullanılır; teknik adı R-717'dir.

5.1.2. Yakıt üretimi

Hidrojen, ham petrolü benzin ve dizel gibi rafine yakıtlara dönüştürmek ve ayrıca bu yakıtlardan kükürt gibi kirletici maddeleri çıkarmak için kullanılır. Rafinerilerde hidrojen kullanımı son yıllarda farklı nedenlerle artmıştır [69]:

- Dizelde düşük sülfür gerektiren sıkı düzenlemeler,
- Rafine etmek için daha fazla hidrojen gerektiren düşük kaliteli "ağır" ham petrol tüketiminin artması ve
- Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ekonomilerde artan petrol tüketimi.

Hidrojen ayrıca metanol (CH_3OH) üretmek için önemli bir temel maddedir. Şu anda dünya çapında petrol rafinerileri tarafından tüketilen hidrojenin yaklaşık %75'i, doğal gaz veya diğer hidrokarbon yakıtlardan hidrojen üreten büyük hidrojen tesisleri tarafından sağlanmaktadır. Basınç altında ve yüksek sıcaklıkta, aşağıdaki reaksiyona göre metanol oluşturulur:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \tag{5}$$

Metanol veya metil alkol, basit bir alkoldür ve oldukça zehirlidir. Yapısal olarak bileşimi metana (CH_4) benzer, ancak bir hidrojen atomu bir hidroksil grubu (OH) ile ikame edilir. Metanol üretimi/sentezi, karbon monoksitin katalitik hidrojenasyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Metanol, içten yanmalı motorlarda doğrudan yakıt olarak ve doğrudan metanollü yakıt hücrelerinde kullanılmaktadır. Yakıt katkı maddeleri metanolden üretilmektedir ve bitkisel yağların metil esterlerini (biyodizel) oluşturmak için de kullanılmaktadır.

5.2. Ulaşımda yakıt olarak kullanım

Küresel enerji tedarikinin en yoğun tüketicilerinden biri olan ulaşım endüstrisi, gelenekselden akıllı enerji sistemlerine geçişi gerektirmektedir ve hidrojen, ulaşım endüstrisinin sürdürülebilir geleceği için çok iyi bir adaydır [74]. Şekil 22'de hidrojenin ulaşım sektöründeki kullanım alanları gösterilmektedir. Son araştırmalar, son derece ümit verici bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin, fosil yakıtın yerini alma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Hidrojen petrolden üç kat daha yüksek ısıtma değerine sahip en temiz yakıttır. Ancak hidrojen, doğal bir enerji kaynağı değildir, bu nedenle çeşitli enerji ve malzeme kaynakları kullanılarak işlenmesi gerekir [75]. Sonuç olarak, hidrojenin üretim maliyetleri oldukça yüksektir ve fosil yakıtlara kıyasla neredeyse üç kat daha pahalıdır [76].

Hidrojen araçlarının gerçekten sürdürülebilir olması için, hidrojenin tamamen sürdürülebilir bir şekilde üretilmesi, depolanması, teslim edilmesi ve kullanılması gerekir ki bu da hidrojen ekonomisinin zorluklarından biridir. Hidrojen, hidrojen yakıtlı araçların yan ürün olarak su buharına sahip olmasının yanı sıra çok yönlülük avantajına sahiptir. Hidrojenin ulaşım sektöründeki farklı araçlarda kullanımları aşağıda sıralanmıştır [69]:

- **Havacılık:** Sivil havacılıkta, hidrojenle çalışan yakıt hücreleri, bir süredir uzay yolculuğunda kullanıldıkları için uçaklar için potansiyel enerji sağlayıcıları olarak görülmektedir. Böylelikle yakıt hücresi modülleri, acil durum jeneratör setleri veya yardımcı güç ünitesi olarak hava taşıtı elektrik sistemine elektrik sağlayabilir. Daha gelişmiş konseptler, ticari uçaklarla havaalanı hareketleri için ana motorun ve burun tekerleğinin çalıştırılmasını da içermektedir.
- **Trenler:** Elektrikli lokomotiflerde hareket gücü, sabit akım iletkenleri (havai hatlar, iletken raylar) ve araçların üzerindeki akım toplayıcılar aracılığıyla sağlanır. Ancak teknik, ekonomik veya diğer nedenlerle her demiryolu hattı elektrikli hale getirilemez. Özellikle düşük taşıma hacmine sahip hatlarda, hatların elektrifikasyonu için gerekli olan yüksek ön yatırım her zaman haklı

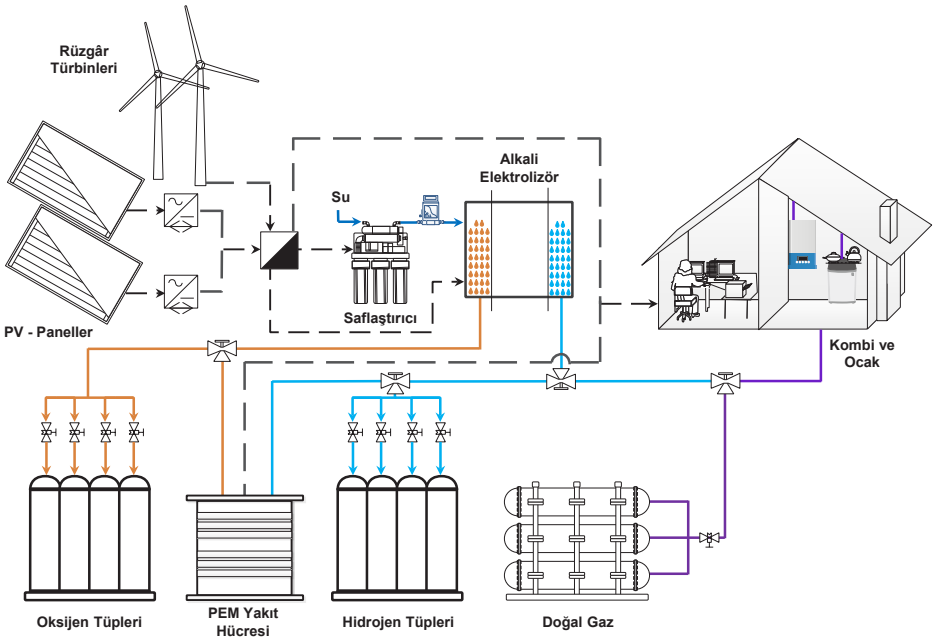
gösterilemez. Ayrıca, nakliye mallarının taşınması için vinçler de kullanılıyorsa, havai hatlar manevra için kullanılamaz. Yeraltı madenciliğinde, bunun aksine, çekiş araçları hava kirleticiler olmadan çalışmak zorundadır. Enerji deposu ve enerji kaynağı olarak hidrojeni kullanan raylı araçlar ek bir alternatif sunabilir. Yakıt hücresi ile çalışan raylı araçlar, kirletici içermeyen çalışmanın avantajını, dizel işletime kıyasla düşük altyapı maliyetleri avantajıyla birleştirir.

- **Otobüsler:** Karayolu taşımacılığı açısından, toplu taşıma ağındaki otobüsler, hidrojen ve yakıt hücreleri için en kapsamlı şekilde test edilen uygulama alanıdır. 1990'ların başından bu yana, dünya çapında, özellikle Kuzey Amerika'da, Avrupa'da ve Asya'da olmak üzere, birkaç yüz otobüs hidrojenle çalıştırılmakta ve kullanılmaktadır. Hidrojen içten yanmalı motorlu otobüslerde hâlâ kullanılsa da otobüs geliştiricileri artık neredeyse tamamen yakıt hücreli ve elektrikli otobüslere odaklanmış durumdadır. Küçük yakıt hücreli otobüs filolarının kullanımı, teknolojik gelişmeye ve temiz hava politikasına katkıda bulunmanın bir yolu olarak kentsel alanlarda teşvik edilmektedir.
- **Binek otomobiller:** Bataryalı elektrikli araçların yanı sıra, hidrojenle çalışan yakıt hücreli binek otomobiller, motorlu özel ulaşım için sıfır emisyonlu alternatif sürüş seçeneğidir. Yakıt hücreli orta büyüklükteki araçların fiyatları hâlen içten yanmalı motorlu binek araçların oldukça üzerindedir (yaklaşık 60.000 €/$). Yakıt hücreli elektrikli araçların seri üretiminin başlamasıyla birlikte araç maliyetlerinin ve fiyatlarının önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir.

Şekil 22. Hidrojenin ulaşım sektöründe kullanımı [69]

5.3. Vaka çalışması: hidrojenin doğal gaz hattına karıştırılması

Konya şehrinin Karatay ilçesinde Gazbir-Gazmer firması ile gerçekleştirilen projeyle ülkemizde ilk defa doğal gazın hidrojen ile karıştırılması ve evsel cihazlara beslenmesi hayata geçirilmiştir. Böylelikle, doğal gazın yakılması sonucu açığa çıkan emisyonların azaltılması ve yanma veriminin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Şekil 23'te yenilenebilir hidrojeni doğal gaza karıştırmak ve kombi ve ocak gibi evsel cihazlarda kullanmak için önerilen sistem gösterilmektedir.



Şekil 23. Vaka çalışması yapılan sistemin şematik gösterimi (Kaynak [77]'den uyarlanmıştır)

Şematik olarak gösterildiği gibi sistemde, PV paneller, rüzgâr türbinleri, alkali su elektrolizörü, hidrojen ve oksijen tüpleri, PEM yakıt hücresi gibi birçok alt sistem elemanları bulunmaktadır. Hidrojen, mevcut doğal gaz boru hatlarına karıştırmak için hacimsel olarak %20'ye kadar doğal gaz ile karıştırılacaktır [77].

PV panelleri, sistemin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Üretilen güç, hidrojen üretmek için alkali su elektrolizörüne verilmektedir. Elektrik gücünün geri kalanı, güneşin en yoğun olduğu zamanlarda binadaki diğer ekipmanların elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Rüzgâr türbini ise sisteme ek elektrik gücü sağlamak için kullanılacaktır. Üretilen elektrik gücü özellikle güneşin yoğun olmadığı zamanlarda elektrolizöre ve diğer cihazlara beslenecektir.

Hidrojen üretimi için alkali elektrolizör seçilmiştir. Bu elektrolizör ile su arıtma ünitesinden gelen deiyonize edilmiş suyun elektrokimyasal reaksiyonla hidrojen ve oksijene dönüşmesi gerçekleştirilmektedir. Elektrik gücünün, PV paneller ve rüzgâr türbininden alkali elektrolizöre beslenmesi planlanmıştır. Bulutlu günlerde veya gece güneşin mevcut olmadığı durumlar için, yakıt hücresi elektrolizör ünitesinde kullanılacak elektriği üretebilecektir.

Şekil 24.a'da ocakta hacimsel olarak %100 doğal gazın yanması Şekil 24.b'de ise %80 doğal gaz ve %20 H_2 karışımının yanmasının görüntüleri verilmiştir.

(a) **(b)**

Şekil 24. Ocakta hacimsel olarak **(a)** %100 doğal gaz **(b)** %80 doğal gaz ve %20 H_2 karışımının yanmasının görüntüsü

10 bar basınçta elektrolizörden üretilen hidrojen ve oksijen gazları tüplerde depolanacaktır. Depolanan hidrojen, ev uygulamaları için doğal gaza enjekte edilebilecek, oksijen ise yakıt hücresi ünitesine beslenecektir. PEM yakıt hücresi, güneş ve rüzgâr enerjileri sistemin çalışması için yeterli olmadığında elektrik üretmek için bir yedek birim olarak düşünülmüştür.

BÖLÜM 6

Hidrojenin Enerji Seçeneği Olarak Kullanımı

Hidrojen, pratik olarak dünyada sadece molekül biçiminde var olduğundan, kullanılabilmesi için önce ayrıntılı bir işlemle üretilmesi gerekmektedir. Peki, hidrojen tam olarak ne için üretilir? En önemli uygulama alanları nelerdir? Aslında hidrojen elementi için birçok olası uygulama vardır. İki ana kullanım alanı: malzeme uygulamaları ve enerji uygulamalarıdır. Hidrojenin malzeme uygulamalarında diğer maddelerin hidrojen yardımıyla veya hidrojen ilave edilerek daha fazla işlenmesi veya rafine edilmesi sağlanmaktadır. Çoğu durumda, basınç, sıcaklık ve reaksiyonu hızlandıran katalizörler aracılığıyla istenen sonuçları veren özel işlemler gerekmektedir. Bir enerji kaynağı olarak kullanımı, daha yüksek değerli enerji (elektrik), ısı ve (nihayet) mekanik enerji üretmek için hidrojende bulunan enerjiyi kullanmayı içermektedir. Burada da kullanılan enerji dönüştürme teknolojisine bağlı olan bir dizi farklı kullanım yolu bulunmaktadır.

Enerji uygulamaları açısından, hidrojen her şeyden önce ikincil bir enerji kaynağı ve kimyasal enerji deposudur. İçerdiği enerji, termal olarak çalışan ısı motorlarında veya yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Hidrojen (H_2), saf oksijen (O_2) ile yandığında, aşağıdaki reaksiyona göre su oluşur:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O \tag{6}$$

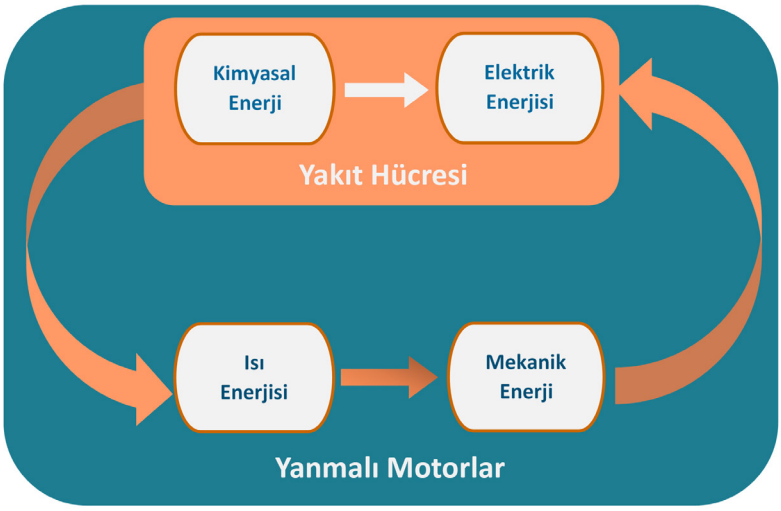
Hidrokarbonların yanmasının aksine, bu reaksiyon ile karbondioksit oluşmaz. Hidrojen hava ile yakılırsa azot oksitler de üretilecektir. Yanma havasının oranına ve oksijen içeriğine bağlı olarak, hidrojen yanmasında 2000 °C ile 3000 °C arasında çok yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Hidrojen genellikle yüksek enerji içeriğine ve çekici yanma özelliklerine sahip temiz ve güçlü bir yakıt olmasına rağmen, günümüzde hidrojenin enerji amaçlı kullanımları arasında yanma nadiren yer almaktadır. Yakın geçmişte hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda çok az araştırma ve geliştirme yapılmıştır.

Diğer yandan, uzay yolculuğunda hidrojen hala roket motorları için bir itici gaz olarak kullanılmaktadır. Bunun dışında, eğer herhangi bir ekonomik kullanım bulunamazsa, endüstride bir yan ürün olarak biriken hidrojen diğer yakıtlarla birlikte yakılmaktadır. Son yıllarda yakıt hücresi teknolojisinde kaydedilen teknik ilerleme göz önüne alındığında, hidrojenin yakıt olarak kullanımı neredeyse tamamen yakıt hücresine odaklanmıştır [15].

6.1. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi

Yakıt hücreleri yakıtın kimyasal enerjisini yüksek elektrik verimliliği ve düşük çevresel etki ile doğrudan elektriğe dönüştüren yeni gelişen enerji teknolojilerinden biridir. Şekil 25, yanmalı motor gibi geleneksel bir elektrik üretim teknolojisi ile bir yakıt hücresinden elektrik enerjisi üretimindeki adımları karşılaştırmaktadır. Bu şekilden de görülebileceği gibi, yanmalı bir motorda kimyasal enerji önce ısı enerjisine dönüştürülür ve bu enerji, elektrik enerjisi üretilmeden önce mekanik enerjiye dönüştürülür. Örneğin, Rankine çevrimi prensibine göre çalışan bir enerji santralinde, yakıtın kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gerçekleşen adımlar şu şekildedir: (i) fosil yakıtın yakılması ısı üretir (kimyasal enerjiden ısı enerjisine); (ii) ısı, suyu kaynatmak ve aşırı ısıtmak için kullanılır ve buhar üretilir; (iii) buhar türbini çalıştırır (ısı enerjisinden mekanik enerjiye); ve (iv) türbin tarafından üretilen mekanik enerji, bir jeneratör vasıtasıyla elektriğe dönüştürülür (mekanik enerjiden elektrik enerjisine). Ancak bir yakıt hücresinde yakıtın kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü tek adımda gerçekleşmektedir.

Yakıt hücresinde, oksijen ve hidrojenin reaksiyonu ile su oluşumu ve doğru akım üretimi gerçekleşmektedir. Bir yakıt hücresini çalıştırmak için ihtiyaç duyulan unsurlar yakıtın koşullandırılması, hava ve artık gaz, soğutma devresi, güç devresi, nemlendirici hattı, ölçüm ve kontrol teknolojisi, güvenlik ekipmanı ve ilk çalıştırma için ek ekipmandır. Bir yakıt hücresi sistemi, seri olarak bağlanmış ayrı yakıt hücrelerinden (yığın olarak da bilinmektedir) oluşur.



Şekil 25. Yakıt hücrelerinin ve yanmalı motorların karşılaştırılması (Kaynak [78]'den uyarlanmıştır)

Yakıt hücresinin temel bileşeni, yakıt hücresinin performansını belirleyen membran elektrot birleşimidir (MEA). Membran elektrot birleşimi iki gözenekli, katalizör katkılı elektrot (katot ve anot), aralarında düzenlenmiş bir elektrolit (iyonik iletken) ve gaz difüzyon katmanlarından oluşur. Elektrolit, gazları birbirinden ayırır, ancak belirli iyonlar (elektrik yüklü partiküller) için geçirgendir. Anot tarafına beslenen hidrojen gazı, katalizör etkisinden dolayı iyonlara ayrılır ve elektronlar verir:

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \tag{7}$$

Bu elektronlar, harici bir devre aracılığıyla katoda yönlendirilir ve böylece elektrik ve ısı elde edilir. Katotta oksijen aşağıdaki reaksiyona göre iyonlara ayrılacaktır:

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-} \tag{8}$$

Son olarak, serbest oksijen ve hidrojen radikalleri, elektriksel olarak nötr olan suyu oluşturmak için birleşir:

$$4H^+ + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O \tag{9}$$

Reaksiyon gazlarının biriktiği taraf ve devreyi kapatmak için gerekli olan elektrolit boyunca iyon taşıma tipi hücre türüne bağlıdır. Son olarak, gaz difüzyon katmanı, elektronların ve proses ısısının uzaklaştırılmasıyla birlikte içeri akan gazların ve reaksiyon ürünlerinin homojen bir dağılımını sağlar.

