

# HİDROJEN GÜVENLİĞİ

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Müge Ensari ÖZAY

Arş. Gör. Dr. Tuğçe ORAL



ÜSKÜDAR  
ÜNİVERSİTESİ  
YAYINLARI - 118  
İSG SERİSİ - 8



**ÜSKÜDAR  
ÜNİVERSİTESİ  
YAYINLARI**

ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI - 118  
İSG SERİSİ - 8

**HİDROJEN GÜVENLİĞİ**

**Editörler**

Doç. Dr. Müge Ensari ÖZAY  
Arş. Gör. Dr. Tuğçe ORAL

**Kapak ve Grafik Tasarım**

Esra ULUTAŞ

**ISBN**

978-625-93668-6-9

**Yayıncılık Sertifika No**

69591

**Baskı Tarihi**

2026

**Baskı Sayısı**

1. Baskı

**İletişim Bilgileri**

www.uskudar.edu.tr – yayin@uskudar.edu.tr  
Tel: 0216 400 22 22 / Faks: 0216 4741256  
Altunizade Mah. Üniversite Sk. No: 14  
Pk: 34662 Üsküdar / İstanbul / Türkiye

Copyright © 2026

Fikir ve Sanat Eserleri Yasası gereğince bu eserin yayın hakkı anlaşmalı olarak T.C. Üsküdar Üniversitesine aittir. Her hakkı saklıdır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir. Bu kitabın hiçbir kısmı yayıncısının yazılı izni olmaksızın elektronik veya mekanik, fotokopi, kayıt ya da herhangi bir bilgi saklama, erişim sistemi ile çoğaltılamaz, dağıtılamaz ve satışa sunulamaz.

Kitapta yer alan içeriğin sorumluluğu yazarlara aittir

# HİDROJEN GÜVENLİĞİ

## **Editörler**

Doç. Dr. Müge Ensari ÖZAY

Arş. Gör. Dr. Tuğçe ORAL

# İçindekiler / Contents

---

<b>Takdim</b> .....	7
<b>Giriş</b> .....	9
<b>Hidrojen Gazının Fiziksel ve Kimyasal Tehlikeleri</b>	
Serap DUMAN .....	11
<b>Hidrojen ve Hidrojen Sistemleri için Güvenlik Standartları</b>	
Veysel Burak BUTUR.....	20
<b>Hidrojen Yakıt Hücrelerinde Sağlık ve Güvenlik; Elektrolitler</b>	
Fırat AYDIN, Emine CAN.....	50
<b>Hidrojenin Taşınması</b>	
Fazıl ÇELİK.....	70
<b>Hidrojenin Depolanması</b>	
Seçkin ÇELİK.....	87
<b>Hidrojen Ekonomisi</b>	
Elif ŞENGEL GÜÇLÜ .....	108
<b>Çalışan Sağlığı Açısından Hidrojen</b>	
Ayhan ÖZŞAHİN, Kaan ÖZŞAHİN.....	118

<b>Hidrojen Özellikleri ve Hidrojen Üretim Süreçleri ile Hidrojen Kazalarının Tarihsel İncelemesi</b>	
Ece SINMAZ .....	129
<b>Papyon (Bow Tie) Analizi İle Hidrojen Güvenliği: Tehlikeleri Önleme ve Sonuçları Azaltma Yaklaşımı</b>	
Melek TÜRK .....	144
<b>HYRAM: Hidrojen Risk Değerlendirme Modeli</b>	
Nafiseh FARAJİRAD.....	162
<b>Ulusal ve Uluslararası Projelerde Hidrojen Enerjisi</b>	
Gamze İZ.....	187
<b>Sürdürülebilir Geleceğin Enerji Vizyonu: Hidrojen</b>	
Serap DUMAN, Rüştü UÇAN .....	205
<b>Bir Emaye Kaplama Tesisinde Hidrojen Gazı Patlaması: İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Yönünden Olgu Değerlendirmesi</b>	
Mustafa Cüneyt GEZEN, Rüştü UÇAN .....	213

# Takdim

---

Hidrojen, bilimsel dünyada uzun süredir tanınan bir element olmakla birlikte, özellikle son yıllarda adı daha çok umutla, heyecanla ve beraberinde bazı soru işaretleriyle anılmaya başlanmıştır. Geleceğin temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında yer alan hidrojen, sahip olduğu yüksek potansiyelin yanı sıra güvenlik açısından da çok boyutlu değerlendirme gerektiren kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Elinizdeki bu kitap, tam da bu noktada, hidrojenin güvenli kullanımına dair teknik, uygulamalı ve bilimsel bilgileri bir araya getirerek, alana katkı sunmak amacıyla hazırlanmıştır. “Hidrojen Güvenliği” başlığı altında derlenen bu çalışma, geleceğin enerji sistemlerini şekillendirmeye aday bu kaynağın insan sağlığı, çevre ve endüstri açısından güvenli yönetimine yönelik olarak yol gösterici bir kaynak olma niyetindedir.

Kitabın temelleri, 2023–2024 Bahar Dönemi’nde Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı kapsamında yürütülen ISG604 – Yangın Önleme Sistemleri ve Teknolojileri dersi çerçevesinde, öğrencilerimize verilen kitap bölümü ödevi ile atılmıştır. Öğrencilerimizin bilimsel özenle kaleme aldığı bu çalışmalar, yalnızca bir dersin gerekliliklerini yerine getirmekle sınırlı kalmamış; aynı zamanda literatüre katkı sunabilecek nitelikte özgün içerikler üretmiştir. Sürece öğretim üyelerimizin uzmanlık ve akademik deneyimlerini katmasıyla birlikte, farklı disiplinlerin bakış açılarını bir araya getiren, kapsamlı ve kolektif bir eser ortaya çıkmıştır.

Hazırlık sürecinde 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) başta olmak üzere tüm yasal düzenlemelere ve akademik etik ilkelere azami özen gösterilmiştir. Kitapta yer alan tüm bölümler için yazarlardan telif hakkı onayı alınmış; gerekli onayı temin edilemeyen çalışmalar ise mevzuat gereği kitaba dahil edilmemiştir.

Editörleri olarak görev almaktan büyük bir heyecan ve sorumluluk duyduğumuz bu eserde emeği geçen tüm yazarlarımıza, öğrencilerimize ve katkı sunan değerli öğretim üyelerimize, gönülden teşekkür ederiz.

Dileğimiz, bu çalışmanın yalnızca akademik bir kaynak olmanın ötesinde, hidrojen güvenliği alanında çalışanlara ilham veren, yeni soruların sorulmasına ve yenilikçi çözümlerin gelişmesine vesile olan bir eser olmasıdır.

Keyifle ve ilhamla okumanız dileğiyle...

Saygılarımızla,

**Dr. Tuğçe Oral**

**Doç. Dr. Müge Ensari Özay**

*Editörler*

# Giriş

---

Dünya enerji sistemleri, iklim değişikliği ile mücadele, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda köklü bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Bu süreçte, alternatif ve temiz enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmakta; hidrojen ise yüksek enerji yoğunluğu, çevre dostu yapısı ve farklı sektörlerdeki geniş kullanım alanları ile öne çıkmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen “yeşil hidrojen”, küresel ölçekte geleceğin enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte hidrojenin avantajları kadar, taşıdığı güvenlik riskleri de dikkatle ele alınması gerekmektedir. Düşük tutuşma enerjisi, geniş parlama aralığı, sızıntıya eğilimli yapısı ve görünmez alev sahip olması gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri, hidrojenin üretiminden taşınmasına, depolanmasından kullanımına kadar tüm aşamalarda güvenlik önlemlerinin titizlikle uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle “Hidrojen Güvenliği”, yalnızca teknik bir konu değil; aynı zamanda toplumsal kabul, yasal düzenlemeler ve sürdürülebilir enerji altyapılarının geliştirilmesi açısından da stratejik öneme sahip bir konu olmaktadır.

Bu kitapta hidrojen güvenliğini kapsamlı olarak fiziksel ve kimyasal tehlikeleri, sistem güvenlik standartları, yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitlerin sağlık riskleri, taşınması ve depolanması süreçlerindeki güvenlik parametreleri bilimsel ve uygulamalı bir yaklaşımla ele alınmıştır. Ayrıca, hidrojen ekonomisinin gelişimi, iş sağlığı ve güvenliği açısından etkileri, alınabilecek referans önlemler, geçmişte yaşanan hidrojen kazalarının tarihsel

analizi ve çıkarılan dersler detaylı biçimde sunulmuş, ulusal ve uluslararası hidrojen projelerine yer verilerek hidrojenin enerji dönüşümündeki rolü sürdürülebilir gelecek vizyonu çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Bölümler hem literatür bilgisi hem de sektörel deneyimlerle desteklenmiş olup, okuyucuya çok boyutlu bir perspektif kazandırmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda elinizdeki eser hem akademik bir kaynak hem de uygulama rehberi niteliğinde olup, hidrojenin güvenli kullanımını teşvik eden bilgi temelli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

# HİDROJEN GAZININ FİZİKSEL VE KİMYASAL TEHLİKELERİ

**Serap DUMAN**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-6243-9970

## GİRİŞ

Hidrojen periyodik tablodaki ilk element olup en hafif olanıdır. Birçok gezegen ve yıldız hidrojenden oluşmuş olup bazıları da güneşte olduğu gibi çok fazla sayıda hidrojen içermektedir (Veziroğlu, 2004). Hidrojen gazı ( $H_2$ ), güneş ve rüzgar gibi enerji sektöründe yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş ve rüzgar kaynaklarının doğası gereği sürekli olarak enerji üretmezler. Güneş panelleri, gündüzleri güneş ışığını kullanarak elektrik üretirken, gece veya bulutlu günlerde üretimleri azalabilir veya durabilir. Benzer şekilde rüzgar türbinleri de rüzgarın varlığına ve şiddetine bağlı olarak elektrik üretirler (Veziroğlu, Bockirs ve Smith, 2001). Bu durumlar, bu enerji kaynaklarının aralıklı (yani sürekli olmayan) olduğunu ve elektrik talebinin sürekli olduğu bir ortamda bu kaynakların güvenilir enerji sağlamak için depolama sistemlerine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Depolama sistemleri, bu aralıklı enerji üretimini düzenler ve istikrarlı bir elektrik arzı sağlamak için enerjiyi depo eder ve talep anında serbest bırakır. Bu nedenle, hidrojen gazı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte depolama sistemleri kullanımı, enerji güvenliği ve sürekliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Hidrojen gazının fiziksel, kimyasal ve psikolojik tehlikeleri ile güvenli taşıma, depolama ve kullanımı ile ilgili dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır (Ball, Weeda ve Veziroğlu, 2016). Hidrojen endüstrisi, gelecekte temiz enerji kullanımının umut verici bir adayı olarak görülmektedir. Ancak

bu potansiyeli tam olarak gerçekleştirebilmek için güvenlik konularının etkili bir şekilde ele alınması ve çözülmesi gerekmektedir. Tehlikenin önlenmesi ve azaltılması ve tehlike oluştuğunda tehlikeyle başa çıkmanın başarısı da dahil olmak üzere hidrojen güvenliği, toplumda hidrojenin sosyal kabulünü artırmak için temel bir konudur. Hidrojenin tehlikeleri; fiziksel olarak kırılabilirlik, arızalar ve faz değişimi, ve kimyasal olarak ise yangın, patlama şeklindedir (Najjar, 2013). Hidrojen güvenliğindeki zorluk, sızıntıya karşı hassasiyet, düşük tutuşma enerjisi ve yanma, kaldırma kuvveti ve kırılabilirlik için çok çeşitli yakıt-oksijen oranları gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Ramamurthi, K., Bhadraiah, K. ve Murthy, SS., 2009). Hidrojenin güvenliği, kabul görmesi ve başarıyla uygulanması için hükümetler, endüstri liderleri ve araştırma enstitüleri arasında sağlam bir iş birliği gereklidir. Hidrojenin temiz bir enerji taşıyıcısı olarak kullanımı, çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır ve bu zorlukların üstesinden gelmek için entegre bir yaklaşım benimsenmelidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte, üretim, depolama, taşıma ve kullanım süreçlerinde güvenlik standartlarının yükseltilmesi önem arz etmektedir. Hidrojenin potansiyeli, sürdürülebilir enerji dönüşümü ve iklim değişikliğiyle mücadele çabalarında önemli bir rol oynayabilir. Ancak bu potansiyelin gerçekleştirilmesi, güvenlik, çevresel etkiler ve ekonomik sürdürülebilirlik gibi faktörlerin dikkate alınmasını gerektirir. Bu nedenle, tüm paydaşların katılımıyla yapılan kapsamlı bir iş birliği, hidrojenin başarılı bir enerji taşıyıcısı olarak yaygın olarak benimsenmesini sağlayabilir. Bu bölümde, hidrojen gazının çeşitli tehlikeleri ele alınacak ve bu tehlikelerin nasıl yönetilebileceği tartışılacaktır (Veziroğlu, 2005).

## **1. HİDROJEN GAZININ KULLANIMI VE DEPOLANMASI SIRASINDA KARŞILAŞILABİLECEK TEMEL TEHLİKELER**

Hidrojenin kullanımı veya depolanması sırasında karşılaşılabilecek temel tehlikeler çeşitli fiziksel, kimyasal ve çevresel riskler barındırır. Bu tehlikelerin başında patlama riski gelir; zira hidrojen gazı, havadan daha hafif olduğu için sıkıştırılmış veya sıvı haldeyken yüksek enerji kaynağı olarak potansiyel bir patlama tehlikesi oluşturabilir. Ayrıca hidrojenin geniş yanma aralığı ve yüksek yanma hızı, patlama riskini artırır. (Molkov, 2012). Yangın tehlikesi de hidrojenin yanıcı özelliğinden kaynaklanır. Özellikle sıkıştırılmış veya sıvı haldeki hidrojenin yanması sonucunda ciddi yangınlar meydana gelebilir. Hidrojen gazının yanması, atmosfere zararlı gazların salınımına neden olabilir ve bu da çevresel etkilere yol açabilir (Tsai, Cai, Pan ve Jiang, 2023). Hidrojen gazının solunması durumunda zehirlenme tehlikesi vardır. Hidrojenin yanması sonucu ortaya çıkan yan ürünler de solunum yoluyla zehirlenmelere neden olabilir. Bu durum, özellikle kapalı alanlarda veya havalandırmanın yetersiz olduğu durumlarda daha tehlikeli olabilir (Aziz, 2021). Patlama veya yanma sonucu oluşan basınç dalgaları da önemli bir tehlikedir. Hidrojenin ani bir şekilde yanması veya patlaması sonucu ortaya çıkan basınç dalgaları,

yapısal hasara ve çevresel etkilere yol açabilir. Bu durum, özellikle tesislerdeki ekipmanların güvenliğini ve dayanıklılığını etkileyebilir. Hidrojen gazının statik elektrikle kolayca tutuşturulabilme özelliği de dikkate alınması gereken bir tehlikedir. Bu nedenle hidrojenin kullanıldığı alanlarda statik elektriğin kontrolü ve güvenli bir şekilde boşaltılması önemlidir. Bu nedenle her bir uygulama için özgün risk analizleri yapılmalı, uygun güvenlik önlemleri alınmalı ve güvenlik standartlarına uygun hareket edilmelidir. Hidrojenin potansiyel tehlikelerinin farkında olmak ve bu tehlikeleri etkili bir şekilde yönetmek, güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için temel bir gerekliliktir. Hidrojen gazı, temiz enerji geleceği için büyük bir potansiyele sahiptir, ancak taşıma, depolama ve kullanım sırasında çeşitli fiziksel, kimyasal ve psikolojik tehlikelerle karşı karşıya kalınabilir. Bu tehlikelerin etkin bir şekilde yönetilmesi, güvenli bir hidrojen ekonomisi için kritik öneme sahiptir. Uygun eğitim, güvenlik önlemleri ve psikolojik destek, bu tehlikeleri minimize etmeye yardımcı olacaktır. İlk olarak fiziksel tehlikelerinden bahsedecek olursak; hidrojen gazının oldukça yanıcı ve hava ile geniş bir patlama aralığına sahip olduğunu belirtmeliyiz (%4-75). Küçük bir kıvılcım veya ısı kaynağı bile patlamaya yol açabilir. Hidrojen gazı genel olarak yüksek basınçta taşınır ve depolanır. Hidrojen depolamadaki en iyi yöntem basınçlı gaz olarak depolama şeklindedir (Rivard vd., 2019). Tank tipi ve ağırlığı olmak üzere iki parametreye bağlı olmak kaydıyla ağırlık yüzdesi 7 olacak şekilde hidrojen depolanabilir (Dinçer, 2016). Bu durum, tankların veya silindirlerin patlaması durumunda ciddi fiziksel hasara neden olabilir. İkinci olarak; kriyojenik tehlikeler gelmektedir. Kriyojenik terimi çok düşük sıcaklıklarda yapılan üretim ve işlemlere denmektedir. Sıvı hidrojen, çok düşük sıcaklıklarda (-253°C) depolanır ve kullanılır (Dicks ve Rand, 2018). Bu da donma ve soğuk yanıkları riskini artırır. Bunun yanı sıra kriyojenik sıvılarla temas eden malzemeler kırılgan hale gelebilir ve çatlayabilir. Üçüncü olarak kimyasal tehlikeler gelmektedir. Hidrojen, bazı metallerle etkileşime girerek bu metallerin kırılgan hale gelmesine neden olabilir. Bu durum, depolama tankları ve boruların beklenmedik şekilde çatlamasına veya kırılmasına yol açabilir. Ayrıca kimyasal tepkimeler ile ilgili tehlikeli durumlar da söz konusu olabilmektedir. Hidrojen, klor gibi belirli kimyasallarla tepkimeye girebilir ve bu tür tepkimeler patlamalara neden olabilir. Son olarak iş güvenliği açısından baktığımızda psikolojik olarak da bazı tehlikeler içerdiğini belirtmeliyiz. Hidrojen gazının yüksek yanıcılık ve patlayıcılık potansiyeli, çalışanlar arasında sürekli bir tehlike algısına yol açabilir. Bu durum, yüksek seviyede kaygı ve stres yaratabilir. Hidrojenin görünmez ve kokusuz olması, sızma ve patlama endişesini artırabilir. Çalışanlar, sürekli olarak olası kaçakları ve patlamaları düşünerek yüksek stres altında çalışabilirler. Hidrojen gazıyla çalışırken sürekli dikkatli olmak gerekliliği, çalışanların mental olarak yorulmasına neden olabilir. Bu durum, zamanla dikkat dağınıklığına ve performans düşüşüne yol açabilir. Hidrojenle ilgili sızıntı, yangın, patlama gibi acil durumlar sırasında çalışanlar korku ve panik yaşayabilirler. Bu durum, doğru ve hızlı tepki