6.2. Yakıt hücrelerinin çeşitleri

Yakıt hücreleri, kullanılan elektrolit ve yakıta göre kategorize edilebilir. Ana türler polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi, alkali yakıt hücresi, erimiş karbonat yakıt hücresi ve katı oksit yakıt hücresidir. Çalışma sıcaklıkları, tipik elektrolit malzemesi, yük taşıyıcı, tipik katalizör malzemesi, tipik ara bağlantı malzemesi ve tipik yakıt dâhil olmak üzere bu yakıt hücresi türlerinin özellikleri Tablo 10'da verilmiştir. Yakıt hücrelerinin ilgili kimyasal türler ve yük taşıyıcılar açısından farklılıkları Şekil 26'da gösterilmektedir.

Yakıt hücreleri çoğunlukla kullanılan elektrolitin cinsine göre sınıflandırılırlar. Kullanılan elekt-

rolite göre hücrede meydana gelen reaksiyonlar, kullanılan elektrotlar, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı ve kullanılan yakıt değişmektedir. Yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri birbirine benzerlik gösterir. Aralarındaki fark, çalışma koşulları ve uygulama alanlarından kaynaklanmaktadır [79].

PEM yakıt hücreleri elektrolit ortam olarak katı polimer kullanılmasından dolayı diğerlerinden farklıdır. Özellikle ulaşım, portatif uygulamalar, birleşik ısı ve güç sistemleri için kullanılır. Yüksek performanslı polimerlerin bulunmasından sonra PEM yakıt hücreleri uzay çalışmalarında ve özel askeri sistemlerde kullanılmak üzere geliştirilmeye başlanmıştır. PEM yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 80 ile 120 °C arasındadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan (150-200 °C) PEM yakıt hücreleri için özel membranlar geliştirilmektedir.

Tablo 10. Başlıca yakıt hücresi türlerinin ana bileşenleri ve çalışma koşulları ([15, 78]'den derlenmiştir)

Özellikler	**PEM**	**Fosforik Asit**	**Alkali**	**Erimiş Karbonatlı**	**Katı Oksit**
Çalışma sıcaklığı (°C)	60-200	200	60-220	~ 650	600-1000
Yük taşıyıcı	H^+	H^+	OH^-	CO_3^{2-}	O^{2-}
Elektrolit malzemesi	Polimer membran	Sıvı H_3PO_4	Sıvı KOH	Erimiş Karbonat	Seramik
Katalizör malzemesi	Platin	Platin	Platin	Nikel	Nikel/yitriya ile stabilize zirkonya
Yakıt	H_2, CH_3OH	H_2	H_2	H_2, CH_4	H_2, CH_4, CO
Ara bağlantı malzemesi	Karbon bazlı	Karbon bazlı	Karbon bazlı	Paslanmaz çelik bazlı	Seramik bazlı
Elektriksel verim (%)	30-60	30-40	50-60	55-60	50-70
Tahmini ömür (saat)	5000 (hareketli)	30.000-60.000	5000-8000	20.000-40.000	90.000'e kadar

PEM yakıt hücrelerinde hidrojen anottan, oksitleyici gaz da (hava veya oksijen) katottan sürekli olarak beslenmektedir. Gaz geçirgenliği yüksek katalizör olarak Pt içeren karbon destekli gaz difüzyon elektrotları zarın iki yanında bulunmaktadır. Bu tabakaların birleşimine membran elektrot bileşimi (MEA) denilmektedir. Anotta oluşan protonlar zarı geçerek katottaki oksijenle birleşerek su üretilir. Anot ve katot yarı reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \text{ (Anot)}$$
$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O \text{ (Katot)}$$

Anotta Pt elektrot yardımıyla hidrojen, proton ve elektronlarına ayrılır. Daha sonra sadece proton geçirme özelliğine sahip zardan geçen protonlar katota gelir ve burada dış bir devre yardımı ile toplanan elektronlar ve oksijen/hava ile reaksiyona girerek su oluştururlar. PEM yakıt hücresinin en önemli kısmı yarı reaksiyonların meydana geldiği ve proton iletiminin sağlandığı zar-elektrot yapılarıdır. Yakıt hücresinin verimli çalışabilmesi için uygun su yönetiminin sağlanması ve zarın proton ve su aktarım özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Zarın kuruması proton iletkenliğini düşürdüğünden dolayı çoğu uygulamada reaktan gazlar nemlendirildikten sonra hücreye beslenir. Suyun fazlası ise elektrotlarda su taşmasına sebep olur ve bu da reaktan gazların katalizör tabakasına ulaşmasını engeller. PEM yakıt hücresindeki polimerik zarın görevi proton iletkenliği, reaktan gazların ayrımı ve elektronik izolasyondur. Kullanılan zarın katı olması, korozyonu ve elektrolitle ilgili sorunları azaltmaktadır.

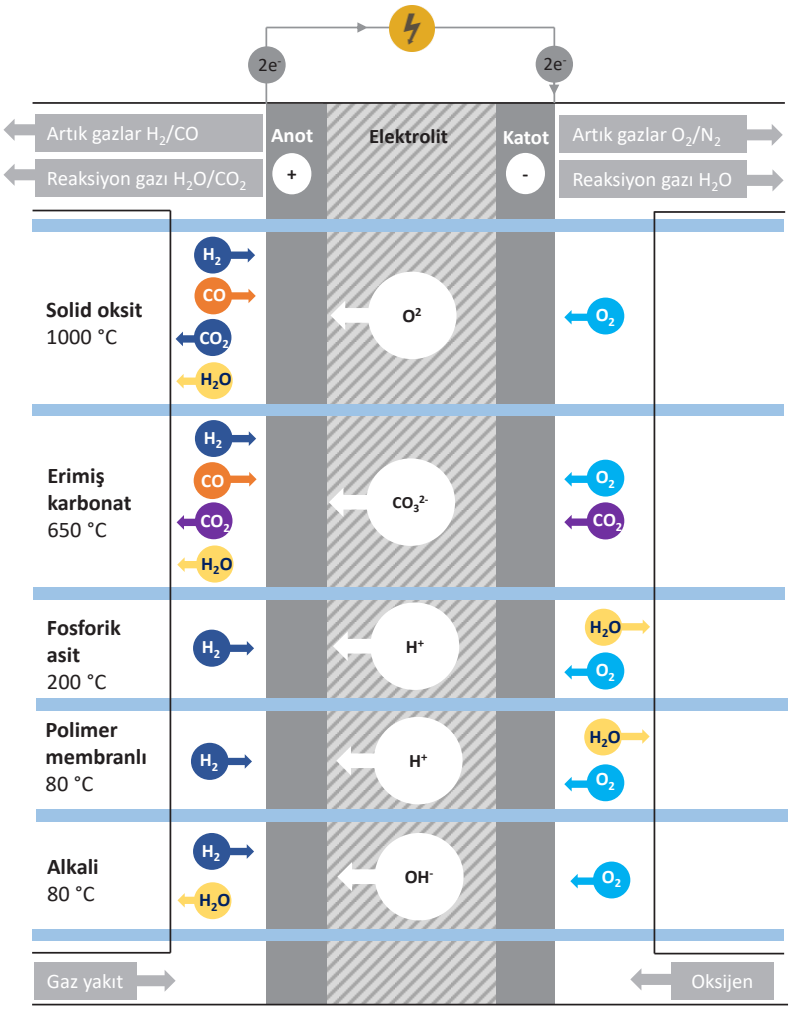
Alkali yakıt hücrelerinde elektrolit olarak KOH çözeltisi kullanılır. Kullanılan KOH elektrolitinin konsantrasyonu yüksek ise (kütlesel %85) yakıt hücresi daha yüksek sıcaklıklarda (250 °C) çalışıyor-

ken daha düşük konsantrasyonlarda (kütlesel %35-50) yakıt hücresi daha düşük sıcaklıklarda (<120 °C) çalışmaktadır. Yakıt olarak saf hidrojen ve oksitleyici olarak saf oksijen kullanılmaktadır. Anot ve katot yarı reaksiyonları aşağıdaki gibidir ve reaksiyon sonucunda ısı ve elektrik elde edilir.

$$H_2 + OH^- \rightarrow H_2O + e^- \text{ (Anot)}$$

$$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- \text{ (Katot)}$$

Alkali yakıt hücrelerinde çoğunlukla elektrot olarak değerli olmayan metallerin (Ni, Ag, metal oksitler vb.) ve elektrolit olarak alkali çözeltilerin kullanılması maliyeti oldukça düşürmektedir. Fakat bu yakıt hücrelerinin en büyük dezavantajı saf hidrojen ve oksijene gereksinim duyulmasıdır. Çünkü ortamda az miktarda karbondioksitin bulunması ile bu yakıt hücreleri zehirlenmektedir. Dolayısıyla alkali yakıt hücreleri saf yakıtların sağlanabileceği daha özel uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadırlar.



Şekil 26. Yakıt hücresi türlerinin çalışma prensibi ([15]'ten uyarlanmıştır)

Fosforik asit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak konsantre (%100) fosforik asit kullanılır. Proton iletken bir elektrolite, konsantre fosforik asit, sahip olduğundan çalışma prensipleri PEM yakıt hücrelerine benzemektedir. Anot ve katot elektrot olarak karbon destekli Pt veya Pt alaşımları kullanılmaktadır. Yakıt hücresi çalışma sıcaklığı 150-220 °C arasında değişmektedir. Fosforik asit yakıt hücreleri, sabit uygulamalar için en uygun yakıt hücreleridir. Günümüzde Japonya, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde hastanelerde, otellerde ve binalarda kullanılmaktadır.

Ergimiş karbonat yakıt hücrelerinde elektrolit olarak alkali (Li, Na, K) karbonatların birleşimi kullanılmaktadır. Bu yakıt hücrelerindeki çalışma sıcaklığı karbonatların oldukça iletken ergimiş tuz

haline geldiği 600-700 °C civarındadır ve iletkenlik karbonat iyonları ile sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklık ergimiş karbonat yakıt hücrelerinde anot olarak Ni ve katot olarak nikel oksit elektrotları kullanılmaktadır. Anot ve katot yarı reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

$H_2 + CO_3^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ (Anot)

$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{-2}$ (Katot)

Karbonat iyonları katottan anoda hareket ederler ve su oluşumu anotta gerçekleşir. Ergimiş karbonat yakıt hücreleri çok yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından elektrot olarak değerli olmayan metaller kullanılabilir ki bu da maliyeti oldukça düşürmektedir. Diğerleriyle kıyaslandığında ergimiş karbonat yakıt hücrelerinin önemli bir avantajı harici bir yakıt dönüştürücüye ihtiyaç duymamasıdır. Doğal gaz ve kömür bazlı yakıtlar direkt olarak yakıt hücresine beslenir ve yakıt hücresi aynı zamanda dönüştürücü görevini görür. Çalışma sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı bu yakıt hücrelerinin sistem tasarımı oldukça karmaşıktır. Ayrıca çalışma sıcaklıklarına ulaşılması uzun zaman almaktadır. Fakat bu dezavantajlarının yanında sisteme reformat ve kömürden elde edilen karbondioksit ve karbonmonoksit içeren yakıtların beslenebilmeleri gibi avantajlara sahiptirler.

Katı ve gözenekli olmayan metal oksit seramik elektrolitli katı oksit yakıt hücreleri 600-1000 °C aralığında çalışmaktadır. Ergimiş yakıt hücreleri gibi yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından saf olmayan yakıt ve değerli olmayan metal elektrot kullanımına imkân sağlamaktadırlar. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında anot ve katot yarı reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

$2H_2 + 2O^{-2} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$ (Anot)

$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{-2}$ (Katot)

Katı oksit yakıt hücrelerinde de ergimiş karbonat yakıt hücrelerine benzer olarak negatif yüklü iyon (O^{-2}) katottan anoda transfer edilir ve su oluşumu anotta gerçekleşir. İstenilen sıcaklığa ulaşmak için gerekli sürenin uzun ve sıcaklığın yüksek olması nedeniyle bu yakıt hücreleri taşımacılık ve küçük taşınabilir uygulamalarda tercih edilmemektedirler.

Günümüzde araştırmaların çoğu, polimer elektrolit membranlı (PEM) yakıt hücresi (özellikle otomotiv uygulamaları için) ve katı oksit yakıt hücresi (KOYH) (özellikle sabit uygulamalar için) geliştirilmesine odaklanmıştır. En yeni yakıt hücresi modellerindeki yakıt hücresi yığınları, 100 kW veya daha fazla güce sahiptir. Bataryalı elektrikli otomobillerle karşılaştırıldığında, daha düşük araç ağırlığı ve üç ile beş dakikalık çok daha kısa yakıt ikmal süreleri ile bugün yaklaşık 400 ile 500 kilometre arasında daha geniş bir menzile sahiptirler. Genellikle, araçta 700 bar basınçlı tanklarda depolanan 4 ile 7 kg arasında hidrojen taşımaktadırlar. Binek otomobiller için, sürüş enerjisi kaynağı olarak artık neredeyse tamamen hidrojenle çalışan yakıt hücrelerine odaklanılmaktadır.

6.3. Ülkemizde Proton Değişim Membranlı PEM yakıt hücrelerinin geliştirilmesi

Yakıt hücreleri, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji uygulamalarının olmasından dolayı dünyadaki artan enerji ihtiyacını karşılayacak en önemli cihazlardan biridir. Proton değişim membran (PEM) yakıt hücreleri düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim elde edilmesi, sessiz çalışması ve herhangi bir atık ortaya çıkarmamasından dolayı en çok ilgi çeken yakıt hücresi türüdür. PEM yakıt hücrelerinin en önemli elemanı proton iletim özelliğine sahip polimerik membranlardır [80].

Nafion (perflorosülfonik asit membran) PEM yakıt hücrelerinde yüksek kimyasal ve ısıl kararlılık, iyi mekanik özellikler ve yüksek proton iletkenliği sağlamasından dolayı en çok kullanılan membrandır. Ancak 80 °C'nin üzerindeki uygulamalarda performans kayıplarının olması kullanımını sınırlandırmaktadır. Nafion membranda proton iletkenliği perflorosülfonik yapısında sülfonik asit gruplarının nemlenmesi sonucunda gerçekleşmektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkıldığında

membran yapısındaki suyun kaybedilmesi nedeniyle membranın proton iletkenliği düşmekte bunun yanında mekanik ve ısıl kararlılık zayıflamaktadır. PEM yakıt hücrelerinin günlük kullanıma girmesi ve ticarileşebilmesi için öncelikle bu sınırlamaların giderilmesi gerekir.

Son yıllarda yakıt hücresi membranları ile yapılan çalışmalara bakıldığında PEM yakıt hücresi için endüstri standardı kabul edilen Nafion'un özelliklerinin geliştirilmesi ve inorganik-organik kompozit polimer malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların önem kazandığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki PEM yakıt hücresi uygulamalarında, membrandaki nemlenmeye bağlı performans kayıpları, SiO_2, TiO_2, ZrO_2 vb. inorganik malzemeler ile hazırlanan kompozit membranlarla önlenebilmektedir. Kompozit membranlar polimer membran yapısı içerisinde inorganik partiküllerin dağılmasından oluşmaktadır. Polimer yapısına katılan inorganik partiküllerin miktarı, dağılımı ve boyutu membran özelliklerini etkilemektedir.

PEM yakıt hücresi elektrotlarında en verimli olarak hem oksidasyon hem de redüksiyon reaksiyonları için elektronik iletkenliği olan karbon destekler üzerinde platin nanoparçacıkları kullanılmaktadır. Katalizörün aktivitesi metalin partikül boyutu ve partikül boyut dağılımının iyi olması, katalizör hazırlama yöntemi, katalizör destek malzemesinin yapısı, metal sağlayıcının özellikleri ve karbon destek malzemesi üzerindeki aktif metalin ulaşılabilirliği gibi birçok parametreye bağlıdır. Günümüzde denenmekte ve geliştirilmekte olan birbirinden farklı birçok karbon desteği bulunmaktadır. Bunların sahip olduğu değişik elektronik iletkenlik, morfolojik ve hidrofobik özellikleri performanslar üzerinde oldukça etkilidir. En yaygın olarak kullanılan karbon desteği Vulcan XC-72 karbon siyahıdır. Bu desteğin düzensiz gözenek yapısında olması ayrıca gözenek boyutlarının oldukça geniş bir aralıkta değişmesi pil performansını olumsuz yönde etkileyebilir [81]. Platin ihtiva etmeyen katalizörler geliştirilmekte ancak PEM yakıt hücresi performansı Pt katalizörle rekabet edememektedir [82].

PEM yakıt hücrelerinin günlük hayattaki kullanımının sağlanabilmesi için düşük maliyetli, pratik ve 80 °C üstündeki sıcaklıklarda uzun süre performans gösterebilen kompozit membranlar ve yeni elektrokatalizörler geliştirilmektedir. Yakıt hücresi bileşenlerinin geliştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, geliştirilen malzemelerin sadece fiziksel ve kimyasal karakterizasyonları veya kısa süreli performansları ile ilgili çalışmalar yeterli olmamaktadır. Geliştirilen malzemenin yakıt hücresinde ulaşacağı maksimum çalışma ömrü de kullanımı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Geliştirilen malzemeler gerekli fiziksel ve kimyasal kararlılığı sağlasa bile yakıt hücresi çalışma koşullarında düşük performans veya çok kısa çalışma ömrü gösterebilmektedir. Bütün bunlar göz önüne alınarak kompozit membranların ve yeni destek yapılarının ticarileşme sürecinin en önemli parametrelerinden biri olan dayanıklılık ve kararlılıkları uzun dönem testleri ile belirlenmektedir [83].