verilmesini zorlaştırabilir ve daha büyük kazalara yol açabilir (Wang vd., 2021). Genel olarak hidrojen endüstrisi, temiz enerji geleceğine giden umut verici bir yolu temsil ediyor ancak tehlikeleri ve güvenlik konularının etkili bir şekilde ele alınması, endüstrinin geniş çapta kabul görmesi ve başarısı için kritik öneme sahip. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve hidrojenin temiz bir enerji taşıyıcısı olarak tam potansiyelini ortaya çıkarmak için hükümetler, endüstri ve araştırma enstitüleri arasındaki iş birliği çok önemlidir. Hidrojen, düşük ateşleme enerjisi özelliğine sahip olup hidrokarbonlardan daha az yanıcı bir gazdır. Ancak özel kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı yüksek reaktiviteye sahiptir. Bu özellikleri, kaynama eğilimi, güvenlik endişeleri ve ekonomik kayıplarla ilişkilendirilebilir. Yanıcılık sınırları geniştir (%4 ila 75 arası havada), bu da farklı ATEX kategorilerine işaret eder. Büyük ölçekli sistemlerde parlamadan patlamaya geçiş kolayca gerçekleşebilir. Yanma hızı yüksektir ve moleküler yanma hızı diğer birçok yakıttan önemli ölçüde daha hızlıdır. Hidrojen, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır ve katkı maddeleri kolayca eklenemez. Malzemelerle yüksek etkileşim gösterir, bu da malzeme seçimi ve incelemesi için büyük yatırımlar gerektirebilir. Düşük gaz yoğunluğu ve yayılma eğilimi nedeniyle kapalı alanlarda özel davranışlar sergileyebilir ve üst kısımlarda katmanlaşabilir (Bridges ve Williams, 1997). Saydığımız bu tehlikelere karşı alınabilecek çeşitli önlem ve tedbirler bulunmaktadır. Örneğin çalışanların hidrojen gazı ile ilgili tehlikeler konusunda farkındalıklarının artması için düzenli olarak tehlikeleri ve güvenlik önlemleri hakkında eğitim verilmesi ve acil durum prosedürlerinin sık sık gözden geçirilerek tatbikatlar tatbikatların yapılması gerekmektedir. Hidrojen gazı ile çalışırken uygun kişisel koruyucu ekipmanların (KKE) kullanılması, sızıntı algılama ve yangın söndürme sistemlerinin etkin bir şekilde çalıştığından emin olunması gerekmektedir. Çalışanlara psikolojik destek sağlanması ve stres yönetimi konularında rehberlik edilmesi, iş yerinde psikolojik danışmanlık hizmetlerinin sunulması da önemli ve gereklidir. Ayrıca bazı teknik önlemler de alınmalıdır. Örneğin; hidrojenin depolama ve taşıma tanklarının düzenli olarak bakımlarının yapılması, hidrojen gevreklemesine dayanıklı malzemeler kullanılması, yeterli havalandırmanın sağlanması ve potansiyel kaçağın hızla tespit edilmesi gerekmektedir. Hidrojenin üretim, depolama, taşıma ve kullanım süreçlerinde güvenlik önlemlerinin hayati önem taşımaktadır. Hidrojen tesislerinin hidrojen salınımını önlemek, tespit etmek ve azaltmak amacıyla özel olarak tasarlanması gerekir. Bu bağlamda, gaz algılama sistemleri ve acil kapatma gibi güvenlik sistemlerinin tüm hidrojen tesislerine entegre edilmesi gerekmektedir. Çalışanlara güvenlik eğitimi ve protokolleri sağlanmasıyla, hidrojenin güvenli kullanımı ve risklerin minimize edilmesi mümkün olabilir. Hidrojenin enerji değer zincirinde kritik bir rol oynar ve bu nedenle hidrojen ekonomisinin gelişimini temel bir ilke olarak ele alındığında; klasik hidrojen karesi modeli, üretim, depolama, kullanım ve güvenlik gibi temel unsurları içeren bir çerçeve olarak önerilmektedir. Güvenliğin öncelikli bir öneme sahiptir ve bu nedenle diğer tüm sektörlerin merkezinde yer alması gerektiği

düşünülmektedir. Sonuç olarak, güvenlik, hidrojen teknolojilerinin tümünde sağlanması gereken temel bir unsurdur ve sürekli olarak üzerinde çalışılması gereken bir etkinlik olarak öne çıkmaktadır.

## **2. HİDROJEN GAZI KAYNAKLI TEHLİKELERİ DEĞERLENDİRMEK VE ÖNLEMELER İÇİN BAZI YÖNTEMLER**

İlk adım her zaman potansiyel tehlikeleri tanımlamaktır. Hidrojen gazının depolanması, taşınması ve kullanımı sırasında olası fiziksel tehlikeleri belirlemek için detaylı bir tehlike tanımlama süreci yararlı olacaktır. İkinci olarak proses güvenliğini yönetmek çok önemlidir. İşletmeler, hidrojen gazı gibi potansiyel olarak tehlikeli maddelerle çalışırken güvenlik yönetim sistemlerini uygulamalıdır. Bu sistemler, fiziksel tehlikeleri azaltmak için kapsamlı prosedürler, eğitimler ve denetimler sağlar. Bununla beraber ekipman ve tesis tasarımı da çok önemlidir. Hidrojen gazı kullanılan ekipmanların ve tesislerin tasarımı, fiziksel tehlikeleri en aza indirecek şekilde yapılmalıdır. Örneğin, gaz sızıntılarını önlemek için sızdırmazlık özellikleri olan ekipmanlar kullanılabilir. Ayrıca güvenlik ile ilgili sistemleri de hidrojen gazının kullanıldığı proseslerde tehlikeli durumlarını izlemek ve otomatik olarak bu durumları sınırlamak için kullanılmalıdır. Bu sistemler, olası patlama veya yangın gibi fiziksel tehlikelerin etkilerini azaltabilir. Son olarak acil durum planları, hidrojen gazı kullanımı sırasında olası kazalar için hazırlıklı olmayı sağlar. Yangın, patlama gibi fiziksel tehlikelere karşı etkili müdahale stratejileri belirlenmelidir. Bu yöntemler hidrojen gazının fiziksel tehlikelerini azaltmak ve olası kazaları önlemek için uygulanabilir. Her bir yöntem farklı bir açıdan yaklaşarak güvenliği artırmak için katkı sağlar.

Özellikle endüstriyel ortamlarda yöntemlerin entegre edilmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından kritik önem taşır. Hidrojen gazının yaratabileceği tehlikeleri değerlendirmek için kullanılan bazı risk analizi yöntemleri şunlardır:

### **2.1. HAZOP (Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi)**

Tehlike ve işletilebilirlik demektir. Bu analizde sistematik bir risk değerlendirmesi yapılabilmektedir. Süreç ekipmanlarının ve operasyonlarının tehlikeleri ve işletilebilirlik sorunları, sistemli bir şekilde incelenir. Hidrojen üretiminde, depolama ve taşıma süreçlerinin her bir aşamasında HAZOP çalışmaları yapılabilir. Ekipman arızaları, sızmalar ve operasyonel hatalar gibi potansiyel tehlikeler tanımlanır ve analiz edilir. Tehlikeler erken aşamada belirlenerek uygun önleyici tedbirlerin alınabilir. (Kletz ve Hazan, 1992).

### **2.2. FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi)**

Hata türü ve etkileri analizi demek olan FMEA, bir sistemdeki potansiyel arıza modlarını ve bu arızaların etkilerini değerlendiren bir analiz yöntemidir (Taylor ve Francis, 1996). Hidrojen gazı depolama tankları, basınçlı silindirler ve taşıma araçları gibi bileşenler için FMEA çalışmaları yapılabilir. Olası arıza

modları tanımlanır ve her bir arıza modunun etkileri ve ciddiyeti değerlendirilir. Hangi arızaların daha yüksek risk taşıdığını ve öncelikli olarak ele alınması gerektiğini bu analiz yöntemiyle belirlenebilir. (Taylor ve Francis, 1996).

### **2.3. QRA (Kantitatif Risk Değerlendirmesi)**

Kantitatif risk değerlendirme olan QRA, tehlikelerin olasılıklarını ve sonuçlarını nicel olarak değerlendiren bir yöntemdir. İstatistiksel veriler ve matematiksel modeller kullanılarak riskler hesaplanır. Hidrojen sızıntıları, patlamalar ve yangınlar gibi senaryolar için QRA çalışmaları yapılabilir. Bu senaryoların olasılıkları ve sonuçları değerlendirilir ve risk yönetimi stratejilerinin etkinliğini ölçer (Kaplan ve Garrick, 1981).

### **2.4. Papyon Analizi**

Diğer bir analiz yöntemi olan papyon analizi yani Papyon (Bowtie) analizi, risklerin ve kontrol önlemlerinin görsel olarak temsil edilmesini sağlamaktadır (Ruijter ve Guldenmund, 2016). Tehlikeler, önleyici ve düzeltici tedbirler ile birlikte değerlendirilir. Hidrojen depolama ve taşıma süreçlerinde potansiyel tehlikeler için bowtie diyagramları oluşturulabilir. Bu diyagramlar, tehlikelerin kaynaklarını, potansiyel sonuçlarını ve kontrol önlemlerini gösterir. Tehlikelerin ve kontrol önlemlerinin kolay anlaşılır bir şekilde görselleştirilmesini sağlamaktadır (Ruijter ve Guldenmund, 2016).

### **2.5. LOPA (Koruma Katmanları Analizi)**

Son olarak koruma katmanları analizi olan (LOPA), özellikle kantitatif değerlendirmeler, büyük endüstriyel kazaların kontrolünde ve güvenlik önlemlerinin kabul edilebilir seviyede olup olmadığının belirlenmesinde önemli rol oynadığı göz önünde bulundurulduğunda koruma katmanları analizi, bu tür tesislerde risk yönetiminde yaygın olarak kullanılan bir kantitatif risk değerlendirme metodu olarak kullanılabilir. CCPS (Center for Chemical Process Safety) tarafından 1993'te yayımlanan "Kimya Endüstrisinde Güvenli Otomasyon Rehberleri" belgesi, kimya sanayiinde güvenlik için koruyucu tabakaları içeren geniş kapsamlı bir kaynaktır (Dowell, 1997). Söz konusu önlemler otomatik veya insan hareketine bağlı olabilir. "Koruyucu tabaka" olarak adlandırılan sekiz seviyeden oluşmaktadır (Bridges, 1997).

## **3. HİDROJEN GAZI İÇİN ÖRNEK TEHLİKE SENARYOLARI**

Hidrojen için tehlike senaryolarındaki olasılığın ve etkilerinin değerlendirilmesi için örnek iki senaryo yazalım.

### **3.1. Hidrojen Depolama Tankında Kaçak**

İlk senaryomuzda hidrojen depolama tankında bir kaçak olsun, bu durumda ilk olarak bu durumun olasılığını değerlendirmeliyiz. Depolama tankında oluşabilecek bir kaçağın sebepleri, tankın yaşı, bakım durumu,

kullanılan malzeme ve çevresel etkiler gibi bir dizi faktöre bağılı olabilir. Örneğin, düzenli bakım yapılan veya yeni bir tankın kaçak olasılığı daha düşüktür. Daha sonra etkisini değerlendirmeliyiz. Kaçak hidrojen, havayla karışarak patlama veya yangın riskini artırabilir. Eğer kaçak bir bina içinde olursa, patlama ve yangın tehlikesi daha büyük olacaktır. Ayrıca, kaçak hidrojenin solunması sonucu zehirlenme riski de vardır.

### **3.2. Hidrojen Tankının Patlaması**

Farklı bir senaryo daha yazmak gerekirse örneğin hidrojen tankında bir patlama olasılığını değerlendirelim. Sıkıştırılmış hidrojen tankının patlama olasılığı, tankın tasarımı, yaşı, bakım geçmişi ve kullanım koşulları gibi faktörlere bağılı olacaktır. Örneğin, düzenli bakım yapılan ve güvenlik standartlarına uygun olarak kullanılan bir tankın patlama olasılığı daha düşüktür. Tankın patlaması durumunda ortaya çıkabilecek etkiler; patlamanın şiddeti, patlamanın meydana geldiği ortamın büyüklüğü ve çevredeki yapıların mesafesi gibi faktörlere bağılı olacaktır. Patlama sonucu oluşabilecek yangınlar ve patlama basıncının yaratabileceği hasarlar, etkilerin önemli bir kısmını oluşturacaktır. Bu örnek senaryolar, hidrojenin kullanıldığı durumlarda karşılaşılabilecek olası tehlikelerin değerlendirilmesinde temel alınabilir. Gerçek bir değerlendirme yapılırken, daha spesifik bilgilere ve verilere dayanarak daha ayrıntılı bir analiz yapılması gerekecektir. Mevcut koruyucu önlemler, hidrojenin kullanıldığı yerlerdeki güvenlik standartlarını ve uygulamalarını içerir. Örnek koruyucu önlemler şunları içerebilir; hidrojen gazı seviyelerini sürekli olarak izleyen dedektörlerin bulunması, kaçakları algılayarak erken uyarı sağlar ve patlama riskini azaltır. Yangın riski taşıyan alanlarda yangın söndürme sistemleri kullanılması çıkacak yangına hızlı ve etkili müdahaleye olanak sağlayacaktır. Özellikle hidrojenin yangınını söndürmek için özel tasarlanmış söndürücüler bulundurulmalıdır. Hidrojenin kullanıldığı alanlarda izolasyon ve havalandırma sistemleri uygun şekillerde tasarlanmalıdır. Bu sistemler, kaçak hidrojenin çevreye yayılmasını önler ve patlama riskini azaltır. Ayrıca depolama tanklarında veya basınçlı ekipmanlarda kullanılan özel sistemler, patlama basıncını azaltarak çevredeki yapıların hasarını en aza indirir. Hidrojenin güvenli kullanımı ve tehlikeleri konusunda personel eğitimi de önemlidir. Bu eğitimler, kaçakların nasıl tanınacağı, acil durum prosedürleri ve güvenli çalışma prensipleri gibi konuları kapsar. Hidrojenin kullanıldığı alanlarda patlama geçirmez bariyerler kullanılabilir. Bu bariyerler, patlama durumunda patlamanın etkilerini azaltarak çevredeki alanları korur. Bu önlemler, hidrojenin kullanıldığı yerlerde genellikle uygulanan koruyucu önlemlere örnek olarak verilebilir. Ancak her durum farklı olabilir ve uygulanacak önlemler, risk değerlendirmesi sonucunda belirlenmelidir. Bu örneklerde görüldüğü gibi her koruyucu önlemin etkinliği belirli ölçütlerle değerlendirilmelidir. Bu ölçütlerin karşılanması sağlanarak önlemlerin etkinliği artırılabilir ve güvenlik seviyesi yükseltilebilir.

## KAYNAKÇA

- Aziz, M., (2021). Sıvı Hidrojen: Sıvılaştırma, Depolama, Taşıma ve Güvenlik Üzerine Bir İnceleme. *Enerjiler*, 14, 5917.
- Ball M., Weeda M. ve N.T. Veziroğlu., (2016). *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy*, Woodhead Publishing Series in Energy (1 St Edition) Woodhead Press, Miami, FL, USA.
- Batı, M., Al-Douri, A., Hartmann, K., Buttner, W. ve Groth, KM., (2022). Hidrojen Güvenliği Veri Toplama Araçlarının Eleştirel İncelemesi ve Analizi. *Uluslararası J. Hidrojen Enerjisi*, 47, 17845–17858.
- Bertsche B., (2008) *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability* ed Springer Berlin (Heidelberg), p .492.
- Bridges, W.G. ve T.R. Williams., (1997), “Risk Acceptance Criteria and Risk Judgment Tools Applied Worldwide Within a Chemical Company,” *International Conference and Workshop on Risk Analysis in Process Safety*, CCPS/AICHE, Atlanta, GA.
- Ruijter, A., Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety Science*, 88, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>.
- Dicks A. ve Rand, DAJ., (2018). *Fuel cell systems explained*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- Dowell, A.M., (1997). Layer of protection analysis: a new PHA tool, after HAZOP, before fault tree analysis.
- Dinçer, İ. (2002). Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 265-285.
- Houf, W.; Schefer, R.; Evans, G.; Merilo, E.; Groethe, M., (2010). Hidrojenin istenmeyen salınımlarının azaltılması için bariyer duvarlarının değerlendirilmesi. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 4758–4775.
- Kletz, T.A., *Hazop ve Hazan.*, (1992). *Identifying and Assessing Process Industry Hazards*.
- Molkov, V., (2012). *Hidrojen Güvenliği Mühendisliğinin Temelleri*; Bölüm I ve Bölüm II; Avustralya Soğutma Mekanikliği Derneği: Loganholme, QLD, Avustralya.
- Muscetta, M., Portarapillo, M., Di Benedetto, A., Andreozzi, R. (2022). Sodyum Hipoklorit Üretim Sürecinin Risk Analizi: Klor Hattına Odaklanma. *Kimya Müh. J. Av.* 12, 100381.
- Najjar, YS. (2013). Hidrojen Güvenliği: Yeşil Teknolojiye Giden Yol. *Int. J. Hydrogen Energy*, 38, 10716–10728.

- Portarapillo, M., Muscetta, M., Benedetto, A.D. ve Androzzi, R., (2020). Sodyum Hipoklorit Üretim Sürecinin Risk Analizi, 82, 49–54.
- Ramamurthi, K., Bhadraiah, K. ve Murthy, SS., (2009). Hidrojen sızıntısından yanıcı hidrojen-hava bulutlarının oluşumu. *Int. J. Hydrogen Energy*, 34, 8428–8437.
- Rivard E., M. Trudeau, ve K. Zaghieb., (2019). Hydrogen storage for mobility: A review, *Materials*, 12, 1 – 22.
- Kaplan, S. ve Garrick B.J., (1981). On the Quantitative Definition of Risk, *Risk Analysis*, 1(11-28).
- Tinga T., (2013). *Principles of Loads and Failure Mechanisms: Applications in Maintenance, Reliability and Design ed Springer (London) p 307.*
- Tsai, Y., Cai, J., Pan, Y., Jiang, J., (2023). Değişen Hidrojen Depolama Senaryolarında Toluen - Metilsikloheksan Kullanılarak Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcı Sisteminin Patlama Riskinin Değerlendirilmesi. *J. Kayıp Önceki. Proses End.*, 86.
- Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y. ve Ouyang, M., (2021). Hidrojen Güvenliği Sorunlarının İncelenmesi: Olay İstatistikleri, Hidrojen Difüzyonu ve Patlama Süreci. *Uluslararası J. Hidrojen Enerjisi*, 46, 31467–31488.
- Calabrese, M., Portarapillo, Nardo, A.D., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G., Di Benedetto, A. (2024). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Production, Storage, Transport, Utilization, and CFD-Based Consequence and Risk Assessment. *Energies*, 17(6), 1350; <https://doi.org/10.3390/en17061350>.
- Veziroğlu, T.N., (2005). Dünya Barışı İçin Türkiye, Dünya Barışı İçin Hidrojen. Kaynak Yayınları, Üsküdar, İstanbul.
- Veziroğlu T.N., Bockirs J.M. ve Smith D.L., (1991). *Solar Hydrogen Energy*, Macdonald Co. Ltd., London.