Polimer elektrolit membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin en önemli kısmı yarı reaksiyonların ve proton iletiminin meydana geldiği membran elektrot bileşimi (MEA) yapılarıdır. Yarı reaksiyonların meydana geldiği elektrotlar çoğunlukla karbon destekli platin (Pt) katalizörlerdir. Kullanılan bu katalizörlerin aktivitelerinin iyi olması yüksek yakıt hücresi performansı açısından çok önemlidir. Pt'nin destek malzemesi ile kullanılması katalizörün yüzey alanını artırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan karbon destekleri karbon siyahı ve aktif karbondur. Son zamanlarda yürütülen araştırmalarda yeni geliştirilen karbon desteklerinden bazıları; karbon nano borular, nano sarmallar, içi boşluklu karbon nano parçacıklar, dizili gözenekli karbonlar, dizili karbon çubuklar ve karbon nano tüplerdir. Kullanılan bu desteklerin hepsinde aranan özellikler yüksek yüzey alanı, iyi iletkenlik ve iyi bir nanoparçacık dağılımı sağlayabilecek gözenek yapısıdır.

PEM yakıt hücrelerinde kullanılmak üzere; yüksek yüzey alanına sahip olan, metal parçacıkların yüklenmesine ve sonuç olarak parçacıkların düzgün dağılımına olanak sağlayan destek malzemesi sentezi çok önemlidir. İçi boşluklu mezo gözenekli kabuk yapılı karbon yapısındaki boşluklar sayesinde gaz akışının rahatça sağlanması ve bir diğeri de yüksek yüzey alanı sayesinde istenilen kimyasal aktivasyonun gerçekleştirilebilmektedir.

Ülkemizde PEM yakıt hücresi için TiO-SiO_2-Nafion ile nanokompozit membran üretilmiştir [83]. Böylece Nafion membran çalışma sıcaklığının üzerinde 110 °C çalışma sıcaklığına kadar çıkılmaktadır. İçi boşluklu mezo gözenekli kabuk yapılı karbon destek malzemesi sentezlenmiştir ve bu malzemenin gözenek çapını değiştirebilen bir yöntem geliştirilmiştir. Karbon destek üzerine mikrodalga yöntemiyle platin tutturularak özgün elektrokatalizörler üretilmiştir. Katalizör hazırlama koşulları değiştirilerek karbon destek üzerindeki Pt yükü %44'e kadar yükseltilmiştir. Platin yükünün artırılmasının ve mezoyapıya hidrofobik madde katkısı yakıt hücresi performansını önemli ölçüde arttırmıştır [84]. Ülkemizde geliştirilen Ultrasonik kaplama tekniğiyle PEM yakıt hücrelerinin en önemli parçası olan membran elektrot birleşimi (MEA) hazırlanarak yığın yapımına uygun elektrotlar oluşturulmaktadır. Ultrasonik kaplama tekniğinin en önemli avantajı, kısa sürede, tekrarlanabilir özelliklere sahip, ticari boyutlarda elektrot ve membran elektrot birleşimi (MEA) üretimidir [85, 86]. Bu teknikle katalizör kaybı ihmal edilebilecek düzeyde azaltılarak PEM yakıt hücresi katalizör maliyeti yarıya inmekte, katalizörün yüzeye homojen ve çok ince dağılması nedeniyle PEM yakıt hücresi gücü önemli ölçüde artmaktadır.

PEM yakıt hücrelerinin karbonmonoksit toleransını artırmaya yönelik olarak yüksek sıcaklıkta (120-180 °C) çalışan yakıt hücreleri için membran, MEA ve yığın (stak) geliştirilmiştir [87, 88]. Hidrojenin doğalgaz reformasyonu metoduyla eldesinde karbonmonoksitin temizlenmesi işlemi oldukça pahalıdır. Geliştirilen yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinde hidrojenin içindeki karbonmonoksit %1-5'e, karbondioksit %20-30'a kadar artabilmektedir.

Tekli bir PEM yakıt hücresi anot, katot, zar, gaz difüzyon tabakaları, akım toplayıcı, gaz dağıtım plakaları, conta ve tutucu son plakalardan oluşmaktadır. Bazı durumlarda akım toplayıcı ve tutucu plakalar aynı olabilmektedir. Yakıt hücresinde iyi performans elde edebilmek için yakıt hücresini oluşturan her bir bileşenin hem malzeme hem de tasarım açısından optimize edilmesi gerekmektedir.

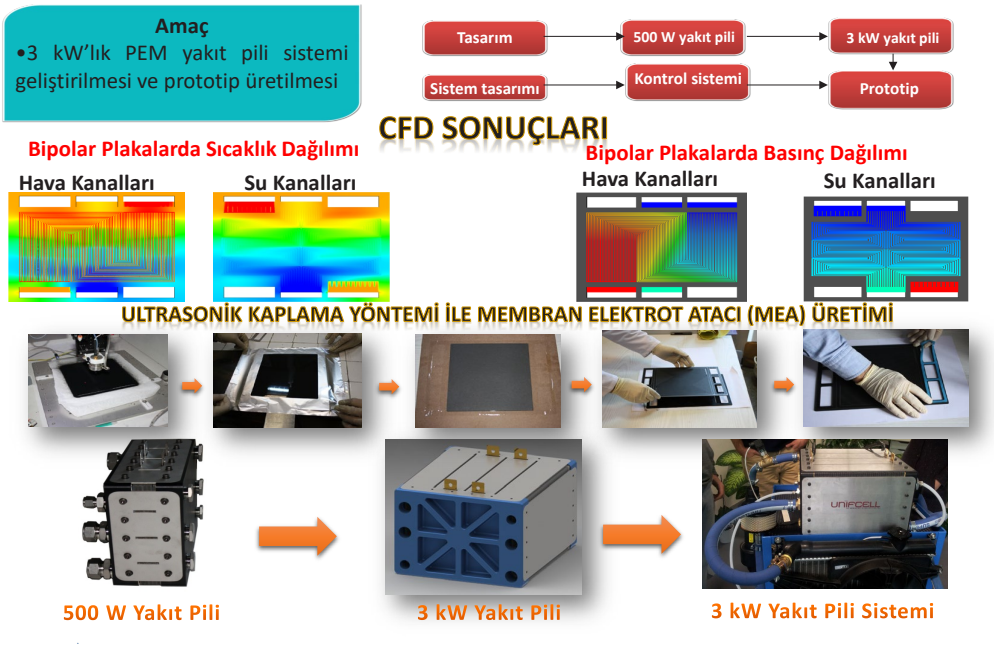
Tekli yakıt hücresinden 0,7 V ve 1-300 W gibi elektrot alanıyla sınırlı güç elde edilmektedir. Dolayısıyla düşük voltaj ve güç uygulamalarında kullanılabilir. Ancak daha yüksek güç ve voltaj gerektiğinde zar–elektrot gruplarının çift akış kanallı plakalarla seri bağlanması gerekmektedir. PEM yakıt hücrelerinden oluşturulan modüllerle istenilen yüksek güç elde edilebilir. Taşınabilir sistemlerde bu güç 50-300 W, hareketli sistemlerde ise bu 80-200 kW'a kadar çıkabilir. Yüksek güçlere çıkıldığında üretilen ısının artması sebebiyle, tekli yakıt hücrelerinin aksine, modüler yakıt hücrelerinin soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi düşük güçlerde hava ile yapılırken daha yüksek güçlerde su ile yüksek sıcaklık PEM yakıt hücrelerinde ise termoyağlar ile yapılmaktadır. Dolayısıyla yüksek güçlerdeki yakıt hücresi yığınlarından elde edilen ısıdan aynı zamanda ısıtma sistemlerinde de yararlanılabilir.

Ülkemizde 100 W [89, 90], 500 W [88], 1500 W [91, 92] ve 3000 W [58] net güçte prototip PEM yakıt hücresi yığını (stak) yapılmıştır. Prototip 3 kW'lık PEM Yakıt Pili Geliştirme Projesinin Safhaları Şekil 27'de gösterilmektedir. Sistem tasarımı, start-up, shutdown ve kontrol stratejileri oluşturulmuştur [93, 94]. UNIDO-ICHET tarafından 2010-2012 yıllarında desteklenen bu projede Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Atatürk Üniversitesi ve Yeditepe Üniversitesinden akademisyen ve araştırmacılar görev almıştır. ODTÜ Teknokent şirketleri TEKSİS, MİNOVA ve PUNTO bu projenin ortaklarıdır. Ülkemizde yapılan PEM yakıt hücresi prototip projeleriyle önemli bir bilgi birikimi sağlanmıştır.

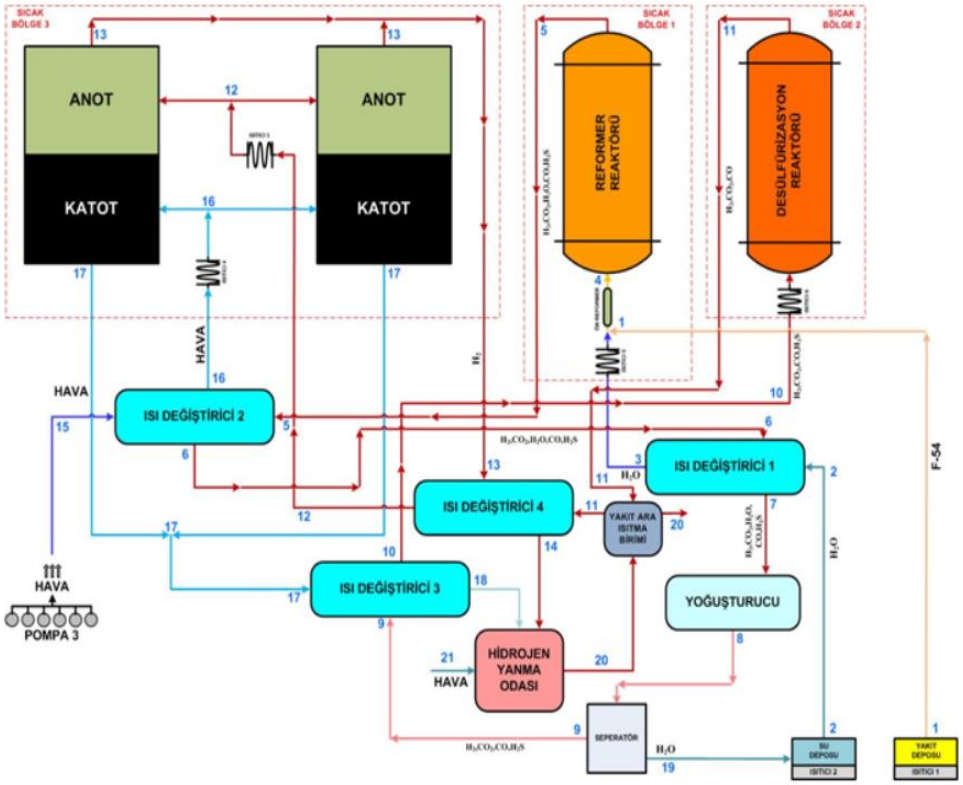
6.4. Ülkemizde katı oksit yakıt hücrelerinin geliştirilmesi

Katı oksit yakıt hücresi (KOYH) yüksek sıcaklıkta (600-1000 °C) çalışmaktadır. Doğal gaz, dizel gibi yakıtlarla veya reformerden elde edilen hidrojenin yüksek sıcaklıkta karbonmonoksit ve karbondioksitle birlikte beslenmesiyle çalışır. Vestel Savunma Sanayi ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmekte olan 5 kW katı oksit yakıt hücresi sistemi akış diyagramı Şekil 28'de ve şebekeden bağımsız çalışan sistemin resmi Şekil 29'da gösterilmektedir. Katı oksit yakıt hücrelerinin önemli bir uygulaması,

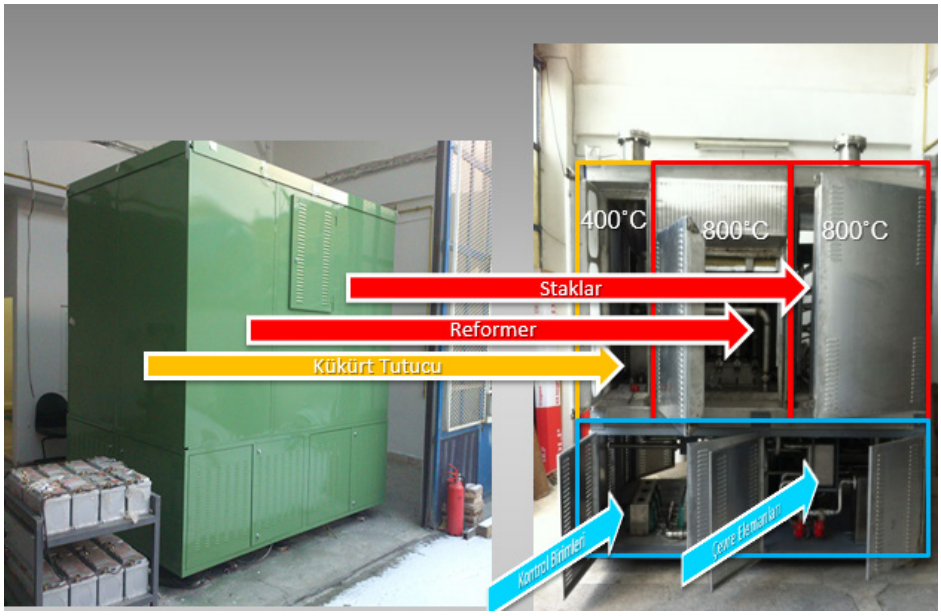
doğalgaz ile çalışan, evlerde hem ısı hem de güç ihtiyacını karşılayacak katı oksit yakıt hücresi kojenerasyon sistemidir. Bu tarz çözümlerin denemeleri birçok ülkede yapılmaktadır. Ayrıca benzer yaklaşım ile Microsoft KOYH sistemi ile veri merkezlerinin gücünü sağlama amaçlı proje 2017 yılının inovatif çözümler ödülü almıştır. Membran, stak, katalizör, reformer, kükürt giderici reaktör ve katalizör, elektronik kontrol ünitesi gibi alt bileşenler Türkiye'de geliştirilmiştir. Yakıt olarak dizel kullanan 5 kW'lık KOYH temelli prototip geliştirilmiş ve bir dizi askeri testlerden geçmiştir [95].



Şekil 27. Prototip 3 kW'lık PEM yakıt pili geliştirme projesinin safhaları [58]



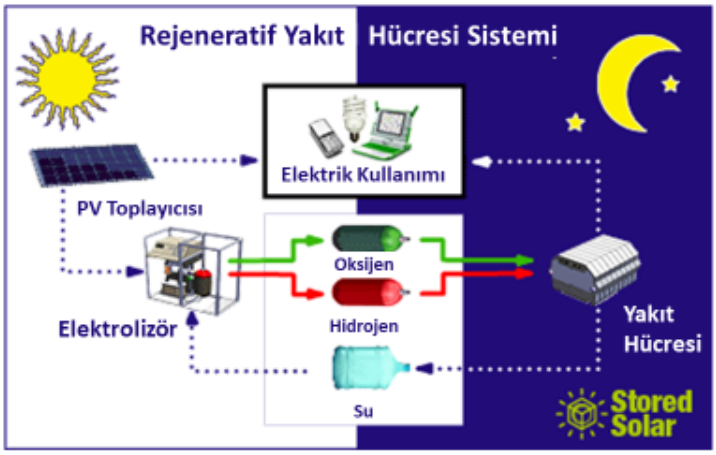
Şekil 28. 5 kW katı oksit yakıt pili sistemi akış diyagramı [95]



Şekil 29. Şebekeden bağımsız çalışabilen 5 kW KOYP sisteminin resmi

6.5. Rejenaratif yakıt hücresi sistemi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir kullanımı gündüz güneş enerjisiyle PV güneş panellerinde elde edilen elektrik enerjisiyle suyu elektrolizörde hidrojen ve oksijene ayıran ve depolayan bir sistem kurmaktır. Gece ise depolanan hidrojen ve oksijeni yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürerek, bu elektriğin kullanılmasını sağlayan sistemdir. Bu tür tasarımlara rejenaratif yakıt hücresi denilmektedir. Şekil 30'da Stored Solar firmasının önerdiği sistemlerden biri gösterilmektedir.



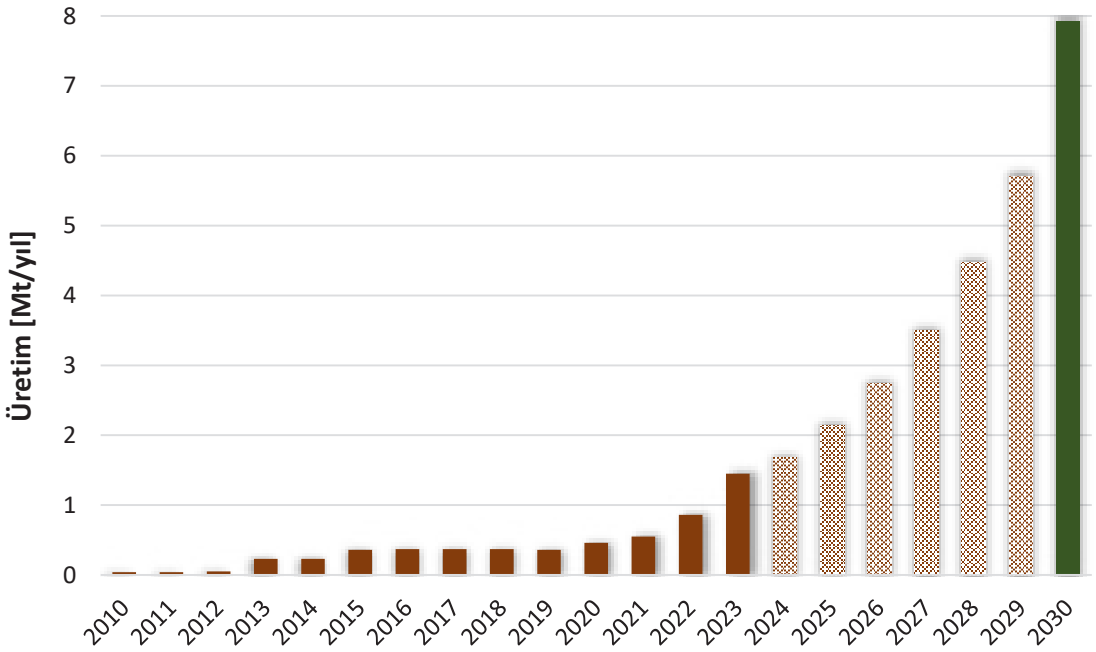
Şekil 30. Rejeneratif yakıt hücresi sistemi (https://www.storedsolar.com/electrolysers.html)

Alkali elektrolizör ve alkali yakıt hücresi rejenaratif yakıt hücresi teknolojisinin uygulanmasında özellikle uzay araçlarında ve uzay uygulamalarında en çok tercih edilendir. Gerek elektrolizörün ve gerekse yakıt hücresinin PEM olması durumunda elektrolizör ve yakıt hücresi işlevini görebilecek rejenaratif yakıt hücreleri geliştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır.

BÖLÜM 7

Hidrojen Üretimi ve Kullanımı İstatistikleri

Hidrojen teknolojileri 2019'da güçlü bir ivme kazanmış ve dünya çapında karar vericiler arasında büyük ilgi uyandırmıştır. Ayrıca, elektroliz kapasitesinin artırılması için rekor bir yıl olmuştur ve önümüzdeki yıllar için çok sayıda önemli duyuru yapılmıştır. Yakıt hücreli elektrikli araç pazarı, Çin, Japonya ve Kore'deki olağanüstü genişleme sayesinde neredeyse iki katına çıkmıştır. Bununla birlikte, düşük karbonlu üretim kapasitesi nispeten sabit kalmıştır. Dünyada hali hazırdaki hidrojen üretim kapasitesi, gelecekte planlanan ve 2030 yılında hedeflenen hidrojen üretim miktarları Şekil 31'de verilmiştir. Grafik detaylı incelendiğinde, 2010 yılından süregelen artış göze çarpmaktadır. Artış bir basamak gibi kademeli olarak gerçekleşmiştir ve 2021 yılından sonra üstel şekilde artacağı öngörülmektedir. Sürdürülebilir gelişim senaryosuna göre 2030 yılında düşük karbonlu hidrojen üretim kapasitesinin yıllık 7,92 Mt olması hedeflenmektedir [96].



Şekil 31. Düşük karbonlu hidrojen üretim miktarları ve gelecek provizyonu (Kaynak [96]'dan uyarlanmıştır)

Saf hidrojene olan talep, çoğunlukla petrol arıtma ve kimyasal üretim için olmak üzere yılda 70 Mt civarındadır. Verilere göre hidrojen şu anda doğal gaz ve kömürden üretilmektedir ve ilgili CO_2 emisyonları önemlidir. Temiz ve çevreci hidrojenin endüstriyel sektöre entegrasyonu, üç ana madde ile gerçekleştirilebilir. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Mevcut endüstriyel uygulamalarda, geleneksel hidrojen üretim teknikleri yerine düşük karbonlu hidrojen üretim tekniklerinin kullanılması,
- Yeni sektörlerdeki talebin (örneğin, bazı ulaşım ve endüstriyel uygulamalar, gaz şebekesi enjeksiyonu ve elektrik depolaması) yeşil ve çevreci hidrojen üretim teknikleri ile karşılanması,
- Elektrolizörler, yakıt hücreleri ve karbon yakalama, kullanma veya depolama gibi teknolojilerin ölçek büyütme, maliyet azaltma ve iyileştirilme çalışmaları ile sağlanacak faydaların entegrasyonu.

Düşük karbonlu hidrojen üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, hidrojenin temiz enerjiden üretilmesi yolunda yardımcı olması açısından kritik bir öneme sahiptir. Hidrojenin büyük bir çoğunluğu hâlihazırda emisyonu yoğun olan doğal gaz reformu ve kömür gazlaştırma yoluyla üretilmektedir. İki temel düşük karbonlu üretim yolu şu yöntemleri içermektedir: geleneksel teknolojilerin karbon yakalama teknolojileri ile birleştirilmesi ve su elektrolizi yoluyla hidrojen üretilmesi. Geleneksel teknolojileri karbon yakalama teknolojileri ile birleştirmenin hâlâ düşük karbonlu hidrojen üretimi için temel yol olduğu düşünülmektedir ve muhtemelen kısa ve orta vadede böyle kalacağı ön görülmektedir. Bunun en temel sebebi üretim maliyetlerinin elektroliz gibi diğer düşük karbonlu teknolojilerden daha düşük olmasıdır. Geleneksel teknolojileri karbon yakalama teknolojileri ile birleştiren projelere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Yıllık toplam 350.000 ton düşük karbonlu hidrojen üretimi içeren altı proje 2019'un sonunda faaliyete geçmiştir ve 20'den fazla yeni projenin 2020'lerde, çoğunlukla Kuzey Denizini çevreleyen ülkelerde devreye alınacağı duyurulmuştur [63].

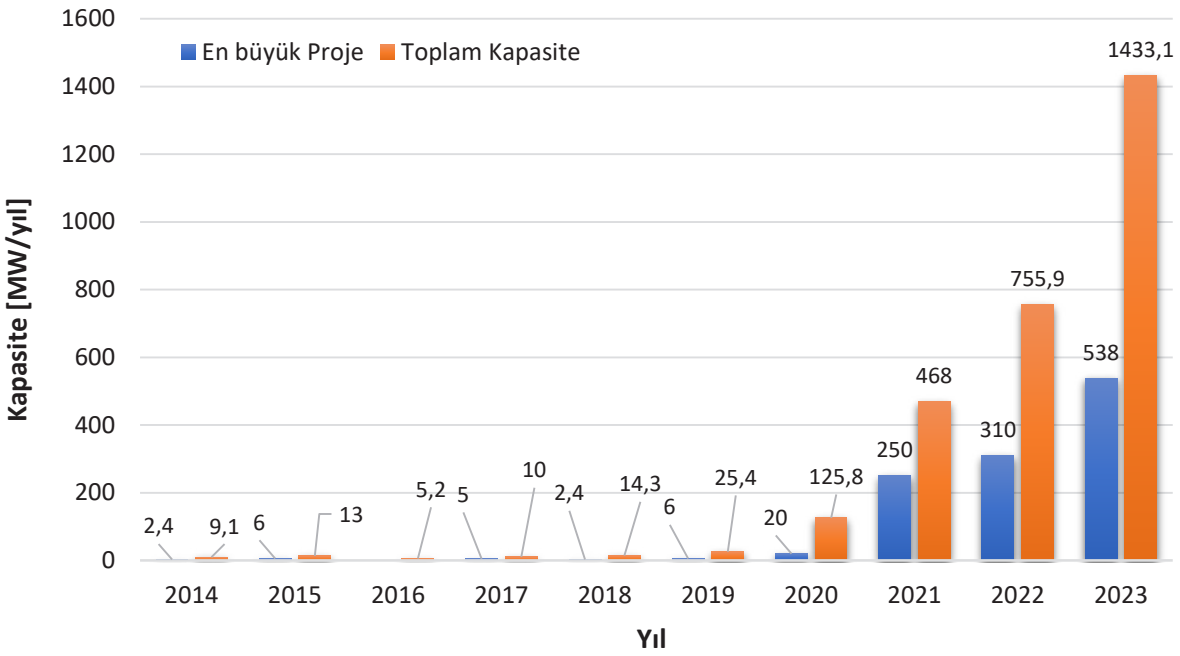
Elektrolizörler, düşük karbonlu elektrik ve sudan temiz hidrojen üretimini sağlamaktadırlar. Elektrolizörler çeşitli endüstriyel sektörlerde iyi bilinen ve uzun süredir kullanılan bir teknoloji olarak belirtilebilir. Ayrıca, taşıtlarda yakıt olarak kullanılan hidrojenin eldesi, gaz hatlarına enjekte edilen hidrojenin üretimi, endüstriyel prosesler için daha temiz bir girdi olarak hidrojenin kullanılması, elektrik depolama teknolojisi olarak hidrojenin kullanılması ve sentetik yakıt üretimi için hidrojenin tercih edilmesi elektrolizörlerin endüstriyel pazarda kullanımını artırmaktadır. Son yıllarda, kurulu elektrolizör kapasitesi, 2010'da 1 MW'ın altında iken 2019'da 25 MW'ın üzerine çıkarak büyük ölçüde artmıştır. Ayrıca, proje boyutu da önemli ölçüde artış göstermiştir. 2010'ların başındaki çoğu proje 0,5 MW'ın altında elektrolizör kapasitesine sahipken, 2017-2019 döneminde en büyüğü 6 MW mertebelerine ulaşmıştır. Mart 2020'de, Japonya'da 10 MW'lık bir proje faaliyete geçmiş ve Kanada'da 20 MW'lık bir proje yapım aşamasındadır. Ayrıca, 2020'lerin başında çalışmaya başlayan yüzlerce MW projeler mevcuttur [97].

Alkalin tipindeki elektrolizörler en gelişmiş elektroliz teknolojisi olduğundan, özellikle büyük ölçekli projeler için (hem hâlihazırda faaliyette olan hem de planlanmış) pazarda en yaygın elektrolizör çeşididir. Buna karşın birçok yeni projede polimer elektrolit membran (PEM) tipindeki elektrolizörler tercih edilmektedir. PEM elektrolizörleri, alkali elektrolizörlere göre daha az gelişmiştir, ancak daha esnek çalışma şekillerine sahiptirler. Bu nedenle, değişken yenilenebilir elektrik üretimiyle daha uyumludurlar. Şekil 32'de küresel olarak toplam ve aynı yıl içerisinde en yüksek elektrolizör kapasiteleri verilmektedir. Toplam kapasiteler incelendiğinde artışın 2020 yılına kadar doğrusal olarak arttığı ve 2020 yılından sonra beklentinin üstel olarak gerçekleşeceği yönündedir. Yine benzer şekilde en yüksek kapasiteye sahip elektrolizörlerin aynı artış rotasını izleyeceği ön görülmektedir [97].

Taşımacılıkta hidrojen kullanımı her zamankinden daha hızlı artmakta, fakat yine de düşük karbonlu araç satışlarının yalnızca %0,5'ini oluşturmaktadır. Çoğu elektroliz içeren proje, taşımacılık sektöründe hidrojenin kullanımını hedeflerken, yakın zamanda duyurulan projelerin daha büyük bir kısmı, gaz şebekesine hidrojen enjekte etmeyi veya arıtma ve amonyak üretimi gibi mevcut hidrojen uygulamalarında emisyonları azaltmayı içermektedir. Bazı teknoloji geliştiricileri, çelik üretiminde elektroliz uygulamalarını pilot olarak test etmektedirler. Hidrojen uzun zamandır düşük karbonlu taşıt yakıtı olarak bilinmesine karşın, taşıtlarda kullanımı henüz gerekli dolum istasyonları ve altyapısı hazır olmadığı için oldukça zordu. Bununla birlikte, yakıt hücreli elektrikli araç (FCEV) pazarı, Asya'daki gelişmelerin etkisiyle hızla gelişmektedir. Küresel yakıt hücreli elektrikli araç stoku 2019 sonunda neredeyse ikiye katlanarak 25.210 adede yükseldi ve 12.350 yeni araç satılmıştır.

Şekil 33'te görüldüğü üzere dünya genelinde hidrojen ile çalışan yakıt hücresine sahip elektrikli araç sayısı günümüzde oldukça azdır. Fakat şekildeki gelecek projeksiyonundan da görüleceği gibi bu sayılarda büyük oranda artış beklenmektedir. Fakat özellikle Japonya, Kore ve Hollanda yakın gelecekte yakıt hücresiyle çalışan elektrikli araç sayısını artırmayı hedeflemektedirler [98]. ABD'de FCEV satışları 2019'da hafif bir düşüş yaşarken, ABD FCEV hissesinde dünya lideri konumunu

sürdürmektedir. Günümüzde dünyadaki her üç FCEV araçtan biri ABD yollarında görülmektedir. ABD'yi Çin, Japonya ve Kore izlemektedir. Çin ve Kore'deki durum, 2017'de birkaç araç satılırken 2019'da sırasıyla yaklaşık 4.400 ve 4.100'e yükselen yeni satışlarla dinamik bir seyir sürdürmektedir. Çin örneğinde, bu etkileyici ilerleme, yakıt hücreli otobüslerin (4300 adet stok) ve hafif ticari kamyonların (1.800'den fazla stok) benimsenmesini destekleyen politikalarla teşvik edilmiştir ve bu durum Çin'i küresel yakıt stokunda lider yapmaktadır. Çinin hali hazırda stok kapasitesi otobüslerde %97 ve kamyonlarda %98 olarak söylenebilir. Tüm bunlara ek olarak, bazı büyük kamyon üreticileri, Avrupa ve Japonya'da modeller geliştirme ve ayrıca üniteleri dağıtmaya başlama planlarını duyurmuşlardır.

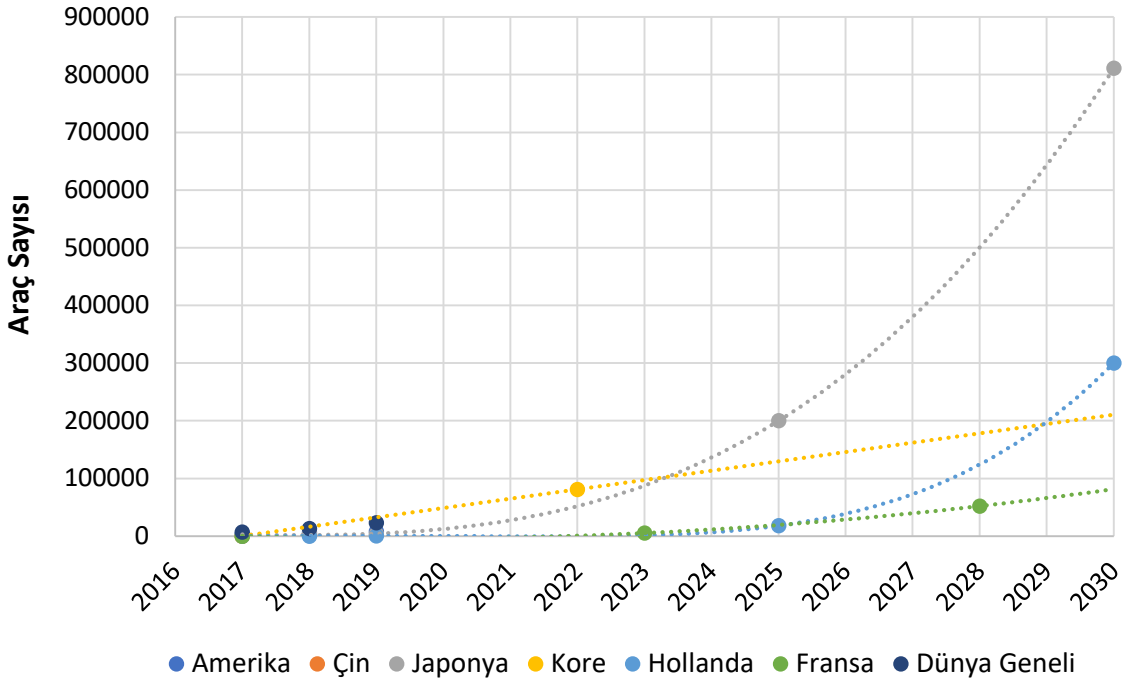


Şekil 32. Küresel elektrolizör kapasiteleri (Kaynak [97]'den uyarlanmıştır)

Yakıt hücresiyle çalışan araçlara temin edilecek hidrojenin, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarından sağlanması gerekmektedir. 2019'un sonunda, dünya çapında 470 hidrojen yakıt ikmal istasyonu mevcut olmakla beraber bu değer 2018'e göre %20 artış göstermiştir. Japonya 113 istasyonla liderliğini korurken, onu 81 istasyonla Almanya ve 64 istasyonla ABD izlemektedir. Operasyondaki istasyon sayısını Kore (20 adet), Japonya (13 adet) ve Almanya (12 adet) önemli ölçüde artırırken, Amerika Birleşik Devletleri 2019'da yalnızca bir dolum istasyonu açılışı gerçekleştirmiştir. FCEV'lere benzer şekilde, Çin yakıt ikmal istasyonlarının sayısı 2019'da yaklaşık üç kat artırarak 20'den 61'e çıkarmıştır. Kara taşıtlarının yanında hidrojenin diğer tür taşıtlarda da kullanımı artış göstermektedir. 2018'in sonunda, Alstom tarafından üretilmiş iki yakıt hücresi tarafından beslenen hidrojenli tren Almanya'da faaliyete geçmiştir ve başarılı denemeler sonucunda 2021'de 14 tane daha hidrojen ile çalışan trenin faaliyete geçeceği duyurulmuştur. Bunun yanında Birleşik Krallık ve Hollanda da Alstom hidrojen trenlerini faaliyete geçirmeye başlamıştır. Ayrıca Çin Foshan'da yakıt hücresiyle çalışan tramvay faaliyete geçti ve Çin, hidrojen yakıtlı tramvaylara ve trenlere olan ilgisini artıracağını duyurdu.

Ulaşıma ek olarak, evsel ve endüstriyel ısıtma, doğal gazın kullanıldığı ocak, şofben gibi kullanım alanları, karbondan arındırılma amacıyla düşük karbonlu hidrojen talebini artırabilecek sektörlerdir. Mevcut altyapı (gaz dağıtım hatları) talep artışlarını sağlamak için kullanılabilir. Dünya genelinde özellikle Fransa, Almanya ve ABD'de de doğal gaz hattına hidrojen enjekte ederek emisyonları ve dışa bağımlılığı azaltma politikaları önemini artırmaktadır. Gaz dağıtım şebekesine hidrojenin enjekte edilmesi, evsel ve endüstriyel ısıtma ve ocak kullanımları için düşük karbonlu hidrojen talebini artıracak önemli bir seçenektir. Gaz şebekesine hacimsel olarak %20'ye kadar hidrojen enjekte etmek,

şebeke altyapısında veya yerel son kullanıcı cihazlarında hiçbir değişiklik gerektirmemektedir. Dünya çapında gaz şebekelerine hidrojen enjekte etme üzerinde birçok proje yapılmakta ve ileri düzey araştırmalar gerçekleştirilmektedir. Buna ek olarak ülkemizde de Bölüm 5'te ele alındığı gibi doğal gaz hatlarına hidrojen enjeksiyonu gerçekleştirilecek bir proje yapılmaktadır. Projenin sonucunda doğal gaz açısından dışa bağımlılığın azaltılması ve emisyonların azaltılması hedeflenmektedir. Bu projelerin en büyüğü (6 MW elektrik girdisine sahip) 2015'ten beri Almanya'da faaliyet göstermektedir ve yakın zamanda birkaç projenin daha başlatılması planlanmaktadır. Değişken yenilenebilir elektrik üretiminin artması, üretim fazlası elektriğin boşa gitmemesi için birçok ülke gaz şebekesine hidrojen enjeksiyonuyla ilgilenmektedir. Bu ilgi başlangıçta Avrupa ülkeleri ile sınırlı olsa da 2017'den beri diğer ülkeler (Avustralya, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri gibi) hidrojenin gaz hatlarına enjeksiyonu ile ilgili çalışmalar yürütmektedir. Hali hazırda yılda 2.900 ton hidrojeni doğal gaz hatlarına enjekte edebilen tesisler dünya çapında kullanım halindedir.