# HİDROJEN VE HİDROJEN SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENLİK STANDARTLARI

**Veysel Burak BUTUR**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-2379-9762

## GİRİŞ

Hidrojen ve hidrojen sistemleri için güvenlik standartları, bu çok yönlü enerji taşıyıcısının güvenli kullanımını sağlar. Hidrojen, çeşitli özellikleriyle farklı uygulamalarda hem fırsatlar hem de zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Hidrojenin hem özelliklerini hem de ilişkili risklerini içerecek şekilde hidrojen güvenliğinin temellerini anlamak, doğru güvenlik önlemlerini geliştirmek için gereklidir (Schlapbach ve Züttel, 2001). Yasal çerçeve, güvenlik uygulamalarında uyum ve tutarlılığa katkıda bulunan uluslararası standartlar ile hidrojen güvenliğini yönetmek için kılavuzlar ve düzenlemeler oluşturmada çok önemli bir rol oynamaktadır (Yang vd., 2020). Hidrojen sistemlerine özgü teknik düzenlemeler, güvenli operasyonlar için gereklilikleri ve prosedürleri ana hatlarıyla belirleyerek güvenliği daha da artırır (Fellay, Dyson ve Laurency, 2008). Kodlar ve standartlar, hidrojenle ilgili faaliyetlerde güvenliği sağlamak için ayrıntılı kılavuzlar sunarak güvenlik uygulamalarında karşılaştırma ve iyileştirme için bir temeldir (Yang vd., 2021). Hidrojen güvenliği araştırmalarındaki ilerlemeler, gelişen bilimsel bilgi ve teknolojik yetenekleri yansıtarak güvenlik standartlarının geliştirilmesine sürekli olarak katkıda bulunmaktadır (Jaworski, Kuşaga ve Blacharski, 2020). Hidrojen güvenliğinin sağlanmasında risk analizinin pratik uygulamasını gösteren vaka çalışmaları ile nicel risk analizi metodolojilerinin uygulanması, etkili güvenlik standartlarının geliştirilmesi için çok önemlidir (Darabont vd., 2019).

Hidrojen güvenlik standartlarında gelecekteki eğilimleri ve zorlukları öngörmek, ortaya çıkan güvenlik endişelerini ve iyileştirme fırsatlarını proaktif olarak ele almak için gereklidir (Poluda, Gimishyan, Voronkova, Ignatkina ve Lebedeva, 2021).

Bu bölümde çeşitli uygulamalarda güvenliğin sağlanmasında yasal gerekliliklerin, teknik düzenlemelerin ve kodların gerekliliğini vurgulayarak hidrojen ve hidrojen sistemleri için güvenlik standartlarının önemini inceleyeceğiz. Hidrojen güvenliğinin temellerini keşfederek, mevcut yasal çerçeveyi inceleyerek, kod ve standartları değerlendirerek, hidrojen endüstrisindeki güvenlik uygulamalarına kapsamlı bir genel bakış sağlamayı amaçlıyoruz. Ayrıca, bilimsel ilerlemenin güvenlik kurallarının ve standartlarının geliştirilmesi üzerindeki etkisini vurgulayarak hidrojen güvenliği araştırmalarındaki son gelişmeleri gözden geçireceğiz. Ek olarak, hidrojenle ilgili faaliyetlerde güvenliğin sağlanmasında risk analizinin pratik uygulamasını gösteren vaka çalışmaları ile desteklenen nicel risk analizinin güvenlik standartlarının şekillendirilmesindeki önemini vurgulayacağız. Son olarak, temel bulguları özetleyerek ve hidrojen sektöründe güvenlik önlemlerinin daha da geliştirilmesi için öneriler sunulacaktır.

## 1. HİDROJEN GÜVENLİĞİNİN TEMELLERİ

Hidrojen güvenliğinin temelleri, çeşitli uygulamalarda güvenliği sağlamak için hidrojenle ilişkili özelliklerin ve risklerin anlaşılmasında çok önemlidir. Evrende en bol bulunan element olan hidrojen, onu hem çekici kılan hem de güvenli bir şekilde kullanılmasını zorlaştıran benzersiz özelliklere sahiptir (Meng, Kaxiras ve Zhang, 2007). Hidrojenin yüksek yanıcılık ve düşük tutuşma enerjisi gibi özellikleri, kullanımıyla ilişkili riskleri azaltmak için güvenlik önlemlerinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir (Properties of Hydrogen, 1979). Hidrojen depolama malzemeleri ve sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, mobil uygulamalar için çok önemlidir ve sıkı güvenlik hususları gerektirir (Schlapbach ve Züttel, 2001).

Hidrojen güvenliği araştırmalarındaki son gelişmeler sızıntı tespiti ve risk analizi için sensörler geliştirmeye odaklanmıştır. Hidrojen algılama uygulamaları için paladyum nanoparçacıkları üzerine yapılan çalışmalar, güvenlik önlemlerini artırmak için yenilikçi malzemelerin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır (Ndaya, Javahiraly ve Brioude, 2019). Nanoyapılı metal hidritler, hidrojen depolamanın iyileştirilmesinde umut vaat ettiğini göstermiş ve güvenlik standartlarının ilerletilmesinde malzeme biliminin önemini vurgulamıştır (Schneemann vd., 2018). Ayrıca, yüksek performanslı hidrojen sensörlerinin geliştirilmesi, teknolojik yenilikler yoluyla güvenliği artırmaya yönelik çalışmaların altını çizmektedir (Darmadi, Nugroho ve Langhammer, 2020).

Hidrojen sistemlerine özgü teknik düzenlemeler, güvenli operasyonların sağlanmasında hayati bir rol oynamaktadır. NFPA ve ISO standartları gibi farklı yaklaşımlar arasındaki karşılaştırmalar, hidrojenle ilgili faaliyetlerde güvenliği artırmak için bilimsel ilkelere dayalı gerekliliklerin uyumlaştırılmasının önemini göstermektedir (LaChance, Middleton, & Groth, 2012). Metal hidritlerin dinamiklerini ve faz dönüşüm mekanizmalarını anlamak, güvenli hidrojen depolama sistemleri geliştirmek için çok önemlidir (Zhou, ve diğerleri, 2022). Ayrıca, hidrojen-hava karışımlarının sayısal simülasyonları alev davranışları hakkında içgörü sağlayarak hidrojen kullanımı için güvenlik protokollerinin geliştirilmesine yardımcı olur (Wang ve Wen, 2017).

Risk analizi yöntemi belirlenirken, nicel yöntemlerin tercih edilmesi, doğru ve uygun güvenlik standartlarının ve düzenlemelerin ortaya çıkabilmesi için önemlidir. HyRAM gibi araçlar, güvenlik mühendisliği uygulamalarını geliştirmek için doğrulanmış modelleri ve verileri entegre ederek hidrojen sistemlerinin nicel risk değerlendirmesi için metodolojiler sunar (Groth ve Hecht, 2017). Ayrıca, fiber optik hidrojen sensörleri (Zhang vd., 2017) ve metal hidrit tabanlı optik sensörlerdeki gelişmeler, güvenilir güvenlik izleme sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Bannenberg vd., 2020). Kavite-zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi (Cavity-Enhanced Raman Spectroscopy-CERS) ve diğer gelişmiş analitik tekniklerin kullanımı gaz fazı analizi ve güvenlik izleme yeteneklerini daha da geliştirmektedir (Salter, Chu, ve Hippler, 2012).

Araştırma ve teknolojideki ilerlemelerle birlikte hidrojen güvenliğinin temellerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, hidrojen ve hidrojen sistemleri için güvenlik standartlarının oluşturulması ve iyileştirilmesi için gereklidir. Sektör yasal gereklilikleri, teknik düzenlemeleri ve kodları hidrojen güvenliği konusundaki en son araştırmalarla entegre ederek mevcut zorlukların üstesinden gelebilir ve daha güvenli bir hidrojen ekonomisinin önünü açabilir.

## **2. HİDROJEN GÜVENLİĞİ İÇİN YASAL DÜZENLEMELER, KODLAR VE STANDARTLAR**

Hidrojen ve hidrojen sistemlerinde güvenli bir şekilde çalışmalar gerçekleştirebilmek için hidrojen sistemlerinin güvenlik yönlerini belirleyen mevcut yasal düzenlemeleri ve uluslararası standartları incelemek çok önemlidir. Yasal çerçevenin anlaşılması, uyumluluğun sağlanması ve hidrojen endüstrisinde bir güvenlik kültürünün teşvik edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Yasal düzenlemeler, kodlar, standartlar ve kılavuzlar tablolar halinde hazırlanarak sunulmuştur. Tablolarda Molkov'un çalışmasından faydalanılmıştır (Molkov, 2022).