Şekil 33. Dünyadaki yakıt hücreli araç sayısı (2020'ye kadar olan veriler gerçek değerlerdir, 2020 sonrası değerler gelecek projeksiyonudur.) (Kaynak [98]'den uyarlanmıştır)

Tüm sektörler arasında sanayi, özellikle rafinaj, kimyasal ve çelik üretimi en yüksek hidrojen talebine sahiptir. Bu endüstriler yüksek karbonlu hidrojen kullandığından, bunun yerine düşük karbonlu hidrojenin kullanılması, kısa vadede sera gazı emisyonlarını azaltırken talebi artırmak için ideal bir fırsat olacaktır. Elektrolitik hidrojenle ilgili olarak, bazı pilot veya küçük ölçekli çalışmalarla sınırlı olsa da 2019'da önemli gelişmeler (100 MW'a kadar üretim) duyurulmuştur ve bunların yakın zamanda faaliyete geçmesi beklenmektedir. Bunlara ek olarak, şu anda Avrupa'da yürütülmekte olan ilk pilot projelerin üzerine inşa edilen elektrolitik hidrojen, çelik üretiminde ivme kazanmaktadır. Mevcut doğrudan indirgenmiş demir fırınlarında herhangi bir büyük değişiklik yapılmadan, doğal gazın %35'e kadarının hidrojen ile ikame edilebileceği düşünülmektedir. Bu konuda İsveç'te büyük bir pilot tesisi yapım aşamasında olmakla beraber 2025 yılında ilk denemelerin yapılması planlanmaktadır.

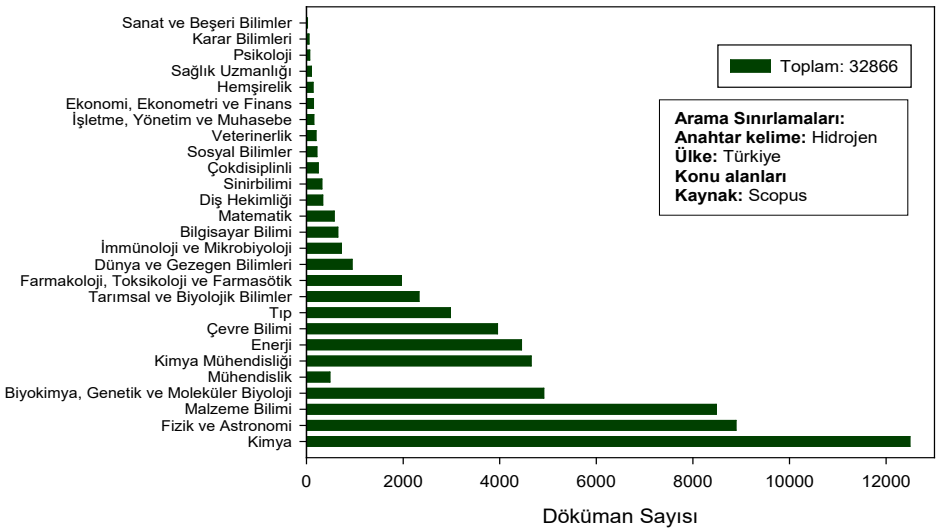
BÖLÜM 8

Hidrojen Araştırma, Yenilik ve Teknoloji Geliştirme Çalışmaları

Bu bölümde, Türkiye'de 1970-2021 yılları arasında hidrojen üzerine yapılan çalışmaların bir derlemesi sunulmaktadır. Aşağıda, araştırmanın altındaki her bir durum listelenen sınırlamalar ve anahtar kelimeler verilmiştir:

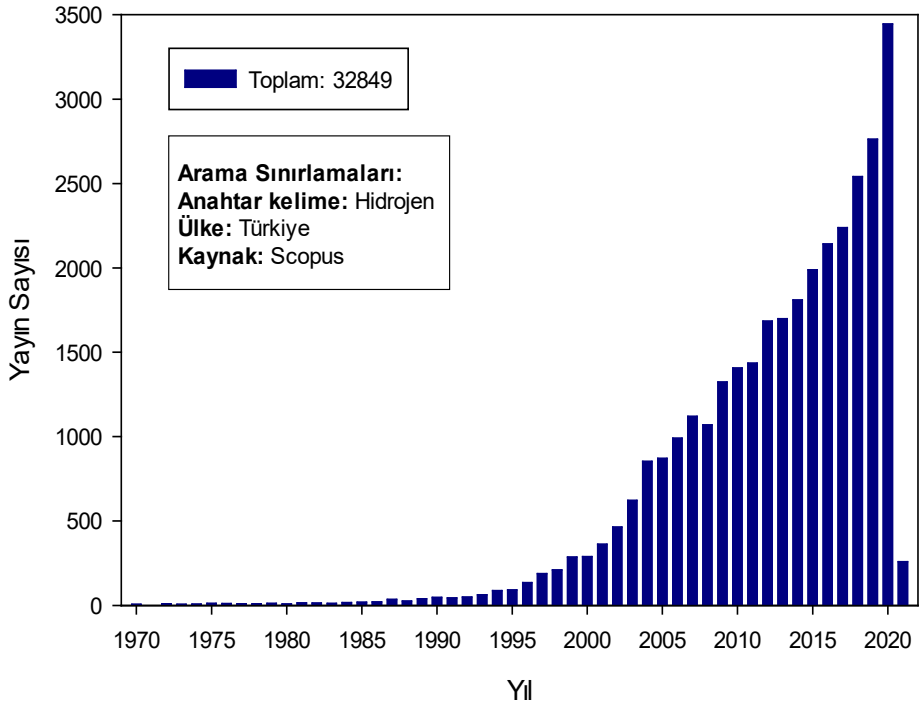
- Makaleler, konferans bildirileri ve derleme makaleler, Arama alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Scopus.
- Kitaplar, kitap bölümleri ve editörün yorumunu içeren başyazılar, Arama alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Scopus.
- Konu alanlarına göre makaleler, Arama alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Scopus.
- Patentler, Arama alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Türk Patent ve Marka Kurumu.
- Projeler, Arama alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).
- Tezler (Yüksek Lisans ve Doktora), Araştırma alanı: "Hidrojen"; Ülke: "Türkiye", Zaman aralığı: "1970-2021", Kaynak: Yüksek Öğretim Kurulu Başkanlığı Tez Merkezi.

Bu anahtar kelime ve kriterler seçildikten sonra; aşağıdaki bölümde birçok sayısal veri toplanmış, analiz edilmiş ve sunulmuştur. Türkiye'de son 50 yıllık dönemde yapılan hidrojen araştırmalarına ilişkin tüm veriler grafiklerle verilmektedir. Çevrimiçi kaynaklardan toplanan veriler ve bilgiler, bu alanda yürütülen makaleler, konferans bildirileri, derlemeler, kitaplar, kitap bölümleri, editörün yorumunu içeren başyazılar, lisansüstü tezler, patentler ve araştırma projeleri açısından derlenmiştir. Konu alanlarına göre makale ve kitap sayılarını kapsayan araştırma Şekil 34'te gösterilmektedir. Kimya alanı, hidrojenle ilgili en çok çalışmanın yapıldığı konu alanı olarak gözükmekte ve bunu sırasıyla fizik ve astronomi ve malzeme bilimi takip etmektedir. Bu toplam sayılar, olası alan çatışmaları ihmal edilerek elde edilmiştir. Yani tek bir yayın disiplinler arası ise birden fazla ilgili alana dâhil olmuştur. Örneğin, kimyanın biyokimya ve moleküler biyolojiye olan etkisi yadsınamaz.



Şekil 34. Türkiye'de 1970-2021 yılları arasında hidrojen araştırması ile ilgili her bir konu alanı için doküman sayısı (Kaynak [99] ile analiz edilmiştir)

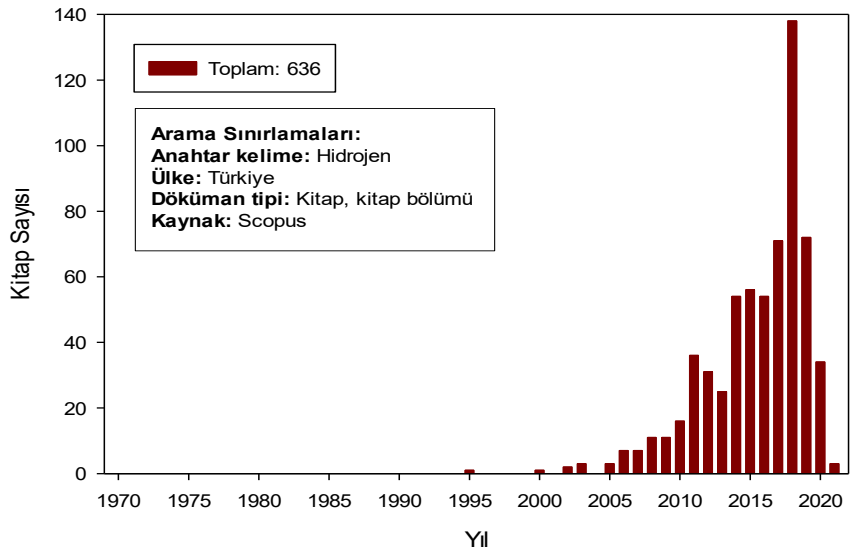
1970-2021 yılları arasında Türkiye'de hidrojen konusunda makale, konferans bildirisi ve derleme makale sayılarının değişimi Şekil 35'te görülmektedir. Şekil detaylı incelendiğinde ülkemizde hidrojen ile ilgili çalışmaların 1990 yılına kadar ilgi çekmediği anlaşılmaktadır. 1990-1995 yılları arasında önceki döneme göre hidrojen ile ilgili çalışmalar artış gösterse de özellikle 2000'li yılların başlangıcı ile ivme kazanmış ve hidrojene olan ilgi artmıştır. Bu konuda toplam 32.849 adet çalışma bulunmuştur. Çalışmaların giderek artması, akademi dünyasının hidrojen ile ne kadar içli dışlı olmaya başladığının bir başka göstergesidir. Her ne kadar yayın sayısı son kullanıcı için önem arz etmese de endüstri ve bilim dünyası açısından oldukça büyük bir önem taşımaktadır.



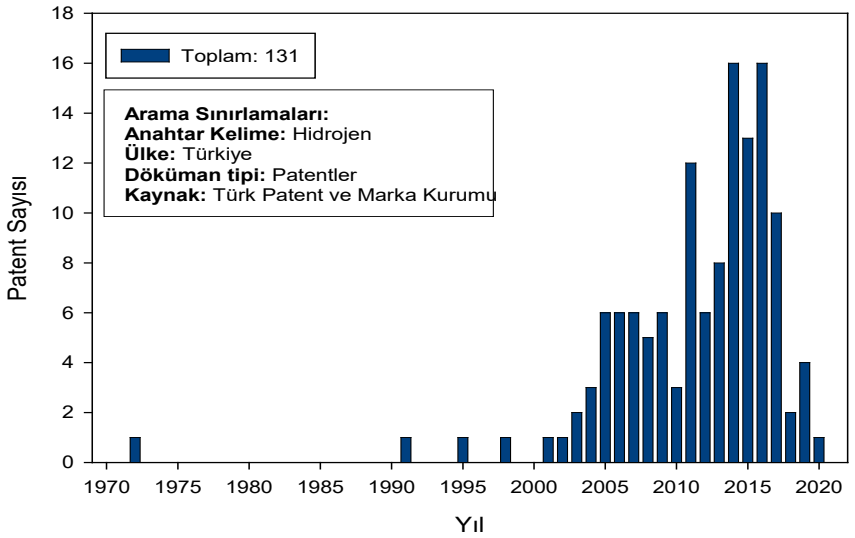
Şekil 35. Türkiye'nin 1970-2021 yılları arasında hidrojen ile ilgili yapılan araştırma çıktıları (Kaynak [99] ile analiz edilmiştir)

Şekil 36'da görüleceği gibi kitap, kitap bölümü ve editörün yorumunu içeren başyazılar kapsamında toplam 636 eser belirlenmiştir. Yıllara göre dağılıma baktığımızda bu çalışmaların büyük oranda 2010 sonrasında gerçekleştiği gözlenmiştir. Şekil 36 ile paralel olarak, hidrojen ile ilgili yayınlanan kitap ve kitap bölümünün de ülkemizde artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Yayın sayılarına paralel olarak artan kitap sayısı, ülkemizdeki hidrojen okuryazarlığı açısından önemli bir parametredir. Derlenen ve böylece akademiye ve sektöre kazandırılan kitap ve kitap bölümleri hidrojen okuryazarlığını artıracak ve hidrojene ilgi duyan araştırmacıların önünü açacacaktır. Bunun yanı sıra son kullanıcılar için de bilgi kaynağı sağlanmış olacaktır.

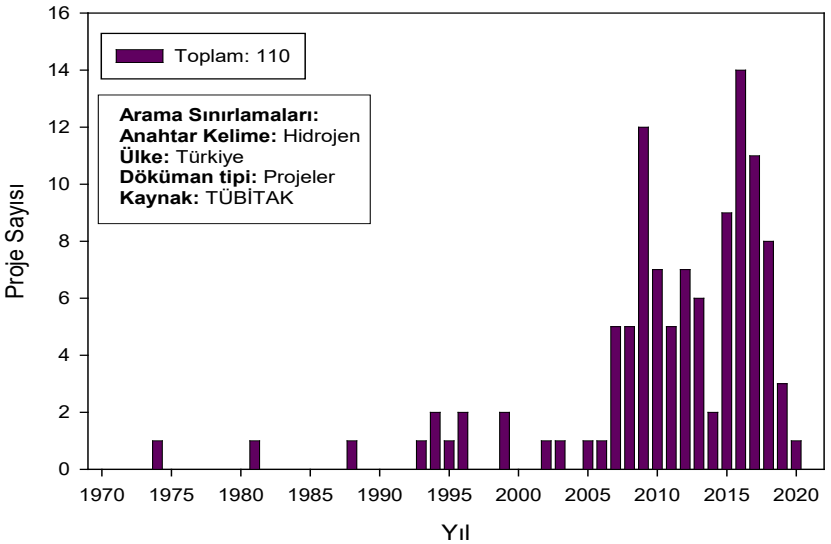
TPE (Türk Patent Enstitüsü) tarafından sağlanan bilgi ve veriler, hidrojen ile ilgili bugüne kadar 131 patentin olduğunu gösteriyor. Türkiye'nin teknolojik seviyesi ve buna göre bu alandaki araştırmacı sayısı düşünüldüğünde proje sayısının artırılması gerekmektedir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1970-2021 yılları arasında desteklenen proje sayısı 110'dur. Patent ve proje sonuçları sırasıyla Şekil 37 ve Şekil 38'de sunulmuştur. Yayın ve kitap sayılarındaki artış, patent ve proje sayılarındaki artış ile paralellik göstermemektedir. Bu da yapılan yayınların proje çıktısı olmadığı ve dolayısıyla patent alınmadığını göstermektedir. Hidrojenin ülkemizde yaygınlaşması ve endüstride kullanılması için proje sayılarının ve buna bağlı olarak patent sayılarının artırılması hedeflenmelidir.



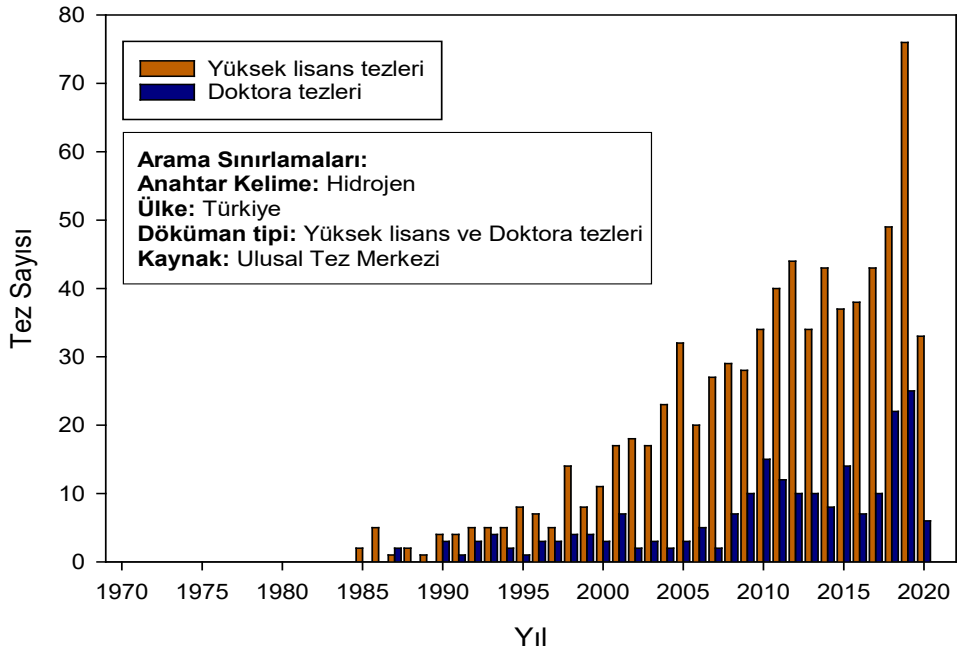
Şekil 36. Türkiye'nin kitap ve kitap bölümleri açısından 1970-2021 yılları arasında hidrojen araştırması çıktıları (Kaynak [99] ile analiz edilmiştir)



Şekil 37. Türkiye'de hidrojen konusunda alınan patent sayıları (Kaynak [100] ile analiz edilmiştir)



Şekil 38. 1970-2021 yılları arasında desteklenen TÜBİTAK projeleri (Kaynak [101] ile analiz edilmiştir)



Şekil 39. 1970-2021 yılları arasında hidrojen ile ilgili yapılan yüksek lisans ve doktora tezleri (Kaynak [102] ile analiz edilmiştir)

1985'ten bu yana, Türkiye'de hidrojen ile ilgili toplam 982 yüksek lisans ve doktora derecesi tamamlanmıştır. Bunun 769 gibi önemli bir kısmı yüksek lisans tezlerinden oluşmaktadır. Ancak aynı dönemde sağlık bilimlerinde de bazı çalışmalar tamamlanmıştır. 2010 yılından sonra çalışmalar derinleştirilerek doktora çalışmalarında artış gözlenmiştir. Hazırlanan tezlerin sayısal dağılımları Şekil 39'da gösterilmektedir. Proje sayısının artması, hidrojen üzerine gerçekleştirilen doktora ve yüksek lisans tez sayılarını da belirli bir oranda artıracaktır. Sanayi ve akademi iş birliği çerçevesinde gerçekleştirilebilecek olan doktora ve yüksek lisans tez çalışmaları hem endüstriyi besleyebilecek hem de patent, faydalı model ve proje sayılarında artış sağlayacaktır.

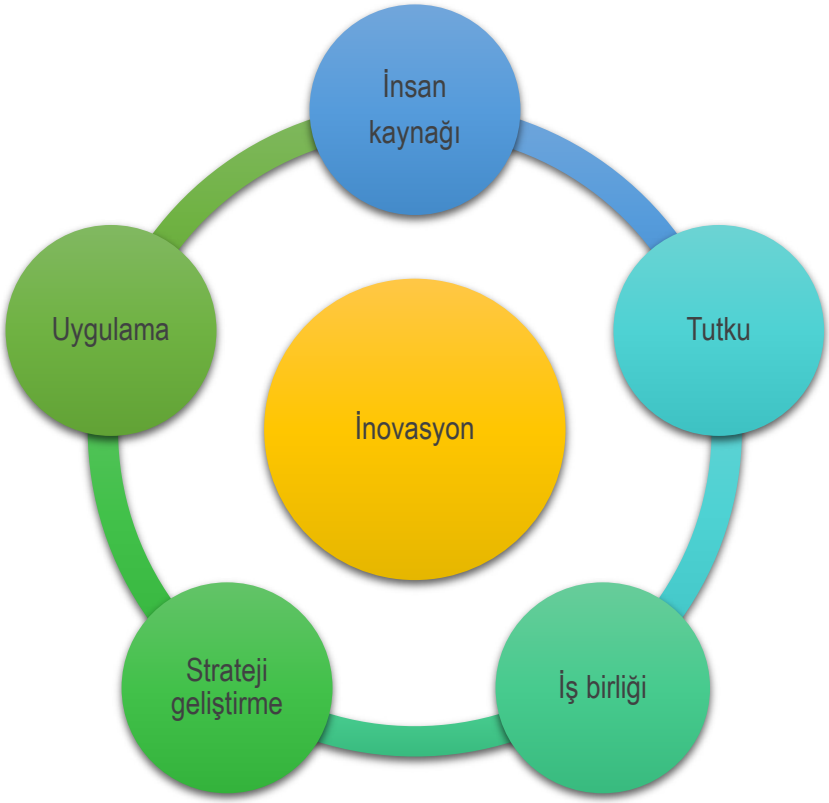
Akademik çıktıların sanayi projelerine dönüştürülmesi, ülkemizde niceliksel açıdan katkı sağlamasının yanında niteliksel açıdan da katkı sağlayarak hidrojene olan ilgiyi artıracak ve büyüyen bir ekosistem oluşturacaktır.

BÖLÜM 9

Yapılması Gerekli Çalışmalar, Planlama ve Koordinasyon

Ülkeler için stratejik planlamanın çok önemli bir faaliyet olduğu iyi bilinmektedir ve bu egzersiz gelişmiş (sanayileşmiş veya teknolojik olarak gelişmiş) ülkelerde düzenli olarak yapılmaktadır. Bu tür bir egzersizi gerçekleştirmek için bilim ve teknoloji bakanı tarafından atanan bilim ve teknoloji kurulu ya da stratejik planlamayı tarafsız bir şekilde yapmak için geçici bir panel/kurul gibi çeşitli seçenekler uygulamaya geçirilebilir. Bu kurul veya paneller, gerçek bir stratejik planlama için ayrı bir kapsam oluştururken akademi, endüstri ve devlet kurumları gibi toplumun çeşitli kesimlerinden üyelere sahip olabilir. Bu tür planlar, teknolojik gelişmelerin başarılı sonuçları için nihai olarak hedeflenen alan olan araştırma, boyutları Şekil 40'ta gösterilen inovasyon ve ticarileştirme konseptiyle eş zamanlı bir şekilde yapılabilir. Burada temel yapı taşı insan kaynağı olmakla beraber, insanların heyecanlı ve tutkulu olması ve iş birliklerinin oluşması gerektiği görülmektedir. Ayrıca bu iş birliklerinin gerekli yönetmelik ve düzenlemelerin yapılması ile hayata geçirilmesi büyük önem arz etmektedir.

ABD, Japonya, Kore ve Kanada gibi birçok ülke bu tür faaliyetlerde bulunmaktadır. Örnek olarak Kanada'da, üniversitelere, araştırma enstitülerine ve araştırma hastanelerine fon sağlayan Kanada Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırma Konseyi (NSERC) gibi finansman kurumlarından çok sayıda programa uygun olacak şekilde stratejik araştırma planlarını hazırlamak için özel talepler de mevcuttur [103]. Kanada'da üniversiteler ve araştırma kurumları, stratejik araştırma planlarını hazırlamadıkça ve güncellemedikçe çeşitli programlara (örneğin Kanada Araştırma Kürsüsü programları) başvuramamaktadırlar.



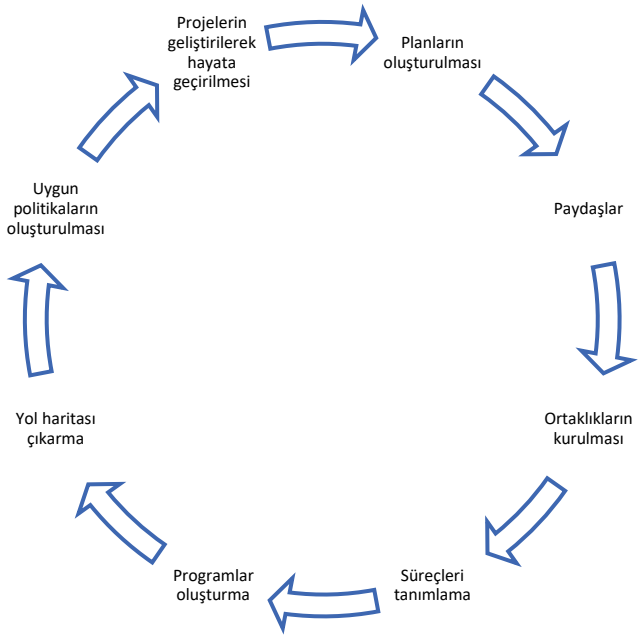
Şekil 40. İnovasyonun boyutları (Kaynak [104]'ten uyarlanmıştır)

Stratejik girişimlere aşağıdaki şekilde başlamak da aynı derecede önemlidir:

- Stratejik araştırma alanlarını belirlemek
- Kamu bilincini artırmak
- İnsan sağlığını ve refahını iyileştirmek için kaynakları geliştirmek
- Kritik insan kapasitesini artırmak
- Ortaklıkları ve iş birliklerini bireysel ve kurumsal olarak teşvik etmek
- Çeviri araştırmalarında kurumsal kapasiteleri geliştirmek
- Etkili organizasyon sistemleri ve altyapısı aracılığıyla araştırma mükemmelliğini teşvik etmek
- Araştırmacılar için eğitim, öğretim ve kariyer geliştirme faaliyetleri sağlamak
- Genç araştırmacılar için organize edilmiş bir rehberlik uygulamak
- Kurumsal mekanizmaları ve altyapıyı iyileştirmek ve geliştirmek
- Bir inovasyon kültürünü teşvik etmek, büyütmek ve desteklemek
- Finansal mekanizmalar ve odaklanmış fonlama programları geliştirmek
- Tücarileştirme ve teknoloji geliştirme için mekanizmalar ve kaynaklar geliştirmek.

Bir ülkenin stratejik planlama uygulaması yapıldıktan sonra, araştırma, inovasyon ve ticarileştirme faaliyetleri için yol haritalarının hazırlaması gerekmektedir. Bu yol haritaları, kısa vadeli (genellikle 3-5 yıl), orta vadeli (genellikle 5-15 yıl) ve uzun vadeli (15 yıldan fazla) olmak üzere üç farklı durum için hazırlanabilir. Bu tür yol haritalarının hazırlanması için stratejik planlamaya benzer bir yaklaşım uygulanabilir.

Bazen araştırma veya bilim ve teknoloji veya araştırma ve inovasyon kurulu tarafından koordine edilen bu tür yol haritalarını kurumsal olarak hazırlamaları için belirli üniversitelere ve enstitülere hükümetten talepler gelebilir. Bu tür teknoloji yol haritaları, Şekil 41'de gösterilen planlamaları, paydaşları, ortaklıkların kurulmasını, süreçleri tanımlamayı, programlar oluşturmayı, yörüngeleri, politikaları ve projeleri kapsamalıdır.



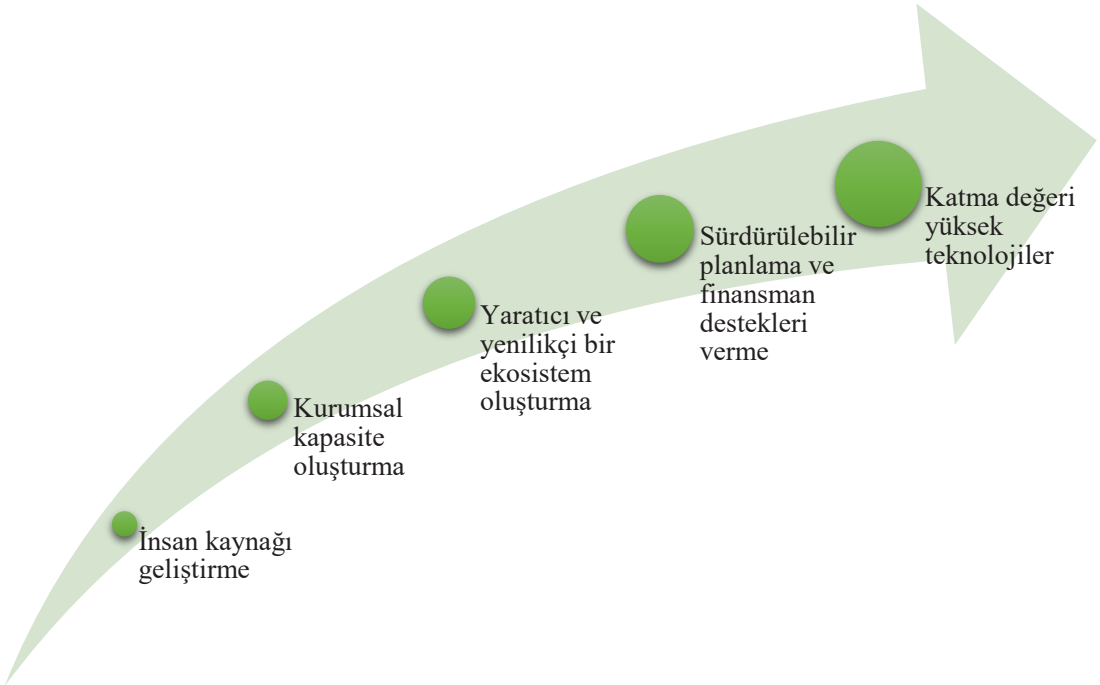
Şekil 41. Bir ülke için yol haritası döngüsünün gösterimi (Kaynak [104]'ten uyarlanmıştır)

Bu yol haritası hazırlığının döngüsü, hedeflenen bir teknoloji veya teknolojiler için genel olarak açıkça tanımlanan birincil planları; akademi, endüstri ve devlet kurumları dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerden gerekli paydaşları; hedeflere ulaşmak için belirlenen ortakları; kısa, orta ve uzun vadeli olarak tanımlanan süreçleri; buna göre oluşturulan programları; paydaşları, kişileri teşvik etmeyi,

desteklemek için getirilen mekanizmaları; paydaşlara, ortaklara ve diğerlerine süreci hızlandırmaya yardımcı olmak için sağlanan araçları; ve konuya ilişkin yol haritasının uygulanmasına yardımcı olmak için bu yönde sunulan stratejileri ve politikaları gerektirir. Burada en çok ödüllendirici işlere, en güçlü ekonomilere ve en iyi yaşam kalitesine ev sahipliği yapması beklenen inovasyona yatırım yapmak da önemlidir. Türkiye için inovasyona dayalı toplum ve ekonomi için gerekli olan adımlar Şekil 42'4e gösterilmektedir.

Ne tür bir araştırma yapılırsa yapılsın, hedeflere ulaşmak için bunu etkili bir şekilde yapmak önemlidir. Bu bağlamda beklenen nihai etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bilgi üretme
- Fikri mülkiyet geliştirme
- Patent geliştirme
- Teknoloji geliştirme
- Yüksek nitelikli personel eğitimi
- Ortaklık geliştirme (sanayi, akademi, devlet kurumları, kâr amacı gütmeyen kuruluşlar, sivil toplum kuruluşları vb. ile)
- Problem çözme (endüstri, kamu vb. için)
- Bilimsel yayınlar.



Şekil 42. İnovasyona dayalı ekonomi ve toplum için gereklilikler

Sonuç olarak araştırma, inovasyon ve ticarileştirme konseptinden çıkarılacak dersler aşağıda verilmiştir:

- Üniversiteler inovasyondaki kritik oyunculardır.
- Öğretim üyeleri kritik araştırmacılardır.
- Araştırma, inovasyona giden kritik yoldur.
- Yenilik, teknoloji geliştirme için bir ön koşuldur.
- Teknoloji geliştirme, ekonomik bağımsızlık için bir ön koşuldur.
- Ticarileştirme, endüstriyel gelişimin anahtarıdır.
- Nihai sonuç daha büyük refah ve yüksek yaşam kalitesi olmalıdır.

BÖLÜM 10

Hedefler ve Stratejik Planlama

Hidrojen enerjisinin geleceğinin görkemli olması beklenmektedir çünkü gelecek karbonsuz enerji çözümlerini gerektirmektedir. Bu bağlamda, hidrojen, hidrojenizasyona (hidrojen enerjisinin uygulama için ana enerji çözümü olacağı anlamına gelir) ve karbonsuz bir topluma ulaşmak için benzersiz bir çözüm haline gelmiştir. Daha sürdürülebilir bir gelecek için, akademik, kamu ve endüstri iş birlikleri ile olası hidrojen enerji sistemlerini araştırmak ve bunlara yatırım yapmak kritik bir önem taşımaktadır. Bu ortaklık, akademinin yenilikçi araştırma ve geliştirme faaliyetlerine, hükümetlerin güçlü liderliği ve yasal desteğine ve hem kamu hem de özel sektörden uzun vadeli küresel yatırıma ihtiyaç duymaktadır.

Hidrojen enerji sistemlerinin halk tarafından kabulü, enerji güvenliği, hava kalitesinin artışı ve küresel iklim değişikliği riskinin azalması gibi faydaları ele alabilen etkili stratejilerle teşvik edilebilir. Bu stratejiler güvenilir olmalı ve ilgili tüm sektörlere ve son kullanıcılara iyi tanımlanmış bir kılavuz sunmalıdır. Toplumların daha temiz, güvenilir, düşük maliyetli ve çeşitli hidrojen enerji sistemlerini nasıl değerlendirdiklerine dair sürekli bir iletişim için halka açık bir fikir alışverişi başlatılmalıdır.

Hidrojen enerji sistemlerinin ortak küresel kullanımı, enerji üretiminin en başından son kullanım ve atık bertarafına kadar mevcut ve gelecekteki küresel enerji sistemlerinin tüm yönlerini potansiyel olarak etkileyebilir. Bir hidrojen enerji sisteminin öncelikli bileşenleri, üretim, dağıtım, depolama, dönüşüm ve son kullanım uygulamaları olarak sıralanabilir. Tüm bu bileşenler doğrudan birbirine bağlıdır ve karşılıklı olarak bağımlıdır. Hidrojen enerji sistemlerinin tasarımı, geliştirilmesi ve uygulaması, tüm sistem düzeyinde değerlendirilmelidir. Hidrojen enerji sistemlerinin ana bileşenleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- **Üretim:** Yenilikçi hidrojen üretim sistemlerini belirlemek, tasarlamak, geliştirmek, inşa etmek ve test etmek için akademinin, hükümetlerin ve endüstrilerin iş birliği gerekmektedir. Sistem maliyetlerini düşürmek, genel verimliliği artırmak ve olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için hidrojen üretiminde inovasyona gereksinim bulunmaktadır. Büyük veya küçük ölçekte hem merkezi hem de dağıtılmış hidrojen enerji sistemlerini iyileştirmek için yeni hidrojen üretim yöntemleri gerekmektedir. Aynı zamanda, buharla metan reformu, kömür/biyokütle gazlaştırma ve suyun elektrolizi gibi mevcut hidrojen üretim yöntemlerini iyileştirmek için araştırma ve geliştirme çalışmaları hızlandırılmalıdır. Buna ek olarak, araştırma ve geliştirme faaliyetleri fotonik temelli teknikler ve yeni biyolojik sistemler gibi yenilikçi hidrojen üretim yöntemlerine odaklanmaya devam etmelidir. Son zamanlarda hidrojen üretimi üzerine yapılan çalışmaların çoğu, bir ara elektrik üretim sürecine gerek duymadan yenilenebilir enerji kaynaklarından doğrudan hidrojen üretimine eğilim göstermektedir. İnce filmler, boyaya duyarlı malzemeler, gelişmiş membranlar ve mühendislik ürünü mikroorganizmalar gibi yeni malzemeler ve yaklaşımlarla fotoelektrokimyasal ve fotobiyolojik hidrojen üretimi, temiz hidrojen üretiminde büyük bir potansiyel göstermektedir. Hâlihazırda fosil yakıt bazlı hidrojen üretim yöntemlerinin yenilenebilir enerji bazlı alternatiflerle değiştirilebileceğini gösteren bu yenilikçi yaklaşımlarla ilgili çok sayıda patent ve çalışma mevcuttur.