**Tablo 1. Yasal Düzenlemeler**

<b>Yasal Düzenleme</b>
TMD 2025, tehlikeli maddelerin demiryoluyla uluslararası taşınmasını düzenleyen ve güvenlik ile çevre korumasını artıran yeni ve kapsamlı bir yönerge ((RID), 2025).
ABD’de ICC tarafından üretilen Uluslararası Yangın Kodu (IFC) ve Uluslararası Bina Kodu (IBC) (New Design for the 2024 International Codes, 2024).
ADN, tehlikeli maddelerin iç su yolları üzerinden uluslararası taşınmasına yönelik bir Avrupa Anlaşmasıdır ve 26 Mayıs 2000’de, UNECE ve CCNR’nin ortak sponsorluğunda Cenevre’de düzenlenen bir Diplomatik Konferans sırasında kurulmuş ve 29 Şubat 2008’de yürürlüğe girmiştir (ADN, 2008).
IMDG Kodu, deniz yoluyla tehlikeli malların güvenli taşınmasını sağlamak ve deniz kirliliğini önlemek için uluslararası düzeyde rehberlik eden zorunlu bir standart (IMDG Code, 2022).
ADR, 1957’de Cenevre’de kurulmuş ve 1968’den itibaren yürürlükte olan, tehlikeli malların uluslararası karayolu taşımacılığını açıklar; 2023’teki son değişikliklerle ambalajlama ve araç özellikleri için uyumluluk gereksinimlerini detaylandırır ve tehlikeli malzeme taşımacılığı için küresel standartlarla uyum sağlar (ADR, 2025).
Motorlu araçlar ve bunların römorkları için tip onayı gerekliliklerine ve bu tür araçlara yönelik sistemlere, bileşenlere ve ayrı teknik ünitelere ilişkin 27 Kasım 2019 tarih ve (AB) 2019/2144 sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Düzenlemesi Araç yolcularının ve korunmasız yol kullanıcılarının korunması, (AB) 2018/858 sayılı Düzenlemesi üzerinden revize edilmiştir (Regulation (EU) 2019/2144, 2024)
Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu’nun 134 No’lu Yönetmeliği, hidrojen yakıtlı araçların güvenlikle ilgili performansı açısından motorlu taşıtların ve bileşenlerinin onayına dair düzenlemeler (Regulation No 134 of the UN/ECE, 2019).
Avrupa Parlamentosu ve Komisyonu Düzenleme (EC) No. 661/2009’un Ek IV’ünü ve Avrupa Parlamentosu’nun 2007/46/EC Düzenlemesi Ek I, III ve IV’ü değiştiren 3 Nisan 2019 tarihli (AB) 2019/543 Sayılı Komisyon Düzenlemesi ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu’nun motorlu taşıtların tip onayına ilişkin belirli Düzenlemelere yapılan atıfların güncellenmesi ve bunlara dahil edilmesi konusunda Konsey’in görüşleri (Commission Regulation (EU) 2019/543, 2019).

**Tablo 1. Yasal Düzenlemeler (devamı)**

<b>Yasal Düzenleme</b>
Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 2018/858 Sayılı Düzenlemesi (AB) Motorlu araçların ve römorklarının ve bu araçlara yönelik sistemlerin, aksamaların ve ayrı teknik ünitelerin onayı ve piyasa gözetimine ilişkin 30 Mayıs 2018 itibariyle (AT) 715/2007 ve (AT) 595/2009 sayılı Düzenlemeleri tadil eden ve 2007/46/AT sayılı Direktifi ilga eden (Regulation (EU) 2018/858, 2018).
Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından 9 Mart 2016'da kabul edilen 2016/426 sayılı Yönetmelik, gaz yakıtlı cihazlar ve ana işlevi ısıtma olan yakıt hücrelerini kapsayan güvenlik ve pazar denetimi kurallarını içerir (Regulation (EU) 2016/426, 2016).
AB 2016/425 sayılı düzenlemede kişisel koruyucu ekipmanların tasarım ve üretiminde kullanıcı sağlık ve güvenliği ile bu ekipmanların serbest dolaşımını düzenlemek için usul ve esaslar yer alır (Regulation (EU) 2016/425, 2016).
AB'nin 2014/35 sayılı Yönetmeliği, belirli voltaj sınırları içinde kullanılmak üzere tasarlanmış elektrikli ekipmanların piyasaya sürülmesiyle ilgili üye devletlerin yasalarının uyumlaştırılmasını sağlar ve tüketiciler için yüksek düzeyde güvenlik sunar (Directive 2014/35/EU, 2014).
ATEX Yönetmeliği 2014/34/EU, potansiyel olarak patlayıcı ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmış ekipman ve koruyucu sistemler için AB üye devletleri arasında düzenlemeleri standartlaştırır ve temel sağlık ve güvenlik gereksinimlerine uyumu sağlar (ATEX, 2014).
Elektromanyetik Uyumluluk Direktifi (EMC) 2014/30/EU (EMC Directive, 2014).
Hidrojenle çalışan motorlu araçların tip onayına ilişkin Avrupa Parlamentosu ve Konseyin (EC) 79/2009 Sayılı Düzenleme'sini uygulayan 26 Nisan 2010 tarih ve 406/2010 Sayılı Komisyon Düzenlemesi (Commission Regulation (EU) No 406/2010, 2010).
Taşınabilir Basıncılı Ekipman düzenlemesi 2010/35/AB, tehlikeli maddelerin taşınmasında kullanılan basınçlı ekipmanların güvenliğini artırma ve Avrupa içinde serbest dolaşımını kolaylaştırma amacıyla ADR standartlarına dayanarak oluşturulmuş bir AB düzenlemesidir (Directive 2010/35/EU, 2010).
Tehlikeli Maddeler Direktifi: 67/548/EEC (Commission Directive 2009/2/EC, 2009).

**Tablo 1. Yasal Düzenlemeler (devamı)**

<b>Yasal Düzenleme</b>
Entegre kirlilik önleme ve kontrol Direktifi (IPPC) 2008/1/EC (IPPC Directive, 2008).
Makine Direktifi (MD) 2006/42/EC (Machinery Directive (MD), 2006).
Dökme Halde Sıvılaştırılmış Gaz Taşıyan Gemilerin İnşası ve Ekipmanına İlişkin IMO Uluslararası Kodu (IGC Kodu) (IGC Code, 1986).
Avrupa'da yukarıdaki üç maddede belirtilen uluslararası anlaşmalarla (ADR, RID ve ADN) düzenlenen tehlikeli malların taşınması, Tehlikeli Malların Ülke İçi Taşımacılığı Direktifi, 2008/68/EC kapsamında AB'deki ulusal taşımayı da kapsayacak şekilde genişletilmiştir (Inland Transport of Dangerous Goods, 2008).
Birleşmiş Milletler'in Tehlikeli Malların Nakliyesi için sunduğu Model Düzenlemelerde yer alan tavsiyelere, hidrojen özelinde bakıldığında; Sıkıştırılmış Hidrojen için UN 1049 , Soğutulmuş Sıvı Hidrojen için UN 1066 ve Metal Hidrit Depolama Sistemlerinde kullanılan hidrojen için ise UN 3468 numaralarını içermektedir (Model Regulations on the Transport of Dangerous Goods, 2023).
Basınçlı Ekipman Direktifi (PED) 2014/68/AB (Pressure Equipment Directive, 2014).
Basit Basınçlı Kaplar Direktifi (SPVD) 2014/29/AB (Simple Pressure Vessels Directive, 2014).
Patlayıcı atmosferler nedeniyle potansiyel olarak risk altında olan çalışanların güvenlik ve sağlık korumalarının iyileştirilmesine yönelik minimum gerekliliklere ilişkin 16 Aralık 1999 tarih ve 1999/92/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi ATEX 137 (ATEX 137, 1999).
Seveso Direktifleri, Endüstriyel Güvenliğe Geçiş (Industrial safety, 2012).
İşyerinde çalışanların sağlığı ve güvenliğinin iyileştirilmesini teşvik edecek önlemlerin getirilmesine ilişkin 12 Haziran 1989 tarih ve 89/391/EEC sayılı Konsey Direktifi (Directive - 89/391, 1989).

Uluslararası Standardizasyon Örgütü'nün (ISO) dört teknik komitesi (TC) hidrojen ve yakıt hücresi teknolojileri, sistemleri ve altyapısı ile ilgili standartlar oluşturmaktadır.

ISO/TC 197 komitesi "Hidrojen Teknolojileri" ile ilgili standartları yayınlamıştır (Tablo 2).

**Tablo 2. Uluslararası Standart Örgütü ISO/TC 197'nin hidrojen teknolojileri standartları**

ISO KODU	Standartın Açıklaması
ISO 13984:1999	Kara taşıtlarında sıvı hidrojen yakıt ikmal arayüzlerine ilişkin özellikleri belirler ve yakıt ikmal sırasında yangın ve patlama risklerini en aza indirgeyerek can ve mal güvenliğini sağlamayı amaçlar (International Organization for Standardization, 1999).
ISO 13985:2006	Kara taşıtları için sıvı hidrojen yakıt tanklarının tasarımı ve testi ile ilgili güvenlik kuralları, yangın ve patlamalara karşı güvenliği (International Organization for Standardization, 2006).
ISO 16110-1:2007	Yakıt işleme teknolojilerini kullanan hidrojen jeneratörleri için güvenlik gerekliliklerini belirler, 400 m <sup>3</sup> /saat kapasitenin altındaki sistemlerin çeşitli uygulamalar için uygun, hidrojen açısından zengin bir çıktı üretmesini sağlarken önemli tehlikeleri ele alır (International Organization for Standardization, 2007).
ISO 16110-2:2010	Yakıt işleme teknolojilerini kullanan hidrojen jeneratörlerinin performansını değerlendirmek için bir çerçeve sunarak, 400 m <sup>3</sup> /saat kapasitenin altındaki sistemlerin çeşitli hidrojen tüketen cihazlar için güvenlik ve kullanım gereksinimlerini karşılayan hidrojen zengini bir çıktı sağlamasını garanti eden test yöntemleri içerir (International Organization for Standardization, 2010).
ISO 16111:2018	Taşınabilir hidrojen gazı depolama sistemleri olan metal hidrit montajları için malzeme, tasarım, inşaat ve test kriterlerini belirtir; bu sistemler en fazla 150 litre iç hacme ve 25 MPa'ya kadar maksimum geliştirilmiş basınca sahiptir (International Organization for Standardization, 2018).
ISO 26142:2010	Sabit uygulamalar için hidrojen deteksiyon cihazlarının performans kriterlerini ve test metodolojilerini, hidrojen seviyelerini izlemede güvenliği sağlamak için hassasiyet, tepki süresi ve güvenilirlik üzerine odaklanarak belirler (International Organization for Standardization, 2010).
ISO 17268:2020	Gazlı hidrojen kara taşıtlarında kullanılan yakıt ikmal bağlantı elemanlarının bileşenlerini ve işletme özelliklerini standartlaştırarak, hidrojen yakıt sistemlerinde güvenlik ve verimliliği temin eder (International Organization for Standardization, 2020).
ISO 19880-1:2020	Hafif hizmet yolu taşıtlarına (örneğin, yakıt hücreli elektrikli araçlar gibi) gaz halinde hidrojen sağlayan kamu ve özel yakıt istasyonlarının güvenliği ve uygun olduğunda performansı için asgari tasarım, kurulum, devreye alma, işletme, denetim ve bakım gerekliliklerini belirler (International Organization for Standardization, 2020).

**Tablo 2. Uluslararası Standart Örgütü ISO/TC 197'nin Hidrojen Teknolojileri Standartları (devamı)**

ISO KODU	Standartın Açıklaması
ISO 19880-3:2018	Hafif hizmet araçları için güvenlik ve verimliliği garanti altına alacak şekilde, hidrojen dağıtım istasyonlarının tasarımı, kurulumu, etkinleştirilmesi, işletilmesi, denetlenmesi ve sürdürülmesi için temel kriterleri açıklar (International Organization for Standardization, 2018).
ISO 19880-5:2019	Hidrojen yakıt hücreleriyle çalışan araçlar için güvenlik ve operasyonel verimliliği en üst düzeye çıkarmaya odaklanarak, gazlı hidrojen istasyonlarının sistematik yönetimi, işletme protokolleri ve bakım uygulamaları için kapsamlı bir çerçeve sunar (International Organization for Standardization, 2019).
ISO 19880-8:2024	Yakıt hücreli araçlar için hidrojen ikmal bileşenleri ve sistemlerinin kalite kontrolünü, güvenlik önlemlerini ve performans iyileştirmesini sağlama protokollerini tanımlar (International Organization for Standardization, 2024).
ISO 19881:2018	Hidrojenle çalışan araçların yakıt dolm süreçlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini özellikle hedef alarak, hidrojen tedarik sistemlerinin kullanıma sunulması, operasyonel yönetimi ve güvenlik protokollerine ilişkin rehber ilkeleri belirler (International Organization for Standardization, 2018).
ISO 19882:2018	Hidrojen yakıtlı taşıt araçları için yakıt ikmal altyapısının verimliliğini ve güvenliğini artırmayı hedefleyen, hidrojen ikmal sistemleri için işletme kriterlerini ve güvenlik yönergelerini belirtir (International Organization for Standardization, 2018).
ISO 14687:2019	Taşıma uygulamalarında proton değişim membranı yakıt hücrelerinde kullanılmak üzere tasarlanmış hidrojen yakıtı için saflık özelliklerini ve kalite güvence önlemlerini ayrıntılı bir şekilde açıklar (International Organization for Standardization, 2019).
ISO 22734:2019	Taşımacılık sektöründe çeşitli yakıt hücresi uygulamalarında uyumluluk ve güvenliği sağlamada hidrojen yakıtının üretim, depolama ve dağıtım gereklerini detaylandırır (International Organization for Standardization, 2019).
ISO/TR 15916:2015	Teknik belge, hidrojenin çeşitli formlarının kullanımı, depolanması, taşınması ve işlenmesi hakkında rehberlik sağlar ve endüstri ile tüketici uygulamalarında güvenlik ve uyumluluğu garanti altına alacak en iyi uygulamaların altını çizer (International Organization for Standardization, 2015).
ISO/TS 19883:2017	Hidrojen ayrıştırma ve arıtma için basınç salınımlı adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı, devreye alınma ve işletimi için gerekli güvenlik önlem ve tasarım özelliklerini tanımlar (International Organization for Standardization, 2017).

ISO/TC 22 komitesi “Karayolu taşıtları” ile ilgili standartları yayınlamıştır (Tablo 3).

**Tablo 3. Uluslararası Standart Örgütü ISO/TC 22'nin Karayolu Taşıtları İçin İlgili Standartları**

ISO KODU	Standartın Açıklaması
ISO 23273-2:2013	Yakıt hücresi yol araçları için güvenlik özelliklerine odaklanır ve özellikle sıkıştırılmış hidrojeni yakıt olarak kullanan araçlar için hidrojen tehlikelerine karşı korumayı ele alır (International Organization for Standardization, 2013).
ISO 23828:2022	Sıkıştırılmış hidrojenle çalışan yakıt hücreli yolcu otomobilleri ve hafif hizmet kamyonlarının enerji tüketimini ölçmek için yöntemleri belirler; bu araçlar dışarıdan şarj edilmek üzere tasarlanmamıştır (International Organization for Standardization, 2022).
ISO/TR 11954:2024	Yakıt hücreli yolcu otomobilleri ve hafif hizmet kamyonlarının maksimum yol hızını belirlemek için test yöntemlerini belirtir; bu araçlar sıkıştırılmış hidrojen kullanır ve dışarıdan şarj edilmeye uygun olacak şekilde tasarlanmamıştır, bu durum uygulanabilir ulusal veya bölgesel düzenlemelerle uyumludur (International Organization for Standardization, 2024).

ISO/TC 58 komitesi “Gaz Tüpleri” ile ilgili standartları yayınlamıştır (Tablo 4).

**Tablo 4. Uluslararası Standart Örgütü ISO/TC 58'in Gaz Tüpleri İçin İlgili Standartları**

ISO KODU	Standartın Açıklaması
ISO 11114-1:2020	Metal silindir ve vana malzemeleri için seçim kriterlerini belirler, tek gazlar ve gaz karışımları için gaz içerikleriyle güvenli kombinasyonların sağlanmasını içerir (International Organization for Standardization, 2020).
ISO 11114-2:2021	Gaz silindirleri ve valflerde kullanılan metal olmayan malzemelerin içerdikleri gazlarla uyumluluğunu değerlendirme kılavuzları sunar, malzeme seçimi ve değerlendirmeye odaklanır (International Organization for Standardization, 2021).
ISO 11114-3:2010	Yüksek basınçlı oksijen ortamında metal olmayan malzemelerin kendiliğinden tutuşma sıcaklığını belirleme yöntemini açıklar ve oksijen bakımından zengin ortamlarda güvenliği sağlamak için malzeme seçiminde bir referans noktası olarak hizmet eder (International Organization for Standardization, 2010).
ISO 11114-4:2017	Gaz silindirlerinin üretiminde kullanılan, özellikle hidrojen ve hidrojen kırılabilirliğine neden olabilecek diğer gazlar için geçerli olan, yalnızca dikişsiz çelik gaz silindirleri için uygun çelik türlerini belirleyen test prosedürleri ve kriterlerini oluşturur (International Organization for Standardization, 2017).
ISO 11114-5:2022	Kompozit gaz silindiri astarlarının üretiminde kullanılan plastik malzemelerin gaz uyumluluğunu değerlendirmek için test yöntemlerini belirtir, silindirler için plastik matris malzemelerinin değerlendirilmesini de kapsar (International Organization for Standardization, 2022).
ISO/TR 13086-1:2011	Kompozit gaz silindirlerinin tasarımına ilişkin rehberlik sunar, özellikle test basıncına göre stres kopması güvenilirliği ve patlama oranlarına odaklanır ve çevresel maruziyet, servis ömrü gibi konularla ilgili endişeleri ve döngüsel yorgunluk, hasara dayanıklılık gibi konuları ele alır (International Organization for Standardization, 2011).