- **Dağıtım:** Hidrojen enerji sistemlerindeki büyümeyi sürdürebilmek için mevcut hidrojen dağıtım altyapısı iyileştirilmeli ve genişletilmelidir. Ön araştırma ve geliştirme faaliyetleri, mevcut dağıtım sistemleri için geliştirilmiş ve iyileştirilmiş bileşenleri tasarlamayı amaçlamalıdır. Bu

bileşenlerden bazıları sensörler, boru malzemeleri, kompresörler, yüksek basınç destek mekanizmaları ve izolatörlerdir. Uygun fiyat, güvenilirlik ve güvenlikle ilgili zorluklar, hidrojen dağıtım sistemlerini hem tasarım hem de geliştirme açısından etkileyebilmektedir. Hidrojen dağıtımı için bir diğer önemli karar kriteri, küçük veya büyük ölçekli (merkezi veya dağıtılmış gibi) hidrojen üretim yöntemleridir. Talep ve arz sorunlarının üstesinden gelmek için hem merkezi hem de dağıtılmış sistemlerde hidrojen dağıtım bileşenleri, tüm olası son kullanım uygulamalarında (yakıt hücreleri, yakıt ikmali istasyonları ve güç üretim sistemleri gibi) dikkatle test edilmelidir. Son zamanlarda, akademi, hükümetler ve endüstriler, mevcut doğal gaz boru hatlarında küçük değişiklikler yaparak hidrojeni en düşük maliyetle dağıtabilmek için yöntemler araştırmaktadırlar. Ayrıca, sıfır veya minimum hidrojen gazı kaybı ile bir hidrojen ağı oluşturmak için daha hafif ve daha kararlı malzemeler geliştirilmektedir. Hidrojen enerji sistemlerinin dağıtım maliyetlerini, kayıplarını ve sıcaklık/basınç gereksinimlerini en aza indirebilmek için son literatürde yeni yaklaşımlarla küçük ölçekli ve dağıtılmış hidrojen üretimi araştırılmıştır.

- **Depolama:** Hidrojen depolaması, hidrojen enerji sistemlerine geçiş sırasında çok önemli bir sorundur. Şu anda, mevcut hidrojen depolama sistemlerinden hiçbiri kamu, endüstri ve son kullanıcı tarafından belirlenen tüm gereksinimleri karşılamamaktadır. Sistem maliyetlerini düşürmek, genel verimliliği artırmak ve olumsuz çevresel etkileri azaltmak için yeni hidrojen depolama yöntemlerinin ve gelişmiş depolama malzemelerinin araştırma ve geliştirilmesinde akademik çevrenin, kamunun ve endüstrilerin koordinasyonu gerekmektedir. Ticari olarak temin edilebilen hidrojen depolama yöntemlerini iyileştirmek için araştırma ve geliştirme faaliyetlerine gereksinim bulunmaktadır. Bu yöntemler, sıkıştırılmış gaz ve kriyojenik sıvı fazda hidrojen depolamayı içermektedir. Yenilikçi hidrojen depolama yöntemleri, hafif metal hidritler ve karbon nanotüpler gibi yenilikçi malzemeleri içermektedirler. Son literatürde, kimyasal ve fiziksel hidrojen depolama ortamları için yeni yaklaşımlar büyük potansiyel göstermiştir. Hafif metal hidritler; kompleks "hidriyodik" hidritler, borhidrürler ve alanatlar ($[BH_4]^-$ ve $[AlH_4]^-$ gibi); kompleks "protonik hidrürler", nitrürler, imidler ve amidler; amid-hidrit-borhidrürler (basit ve karmaşık ikili bileşen sistemleri ve üçlü kompozit sistemler) gibi diğer çok bileşenli sistemler ve amonyak-boran ve amido-boran, literatürdeki yeni kimyasal hidrojen depolama ortamlarıdır. Metal organik kafeslerin tasarım ve geliştirilmesindeki yeni yaklaşımlar, fiziksel hidrojen depolama sistemlerinde büyük potansiyel göstermiştir. Çok farklı malzemelerin bu örnekleri, yeni hidrojen depolama çözümleri üretme konusunda daha fazla buluş ve keşif için hâlâ bolca yer olduğunu göstermektedir.

- **Nihai kullanım:** Nihayetinde hidrojen enerji sistemleri, tüketicilerin ulaşım, elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarında hidrojeni kullanmaları için geliştirilmiştir. Hidrojen enerji sistemlerinin kamuoyu bilinci ve kabulü ile birlikte sistem maliyeti, verimliliği ve çevresel etkilerle ilgili sorunların ele alınması gerekmektedir. Nihai kullanıcıların temel gereksinimleri, satın alınabilirlik, kullanılabilirlik, uygunluk, güvenilirlik, güvenlik ve daha az zararlı çevresel etki olarak özetlenebilir. Nihai kullanıcı tercihlerini anlamak ve bu tercihleri hidrojen enerji sistemleri etrafında inşa etmek için araştırma ve geliştirme faaliyetleri hızlandırılmalıdır. Hidrojen enerji sistemlerinin, birleşik ısıtma ve güç dâhil, sabit ve dağıtılmış enerji üretim tesislerinde ve ulaşım uygulamaları için kullanımı beklenmektedir. Yakıt hücreleri, hidrojeni çok verimli bir şekilde dönüştürebildikleri için, hidrojene dayalı ekonomide kilit bir teknoloji olarak kabul edilir. Birkaç kilovattan birkaç megavata kadar değişen kapasiteye sahip sabit yakıt hücresi sistemleri, yedek güç, dağıtılmış güç üretimi ve kojenerasyon veya taşınabilir jeneratörler için kullanılabilir. Mevcut literatür ve gelecek araştırmaların tahmini, en gelişmiş hidrojen enerjisi son kullanım zincirlerinin, nihai kullanıcıya çoklu çıktılar sağlayan düşük sıcaklık ve basınca sahip prosesler olduğunu göstermektedir. Yakıt hücresi ve içten yanmalı motorlar, emisyonları düşürmek ve ortadan kaldırmak, işletim maliyetlerini azaltmak ve ürün

ömrünü uzatmak için yeni katalizörler ve membranlarla geliştirilmektedir.

- **Eğitim ve insan kaynağı yetiştirme:** Hidrojen enerji sistemleri genellikle karmaşık olarak kabul edilmektedir. Dahası, insanlar hidrojen enerji sistemlerinin ekonomiyi, çevreyi, halk sağlığını, güvenliği ve enerji güvenliğini nasıl etkilediğine dair yeterli bilgiye sahip değildir. Nihayetinde, son kullanıcı seçimleri enerji piyasalarını, teknolojik gelişmeleri ve kamu politikalarını etkileyecektir. Bu nedenle, bilim programları ve halka erişim programları gibi etkili eğitim materyalleri ve teknikleri yoluyla halkı eğitmek, hidrojen enerji sistemleri için halkın bilinçlenmesine ve bu sistemlerin kabul görmesine büyük ölçüde yardımcı olabilecektir.

- **Standartlar ve yönetmelikler:** Hidrojeni, yakıt hücreli araçlarda veya endüstriyel gaz türbinlerinde yakıt olarak ve mesken veya endüstriyel yanma prosesi için harmanlanmış gazın bir bileşeni olarak ve boru hatlarında taşımak gibi farklı alanlarda kullanabilmek için, güvenlik kodları, standartlar ve yönetmeliklere uyulmalıdır. Hidrojenle ilgili sistemlerin kurulumu için NF M58-003 kod standardı geçerlidir. Hidrojenin sıkıştırıldığı ve araçlarda kullanıldığı yakıt hücresi sistemi bileşenleri için, Amerikan Ulusal Standart Organizasyonu ANSI/CSA HGV 3.1-2015 kodları yerel kısıtlamalarımıza göre değiştirilebilir. Aynı durum hidrojen dağıtım sistemleri, bağlantı elemanları, akaryakıt istasyonları ve hidrojen bakımından zengin gaz karışımları için de geçerlidir. Ayrıca taşınabilir yakıt hücreli güç sistemleri, ASME PTC 50 gibi kod ve standartlara ihtiyaç duyar. Türk Standartları Enstitüsünün bu kod, standart ve yönetmelikleri hazırlamak için dünyadaki diğer geçerli standartları kullanabileceğini belirtmekte fayda bulunmaktadır. Hayati öneme sahip bir diğer alan ise hidrojenin kaçak ve taşıma standartlarıdır. Örneğin, ISO 261 42, hidrojen tespiti için gerekli standartları belirlemektedir. Hidrojeni ve hidrojen sistemlerini binalar ve ekipmanlar için kullanmak için, güvenlik sensörleri, kodları ve standartları, toplum için kullanıcı dostu bir şekilde yerelleştirilmelidir.

Hidrojen enerji sistemleri ve uygulamaları, her ülke için çok sayıda avantajla günümüzün enerji krizine potansiyel olarak uzun vadeli harika bir çözümü temsil etmektedir. Hidrojen enerji sistemlerinin gerçek maliyetlerini ve faydalarını değerlendirmek için akademik, resmi ve endüstriyel kaynakları birleştirerek organize ve motive edilmiş bir girişim gerekmektedir. Sonraki adımlarda kapsamlı araştırma ve geliştirme stratejilerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Hidrojen enerji sistemlerine başarılı bir şekilde geçmek için, finans, malzeme, insan gücü ve hizmetler dâhil mevcut tüm kaynaklardan önemli ölçüde fedakârlık gerekmektedir.

BÖLÜM 11

Sonuçlar ve Öneriler

Hidrojen ekonomisine geçiş günümüzde artık kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Hidrojen üç sacayaklı enerji taşıyıcısı, yakıt ve ham madde olarak kullanım imkânına sahiptir. Bu bölümde raporun sonuçları ve Türkiye'de hidrojen ekonomisine geçiş için öneriler verilmektedir.

11.1. Sonuçlar

Bu rapor, hidrojenin gelecekteki enerji sistemlerinde rolü, potansiyel uygulamaları ve hidrojen enerji sistemlerinin geniş alanlarda kullanımı gibi birçok boyutta bir yol haritası sunmaktadır. Bu raporun bir diğer amacı, hidrojen ekonomisine geçişin hızlandırılmasına yardımcı olmak ve yeni hidrojen enerji sistemlerinin tasarımı, geliştirilmesi, kurulumu ve test edilmesi için daha fazla yatırım yapılmasını teşvik etmektir.

Yakıt kullanımının tarihsel geçişi, hidrojen enerji sistemlerine olan eğilimi göstermektedir. Geleneksel odun yakıtı yerini sanayi devrimi sırasında kömüre bıraktığından ve kömürün yerini de yavaş yavaş petrol ve nihayetinde doğal gaz gibi daha hafif fosil yakıtlar aldığından, yakıtların hidrojen içeriği önemli ölçüde artmaya devam etmiştir. Nihai hedef, sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için yakıtlardaki tüm karbon içeriğini ortadan kaldırmaktır. Enerji taşıyıcısı ve yakıt olarak hidrojen, mevcut ve gelecekteki enerji sistemlerini çevreye zarar vermeyecek şekilde destekleyebilme potansiyeline sahiptir.

Günümüzde, küresel hidrojen üretiminin %90'ından fazlası fosil yakıtlardan enerji ve malzeme girdisine dayanmaktadır. Nihai hedef, fosil yakıtla ilgili sera gazı emisyonlarını ortadan kaldırmak veya azaltmak için bu yüzdeyi minimum seviyelere düşürmektir. Amonyak üretimi şu anda hidrojen enerji sistemlerini kullanan en büyük endüstridir. Ek olarak, kimya endüstrileri ve rafineriler önemli miktarlarda hidrojen tüketmektedir. Gelecekte, üretimden son kullanıma ve halkın kabulüne kadar eksiksiz hidrojen ekonomisinin geliştirilmesiyle, enerji sektörünün hidrojenin en önemli bileşeni olması beklenmektedir.

Bilimsel düzeyde birçok çalışma yapılmasına rağmen PEM yakıt hücrelerinin ticarileşmesi özellikle hücrelerin ömrünün uzatılması, kullanılan malzemelerin maliyetinin azaltılması, hidrojenin ucuz olarak üretilmesi, hidrojen depolamanın geliştirilmesi, hidrojen istasyonlarının yaygınlaştırılması gibi faktörlere bağlıdır.

Ülkemizde 2030 yılına kadar hidrojenin üretimi, taşınması, dağıtımı ve kullanımı konusunda yapılacak temel araştırma, uygulamalı araştırma ve tatbikata yönelik uygulama projelerinin ve ArGe'nin teşvik edilmesi gerekmektedir. 2030 ile 2050 yılları arasında ise hidrojen ve yakıt hücrelerinin büyük ölçekte ticarileştirilmesi, hidrojen üretimi, taşınması, depolanması, hidrojen istasyonlarının mevcut altyapıya entegrasyonu ve buna paralel olarak yakıt hücrelerinin sabit, seyyar ve portatif uygulamalarındaki pazarının yaygınlaştırılması planlanmalıdır. Böylece, Avrupa Birliği'ne paralel olarak ve dünyadaki diğer gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerle birlikte ülkemizde 2050'de hidrojene dayalı bir ekonomi gerçekleşebilir.

Avrupa ve Kuzey Amerika gibi gelişmiş bölgelerde ve ayrıca Çin gibi artan enerji talebi yaşayan gelişmekte olan ülkelerde hidrojen enerjisinin kullanımını teşvik eden çeşitli önlemler alınmaktadır.

Bu küresel yayılma, hidrojen pazarındaki yüksek büyüme potansiyelini göstermektedir. Türkiye de bir "hidrojen toplumu" inşa etme konusunda ilerlemeli, bunun gibi küresel eğilimleri doğru bir şekilde değerlendirmeli ve bunlara ayak uydurmalıdır. Özellikle, hidrojen kullanımı önemli ölçüde artarken, hidrojen pazarının ölçeğindeki artışa, güvenliği sağlamak ve maliyetleri düşürmek için önlemler eşlik etmelidir. Bunun için endüstri, akademi ve hükümet arasında aktif iş birliği gerekmektedir.

Hidrojen ekonomisine geçişte eğitim ayağı da ihmal edilmemelidir. Enerji eğitiminde yetkin kurumsal yapılardan ve uzmanlardan faydalanılmalıdır. İlgili çalışma ekipleri seçilirken en çok dikkat edilmesi gereken konulardan biri de bu yetkinliklerinin değerlendirilmesidir.

Bir ülkenin stratejik planlama yapıldıktan sonra, araştırma, inovasyon ve ticarileştirme faaliyetleri için yol haritalarına gereksinimi bulunmaktadır. Bu raporda verilen yol haritası ile hidrojenin üretiminden nihai kullanımına kadar olan tüm prosesler ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır. Ayrıca, dünyada ve Türkiye'de hidrojen ekonomisine geçiş için yapılması gereken çalışmalara, hedeflere ve stratejik planlamaya yer verilmiştir.

11.2. Öneriler

Özetleyecek olursak Türkiye'nin aşağıdakileri ivedilikle hayata geçirmesi gerekmektedir:

1. Araştırma, inovasyon ve teknoloji geliştirme konularında hidrojen ile direkt olarak ilgili destek programları ivedikle hayata geçirilmelidir.
2. Büyük bir ihtiyacın söz konusu olduğu insan kaynağını yetiştirmek için hem meslek liseleri hem de meslek yüksekokullarında acilen hidrojen teknolojilerine yönelik programlar oluşturmalı, üniversitelerde ise bütün programlarda hidrojen teknolojilerine ve hidrojen ekonomisine yönelik dersler oluşturulmalıdır.
3. Özellikle küçük veya büyük uygulamalara yönelik proje destekleri oluşturulmalı ve Sanayi Bakanlığının bütün birimleri diğer bakanlıklar ile birlikte çalışarak buna yönelik bir "Türkiye Sanayi Eylem Planı" oluşturmalıdır.
4. Türkiye hidrojen çiftlikleri programını yenilenebilir enerji esaslı hidrojen üretimini içerecek şekilde acilen başlatmalıdır. Bu çiftlikler için kapasite, depolama yöntemleri ve dağıtım süreçleri tanımlanabilir.
5. Bakanlık bünyesinde sanayi ile ortak çalışmaları teşvik ve koordine eden bir kurul oluşturulmalıdır.
6. Hidrojen teknolojileriyle ilgili girişimcilik eğitim ve destek programları oluşturulmalıdır.
7. Türk Standartları Enstitüsünde hidrojene yönelik standartları ve yönetmelikleri hazırlayacak bir çalışma grubu acilen oluşturulmalıdır.
8. İş Sağlığı ve Güvenliği yasasında hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması ve son kullanımına yönelik maddeler eklenmelidir.
9. Hidrojen sistemlerine yönelik yönetmelikler oluşturulmalı, akreditasyon ve sertifikasyon merkezleri kurulmalıdır.
10. Hidrojen teknolojilerine yönelik eylem planları Türkiye'nin 2023, 2053 ve 2071 hedeflerindeki yol haritalarında da içerilmelidir.
11. Basılı ve sosyal medya kanallarının aktif olarak kullanımı gerekmektedir. Bunun da koordinasyonu için çeşitli sosyal medya alanları ve gruplar oluşturularak hidrojen ekonomisine yönelik bilgilendirmelerin yapılabileceği kanalların oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR

[1.] "WoodsHtoCratio.pdf". https://phe.rockefeller.edu/docs/WoodsHtoCratio.pdf (erişim Oca. 03, 2021).

[2.] I. Dincer, "Covid-19 coronavirus: Closing carbon age, but opening hydrogen age", *Int J Energy Res*, c. 44, sy 8, ss. 6093-6097, Haz. 2020, doi: 10.1002/er.5569.

[3.] Greenhouse gases' effect on climate - U.S. Energy Information Administration (EIA). https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/greenhouse-gases-and-the-climate.php (erişim Oca. 10, 2021).

[4.] Ambient (outdoor) air pollution. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health (erişim Oca. 04, 2021).

[5.] Hydrogen Council, *https://hydrogencouncil.com/en/*. https://hydrogencouncil.com/en/ (erişim Oca. 04, 2021).

[6.] WA tourist town to be transformed into a zero-emission community powered by hydrogen, Oca. 15, 2020. https://www.abc.net.au/news/2020-01-15/denham-near-shark-bay-first-wa-town-to-be-powered-by-hydrogen/11870472 (erişim Oca. 04, 2021).

[7.] Analysis: Coronavirus temporarily reduced China's CO2 emissions by a quarter, *Carbon Brief*, Şub. 19, 2020. https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-has-temporarily-reduced-chinas-co2-emissions-by-a-quarter (erişim Oca. 04, 2021).

[8.] Airborne Nitrogen Dioxide Plummets Over China, Şub. 28, 2020. https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china (erişim Oca. 11, 2021).

[9.] Satellite Photos Show A Dramatic Decrease In Pollution Above Italy During The Coronavirus Quarantine, *Demilked*, Mar. 17, 2020. https://www.demilked.com/italy-coronavirus-pollution-decrease/ (erişim Oca. 04, 2021).

[10.] "YTBS". https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (erişim Şub. 16, 2021).

[11.] Coronavirus lockdown provides vivid picture of how environment recovers without people", *NBC News*. https://www.nbcnews.com/science/environment/coronavirus-shutdowns-have-unintended-climate-benefits-n1161921 (erişim Oca. 04, 2021).

[12.] Particles, *Environmental Protection UK*. https://www.environmental-protection.org.uk/policy-areas/air-quality/about-air-pollution/particles/ (erişim Oca. 04, 2021).

[13.] C. Acar ve I. Dincer, "Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 39, sy 1, ss. 1-12, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.060.

[14.] "Hydrogen Basics | Hydrogen". https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-basics-0 (erişim Oca. 02, 2021).

[15.] J. Adolf *vd.*, "Shell Hydrogen Study. Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2", *Shell, Hamburg*, 2017.

[16.] I. Dincer, "Green methods for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 37, sy 2, Art. sy 2, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.173.

[17.] C. Acar ve I. Dincer, "1.13 Hydrogen Energy", içinde *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, ss. 568-605.

[18.] L. Kouchachvili ve E. Entchev, "Power to gas and H2/NG blend in SMART energy networks concept", *Renewable Energy*, c. 125, ss. 456-464, Eyl. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.088.

[19.] F. Tabkhi, C. Azzaropantel, L. Pibouleau, ve S. Domenech, "A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 33, sy 21, ss. 6222-6231, Kas. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.103.

[20.] A. Abánades ve others, "The challenge of hydrogen production for the transition to a CO2-free economy", *Agronomy research*, c. 10, sy 1, ss. 11-16, 2012.

[21.] I. Dincer ve C. Acar, "Innovation in hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 42, sy 22, ss. 14843-14864, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.107.

[22.] A. Ozbilen, I. Dincer, ve M. A. Rosen, "Life cycle assessment of hydrogen production via thermochemical water splitting using multi-step Cu–Cl cycles", *Journal of Cleaner Production*, c. 33, ss. 202-216, Eyl. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.035.

[23.] R. Bhandari, C. A. Trudewind, ve P. Zapp, "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review", *Journal of Cleaner Production*, c. 85, ss. 151-163, Ara. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.048.

[24.] P. Parthasarathy ve K. S. Narayanan, "Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review", *Renewable Energy*, c. 66, ss. 570-579, Haz. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.12.025.

[25.] Md. Nasir Uddin, W. M. A. W. Daud, ve H. F. Abbas, "Potential hydrogen and non-condensable gases production from biomass pyrolysis: Insights into the process variables", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 27, ss. 204-224, Kas. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.031.

[26.] J. A. Trainham, J. Newman, C. A. Bonino, P. G. Hoertz, ve N. Akunuri, "Whither solar fuels?", *Current Opinion in Chemical Engineering*, c. 1, sy 3, ss. 204-210, Ağu. 2012, doi: 10.1016/j.coche.2012.04.001.

[27.] P. Hoffmann, *Tomorrow's energy: hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet*, 2. print. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2001.

[28.] I. Dincer ve C. Acar, "A review on clean energy solutions for better sustainability: A review on clean energy solutions for better sustainability", *Int. J. Energy Res.*, c. 39, sy 5, ss. 585-606, Nis. 2015, doi: 10.1002/er.3329.

[29.] R. Fouquet ve P. J. G. Pearson, "Past and prospective energy transitions: Insights from history", *Energy Policy*, c. 50, ss. 1-7, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.08.014.

[30.] "Production of hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA)". https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php (erişim Oca. 11, 2021).

[31.] C. Acar ve I. Dincer, "3.1 Hydrogen Production", içinde *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, ss. 1-40.

[32.] I. Dincer, "Green methods for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 37, sy 2, ss. 1954-1971, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.173.

[33.] S. Trasatti, "Water electrolysis: who first?", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, c. 476, sy 1, ss. 90-91, Eki. 1999, doi: 10.1016/S0022-0728(99)00364-2.

[34.] M. Sankir ve N. Demirci Sankir, Ed., *Hydrogen production technologies*. Beverly, MA : Hoboken, NJ: Scrivener Publishing ; John Wiley & Sons, 2017.

[35.] S. A. Grigoriev, V. N. Fateev, D. G. Bessarabov, ve P. Millet, "Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology", *International Journal of Hydrogen Energy*, s. S0360319920310715, Nis. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.109.

[36.] D. Parra, L. Valverde, F. J. Pino, ve M. K. Patel, "A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 101, ss. 279-294, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.010.

[37.] R. S. El-Emam ve H. Özcan, "Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production", *Journal of Cleaner Production*, c. 220, ss. 593-609, May. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.309.

[38.] I. Dincer ve C. Zamfirescu, *Sustainable hydrogen production*. Boston: Elsevier, 2016.

[39.] M. Tolga Balta, I. Dincer, ve A. Hepbasli, "Thermodynamic assessment of geothermal energy use in hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 34, sy 7, ss. 2925-2939, Nis. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.087.

[40.] W. Hui, F. Xiaoqiong, W. Xiaofang, C. Sanping, ve G. Shengli, "Hydrogen production by redox of bimetal cation-modified iron oxide", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 33, sy 23, ss. 7122-7128, Ara. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.09.017.

[41.] O. Oruc ve I. Dincer, "Assessing the potential of thermo-chemical water splitting cycles: A bridge towards clean and sustainable hydrogen generation", *Fuel*, c. 286, s. 119325, Şub. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119325.

[42.] S. Baykara, "Experimental solar water thermolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 29, sy 14, ss. 1459-1469, Kas. 2004, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.02.011.

[43.] S. A. Sherif, D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos, ve A. Steinfeld, Ed., *Handbook of Hydrogen Energy*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2015.

[44.] J. Lede *vd.*, "Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water: Preliminary investigations", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 7, sy 12, ss. 939-950, 1982, doi: 10.1016/0360-3199(82)90162-8.

[45.] J. D. Holladay, J. Hu, D. L. King, ve Y. Wang, "An overview of hydrogen production technologies", *Catalysis Today*, c. 139, sy 4, ss. 244-260, Oca. 2009, doi: 10.1016/j.cattod.2008.08.039.

[46.] C. M. Kalamaras ve A. M. Efstathiou, "Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments", *Conference Papers in Energy*, c. 2013, ss. 1-9, 2013, doi: 10.1155/2013/690627.

[47.] J. E. Funk ve R. M. Reinstrom, "System study of hydrogen generation by thermal energy", 1964, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.osti.gov/biblio/5213465.

[48.] J. Funk ve R. Reinstorm, "Industrial and engineering chemistry process design and development", *Ind Eng Chem Process Des Dev*, c. 5, sy 3, ss. 336-42, 1966.

[49.] P. Hallenbeck, "Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 27, sy 11-12, ss. 1185-1193, Kas. 2002, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00131-3.

[50.] K. Chandrasekhar, Y.-J. Lee, ve D.-W. Lee, "Biohydrogen Production: Strategies to Improve Process Efficiency through Microbial Routes", *IJMS*, c. 16, sy 12, ss. 8266-8293, Nis. 2015, doi: 10.3390/ijms16048266.

[51.] H. Koku, "Aspects of the metabolism of hydrogen production by Rhodobacter sphaeroides", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 27, sy 11-12, ss. 1315-1329, Kas. 2002, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00127-1.

[52.] C. Acar, I. Dincer, ve G. F. Naterer, "Review of photocatalytic water-splitting methods for sustainable hydrogen production: Review: photocatalysis for sustainable hydrogen", *Int. J. Energy Res.*, c. 40, sy 11, ss. 1449-1473, Eyl. 2016, doi: 10.1002/er.3549.

[53.] E. G. Tunçay, T. H. Erguder, I. Eroglu, ve U. Gündüz, "Dark fermentative hydrogen production from sucrose and molasses: Combined effects of initial COD, pH, and biomass on H2 production", *Int. J. Energy Res.*, c. 41, sy 13, ss. 1891-1902, Eki. 2017, doi: 10.1002/er.3751.

[54.] I. Eroglu, E. Özgür, E. Eroglu, M. Yücel, ve U. Gündüz, "Applications of photofermentative hydrogen production", içinde *Microbial bioenergy: hydrogen production*, Springer, 2014, ss. 237-267.

[55.] E. Eroglu, I. Eroglu, U. Gündüz, ve M. Yücel, "Comparison of physicochemical characteristics and photofermentative hydrogen production potential of wastewaters produced from different olive oil mills in Western-Anatolia, Turkey", *Biomass and Bioenergy*, c. 33, sy 4, ss. 706-711, Nis. 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.11.001.

[56.] P.A.M. Claassen *vd.*, "*Non-thermal production of pure hydrogen from biomass: HYVOLUTION" içinde Hydrogen and fuel cells: fundamentals, technologies and applications ; contributions to the 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Ed: D. Stolten, Essen*, Reprint. Weinheim: Wiley-VCH, 2010, ss. 169-188.

[57.] E. Özgür *vd.*, "Potential use of thermophilic dark fermentation effluents in photofermentative hydrogen production by Rhodobacter capsulatus", *Journal of Cleaner Production*, c. 18, ss. S23-S28, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.02.020.

[58.] I. Eroglu, "Development of a 3 kW PEM Fuel Cell System", UNIDO-ICHET Project Reports Contract No: 16002179, 2012.

[59.] A. K. Avcı, D. L. Trimm, ve Z. I. Önsan, "Quantitative investigation of catalytic natural gas conversion for hydrogen fuel cell applications", *Chemical Engineering Journal*, c. 90, sy 1-2, ss. 77-87, Kas. 2002, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00069-4.

[60.] A. T-Raissi ve D. L. Block, "Hydrogen: automotive fuel of the future", *IEEE Power and Energy Magazine*, c. 2, sy 6, ss. 40-45, Kas. 2004, doi: 10.1109/MPAE.2004.1359020.

[61.] F. Dawood, M. Anda, ve G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 45, sy 7, ss. 3847-3869, Şub. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

[62.] "City Gas Handbook on Gas Supply". https://www.citygas.com.sg/wp-content/uploads/2017/12/City-Gas-Handbook-on-Gas-Supply-_22-May-2017_.pdf (erişim Şub. 01, 2021).

[63.] "The Future of Hydrogen – Analysis", *IEA*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (erişim Oca. 23, 2021).

[64.] IEA, "World Energy Outlook 2016". https://webstore.iea.org/download/direct/202 (erişim Oca. 07, 2021).

[65.] EASE/EERA Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030 | EASE: Why Energy Storage? | EASE. https://ease-storage.eu/publication/easeeera-energy-storage-technology-development-roadmap-towards-2030/ (erişim Oca. 07, 2021).

[66.] Hydrogen Pipelines | Hydrogen Tools. https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-pipelines (erişim Oca. 24, 2021).

[67.] M. W. Melaina, O. Antonia, ve M. Penev, "Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues", NREL Report, 2013.

[68.] G. Müller-Syring ve M. Henel, "Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen", *Abschlussbericht. Hg. v. DVGW Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches eV Technisch-wissenschaftlicher Verein. Bonn*, 2014.

[69.] Hydrogen Applications | Hydrogen. https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-applications (erişim Oca. 21, 2021).

[70.] P. Zakkour ve G. Cook, "CCS Roadmap for Industry: High-purity CO2 sources, Sectoral Assessment – Final Draft Report", Eyl. 2010.

[71.] A. Le Duigou, M. Miguet, ve Y. Amalric, "French hydrogen markets in 2008 – Overview and future prospects", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 36, sy 15, ss. 8822-8830, Tem. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.006.

[72.] Fueling North America's Energy Future. https://www.efmidstream.com/sites/default/files/resources/resources_fuelingnorthamericasenergyfuture.pdf (erişim Oca. 21, 2021).

[73.] U. Müller ve C. E. Mortimer, *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. Thieme, 2003.

[74.] S. A. Sherif, D. Y. Goswami, E. K. (Lee) Stefanakos, ve A. Steinfeld, Ed., *Handbook of Hydrogen Energy*, 0 bs. CRC Press, 2014.

[75.] O. Ehret ve K. Bonhoff, "Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 40, sy 15, Art. sy 15, Nis. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.176.

[76.] C. Acar, S. Ghosh, I. Dincer, ve C. Zamfirescu, "Evaluation of a new continuous type hybrid photo-electrochemical system", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 40, sy 34, ss. 11112-11124, Eyl. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.036.

[77.] M. Ozturk ve I. Dincer, "Development of renewable energy system integrated with hydrogen and natural gas subsystems for cleaner combustion", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, c. 83, s. 103583, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103583.

[78.] R. P. O'Hayre, S.-W. Cha, W. G. Colella, ve F. B. Prinz, *Fuel cell fundamentals*, Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.

[79.] I. Eroglu ve A. Bayrakçeken, "Taşınabilir ve Hareketli Uygulamalar İçin PEM Yakıt Pilleri", sy 39, ss. 26-29, TÜBA Günce Dergisi, May. 2009.

[80.] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*. London: Academic Press, 2013.

[81.] A. Bayrakceken, S. Erkan, L. Turker, ve I. Eroglu, "Effects of membrane electrode assembly components on proton exchange membrane fuel cell performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 33, sy 1, ss. 165-170, Oca. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.021.

[82.] I. Eroglu ve L. Turker, "Metalofitalosiyaninlerin sentezi ve yakıt pillerinin performansına etkileri", TÜBİTAK MİSAG Proje No. 230, Şubat 2005. Erişim: Şub. 02, 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://trdizin.gov.tr/.

[83.] I. Eroglu *vd.*, "PEM Yakıt pilleri için kompozit membranlar ve elektrokatalizörlerin geliştirilmesi ve uzun dönem performanslarının belirlenmesi", TÜBİTAK Projesi 109M221, Oca. 2013. Erişim: Şub. 02, 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://trdizin.gov.tr/

[84.] G. S. Avcioglu, B. Ficicilar, ve I. Eroglu, "Effective factors improving catalyst layers of PEM fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 43, sy 23, ss. 10779-10797, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.055.

[85.] S. Erkan ve I. Eroglu, "Ultrasonic Spray Coating Technique for High-Performance PEM Fuel Cell Electrode Manufacturing", içinde *Progress in Clean Energy, Volume 2*, I. Dincer, C. O. Colpan, O. Kizilkan, ve M. A. Ezan, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2015, ss. 481-492.

[86.] Y. Devrim, S. Erkan, N. Baç, ve I. Eroglu, "Improvement of PEMFC performance with Nafion/inorganic nano-composite membrane electrode assembly prepared by ultrasonic coating technique", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 37, sy 21, ss. 16748-16758, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.148.

[87.] I. Eroglu *vd.*, "Yüksek sıcaklıkta çalışabilen proton değişim zarlı yakıt hücresi geliştirilmesi", TÜBİTAK Projesi 104M364, ss. 1-115, Tem. 2008. Erişim: Şub. 02, 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://trdizin.gov.tr/.

[88.] Y. Devrim, H. Devrim, ve I. Eroglu, "Polybenzimidazole/SiO2 hybrid membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 41, sy 23, ss. 10044-10052, Haz. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.043.

[89.] S. Erkan ve I. Eroglu, "100 W Güç sınıfı Polimer Zarlı Yakıt Pili Yığını Geliştirilmesi ve Kısa Modül Testlerinin yapılması", program adı: 4. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi, Kocaeli, 2009.

[90.] S. Erkan, "Sodyum bor hidrür ile çalışan 100W portatif yakıt pili sistemi geliştirilmesi", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2011.

[91.] 1,5 kW PEM Yakıt Pili Projesi, EAE A.Ş, 2003.

[92.] A. Ö. Yazaydın, "H2/O2 proton değişim zarlı yakıt hücrelerinde yeni ufukların araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2003.

[93.] Y. Saygili, I. Eroglu, ve S. Kincal, "Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 40, sy 1, ss. 615-622, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.047.

[94.] Y. Saygılı, S. Kıncal, ve I. Eroglu, "Development and modeling for process control purposes in PEMs", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 40, sy 24, ss. 7886-7894, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.116.

[95.] "Hidrojen Teknolojileri Derneği E-Bülten-8". http://hidrojenteknolojileri.org/bultenler/08-2019-tr.pdf (erişim Şub. 02, 2021).

[96.] Hydrogen – Analysis, *IEA*. https://www.iea.org/reports/hydrogen (erişim Oca. 23, 2021).

[97.] Hydrogen Projects Database – Analysis, *IEA*. https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database (erişim Oca. 23, 2021).

[98.] Fuel cell EV deployment, 2017-2019, and national targets for selected countries – Charts – Data & Statistics, *IEA*. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-ev-deployment-2017-2019-and-national-targets-for-selected-countries (erişim Oca. 23, 2021).

[99.] "Scopus - Document search | Signed in". https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic (erişim Oca. 24, 2021).

[100.] "Türk Patent ve Marka Kurumu". https://www.turkpatent.gov.tr/TURKPATENT/?lang=tr (erişim Oca. 24, 2021).

[101.] "TRDizin". https://trdizin.gov.tr/search/projectSearch.xhtml (erişim Oca. 24, 2021).

[102.] "Ulusal Tez Merkezi | Anasayfa". https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp (erişim Oca. 24, 2021).

[103.] I. C. Government of Canada, "Canada Research Chairs", Kas. 29, 2012. https://www.chairs-chaires.gc.ca/program-programme/instructions-eng.aspx (erişim Oca. 21, 2021).

[104.] I. Dincer, "Importance of research, innovation and commercialisation for technological success", *IJRIC*, c. 1, sy 1, s. 8, 2017, doi: 10.1504/IJRIC.2017.082313.

TÜRKİYE İÇİN HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ YOL HARİTASI

ISBN: 978-605-66381-9-0

HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ DERNEĞİ