**Tablo 4. Uluslararası Standart Örgütü ISO/TC 58'in Gaz Tüpleri İçin İlgili Standartları (devamı)**

ISO KODU	Standartın Açıklaması
ISO/TR 13086-2:2017	Kompozit gaz silindirlerinin yangına maruz kaldığında güvenlik ve performansına dair kapsamlı bilgiler sunar, ateş testi ve basınç rahatlama cihazlarının kullanımı gibi hususları içerir (International Organization for Standardization, 2017).
ISO/TR 13086-3:2018	Kompozit gaz silindirlerinin tasarımı için rehberlik sağlar ve lif sarımlı türler için stres oranlarının hesaplanmasına odaklanır, bu da lif takviyeli kompozit basınçlı silindirler için standartların geliştirilmesi ve revizyonu açısından hayati önem taşır (International Organization for Standardization, 2018).
ISO/TR 13086-4:2024	Kompozit gaz silindirlerinde kullanılan, hem yapısal hem de yapısal olmayan, yapısal güçlendirici liflerin ve astarların dögüsel yorgunluğunu ele alır (International Organization for Standardization, 2024).
ISO/TS 17519: 2019	Taşımacılıkta kullanılan doldurulabilir, kalıcı olarak monte edilmiş kompozit tüplerin montajları için, malzemeler, tasarım, inşaat ve işçilik ile üretim süreçleri, üretim sırasında muayene ve test için temel kriterleri belirler (International Organization for Standardization, 2019).
ISO 18172-1:2007	500 litreye kadar kapasiteye sahip, sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış veya çözünmüş gazlar için tasarlanmış, doldurulabilir kaynaklı paslanmaz çelik gaz silindirleri için malzemeler, tasarım, yapım, işçilik, üretim süreçleri ve 6 MPa'ya kadar test basınçlarına uygun silindirler için testlerin temel kriterlerini ortaya koyar (International Organization for Standardization, 2007).
ISO 18172-2:2007	0,5 litreden 150 litreye kadar su kapasitesine sahip, sıkıştırılmış ve sıvılaştırılmış gazlar için kullanılan, doldurulabilir kaynaklı paslanmaz çelik gaz silindirlerinin malzeme, tasarım, yapım, işçilik ve testleri için gerekli temel şartları belirtir ve 6 MPa üzeri test basıncına sahip silindirler için geçerlidir (International Organization for Standardization, 2007).
ISO/TR 19811: 2017	Deniz, hava ve kara yoluyla tehlikeli maddelerin taşınmasında kullanılan, özellikle 3000 litreye kadar su kapasitesine ve 15 yıldan fazla tasarım ömrüne sahip kompozit gaz silindirleri ve tüpler için hizmet ömrü testleri yapılmasına yönelik bir çerçeve sunar (International Organization for Standardization, 2017).
ISO 10961: 2019	Çeşitli gazlar için, asetilen dahil olmak üzere, taşınabilir silindir demetlerinin tasarımı, imalatı, testi ve muayenesi için standartları belirler ve taşıma sırasında güvenlik ve uygunluğu sağlamak için bu demetler içindeki silindirler için gereksinimleri ayrıntılandırır (International Organization for Standardization, 2019).
ISO 11623: 2023	Kompozit gaz silindirlerinin düzenli denetimi ve testi için protokolleri belirtir, çeşitli gazlarla sürekli kullanımlarının bütünlüğünü sağlamak amacıyla, halka sarılı ve tamamen sarılı türler dahil, 0.5 litreden 450 litreye kadar kapasiteli silindirler için geçerlidir (International Organization for Standardization, 2023).
ISO 11625: 2007	Sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış veya çözünmüş gazlar için, 0.5'ten 150 litreye kadar su kapasitesine sahip tek gaz silindirlerinin güvenli bir şekilde kullanımı, depolanması ve taşınması için protokolleri açıklar; kaynak ve dalış gibi belirli gaz uygulamaları ile bakım ve yeniden test etme sorumlulukları dışında (International Organization for Standardization, 2007).
ISO 20475: 2018	Sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış veya çözünmüş gazları içeren silindir demetlerinin düzenli denetim ve test protokollerini ayrıntılarıyla açıklar, asetilen silindirleri için ek hükümler içerir ve bu demetlerin bakım rehberlerini de belirler (International Organization for Standardization, 2018).
ISO 25760: 2009	Gaz silindirlerinden valflerin güvenli bir şekilde çıkarılması için işlem prosedürlerini belirler, çalıştırılmayan valflerin tespit edilmesi yöntemlerini kapsar ve çıkarma işlemi sırasında operatörlerin güvenliğini sağlamak için kapsamlı bir yaklaşım sunar (International Organization for Standardization, 2009).

ISO/TC 220 komitesi, kriyojenik kaplar, büyük taşınabilir vakum yalıtımlı kaplar, gaz/malzeme uyumluluğu ve kriyojenik hizmet için valfler gibi konularda çeşitli standartlar yayınlamıştır.

ABD Ulusal Yangından Korunma Birliği (NFPA) tarafından yayınlanan hidrojen ve hidrojenli sistemler ile ilgili çeşitli standartlar bulunmaktadır (Tablo 5).

**Tablo 5. NFPA Tarafından Hazırlanan Hidrojen Konusundaki Bazı Standartlar**

Standard Kodu	Standardın Açıklaması
NFPA 2	Her türlü mekan için güvenli hidrojen kullanımını, üretimden montaja, depolamadan borulamaya, kullanımdan sıkıştırılmış gaz ve kriyojenik sıvı formundaki işlemeye kadar kapsayan geniş bir yönerge seti sunar (National Fire Protection Association, 2023).
NFPA 52	Tasarım, montaj, işletme ve bakım aşamalarında, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) dahil olmak üzere, araç doğal gaz yakıt sistemleri için kapsamlı güvenlik rehberleri sunar; ayrıca yakıt dolumu ve depolama tesislerinin altyapısını da içerir (National Fire Protection Association, 2023).
NFPA 55	Çeşitli kaplar, silindire ve tanklar arasında sıkıştırılmış gazların ve kriyojenik sıvıların güvenli kurulumu, depolanması, kullanımı ve yönetimi için geniş bir kullanım yelpazesi göz önünde bulundurularak hazırlanmış ayrıntılı bir çerçeve sunar (National Fire Protection Association, 2023).
NFPA 50A	Tüketicilerin konumlarında, hidrojenin dış bir kaynaktan sağlandığı ve mobil ekipmanlar aracılığıyla teslim edildiği gaz halindeki hidrojen sistemlerinin kurulumu için genel ilkeler önerir (National Fire Protection Association, 1999).
NFPA 50B	Tüketicilerin konumlarında sıvılaştırılmış hidrojenin güvenli depolanması ve kullanımı için rehberler belirler, bu da hem insanların hem de mülklerin korunması için güvenlik protokollerine uyulmasını sağlar (National Fire Protection Association, 1999).
NFPA 221	Standart, yangına karşı can ve mal güvenliğini korumak için yüksek zorluk derecesine sahip yangın duvarları, yangın duvarları ve yangın bariyeri duvarlarının inşası ve tasarımı için gereklilikleri, açıklıkların ve deliklerin korunmasını da içerecek şekilde açıklar (National Fire Protection Association, 2024).
NFPA 853	Sabit yakıt hücresi güç sistemlerinin tasarımı, inşası ve montajı için rehberler sunar; bu rehberler, tekli önceden paketlenmiş ünitelerden karmaşık, sahada inşa edilmiş sistemlere kadar çeşitli yapılandırmaları kapsar (National Fire Protection Association, 2025).

ABD Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) de araçlar ile ilgili hidrojen konulu standartlar hazırlamıştır (Tablo 6).

**Tablo 6.** ABD Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin (SAE) İlgili Standartları

Standard Kodu	Standardın Açıklaması
J2578	Yakıt hücre sistemleri, hidrojen depolama ve yakıt hücresel araçlardaki yüksek voltajlı elektrik sistemlerinin entegrasyonu için güvenlik gerekliliklerini belirler; tasarım, inşaat, işletme ve bakımında belirlenmiş güvenlik protokollerine uygunluğu sağlar (SAE, 2023).
J2601	Hafif ticari araçlarda hidrojen yakıt dolumu protokolleri ve sınırlarını belirler; yakıt teslim sıcaklığı, maksimum akış hızı, basınç artış hızı ve güvenli ve verimli yakıt dolumunu garanti altına alacak son basınç gibi parametreleri ayrıntılı olarak açıklar (SAE, 2020).
J2719	Ticari proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresel araçlarda kullanılan hidrojen yakıtının kalitesini garanti altına almak için kapsamlı bir çerçeve sunar; bu çerçeve, hidrojenin saflığına ve aracın yakıt sistemiyle uyumluluğuna odaklanır (SAE, 2020).
J2799	Hidrojen yüzey araçlarının, özellikle yakıt hücresel araçların yakıt dolumu için iletişim donanımı ve yazılımı gereksinimlerini belirleyen bir standarttır; bu standart, sıkıştırılmış hidrojen depolamalı ağır hizmet araçları ve endüstriyel kamyonlar için de uygulanabilir (SAE, 2024).

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun kısaltması IEC olup, bu komisyon yakıt hücrelerinin geliştirilmesi ile alakalı standartlar hakkında çalışmalar yapmaktadır.

CEN/CLC/JTC 6 "enerji sistemlerinde hidrojen" komitesinin kurulması ile Avrupa'da hidrojen standardizasyonuna ilişkin faaliyetlerin artması beklenmektedir.

**Tablo 7.** CEN geniş adıyla Avrupa Standardizasyon Komitesi'nin Hidrojen Standartları

Standardın Kodu	Standardın Açıklaması
EN 17124:2022	Hidrojen yakıtının kalite standartlarını ve özellikle yol taşıtlarındaki proton değişim membranı yakıt hücre sistemlerinde kullanımı için test metodlarını belirler (European Committee for Standardization, 2022).
EN 17127:2024	Kamu hidrojen ikmal istasyonlarının birbiriyle uyumlu çalışabilmesi için gerekli olan kriterleri ve mevcut düzenlemelere uygun olarak, örneğin Yakıt Hücresel Elektrikli Araçlar gibi taşıtlara gaz halinde hidrojen sağlama protokollerini tanımlar (European Committee for Standardization, 2024).

Geçmiş CPI olarak da bilinen ve kuruluşu 1923'e dayanan, farklı birlik ve derneklerle birleşen ve günümüzde "EIGA" kısa adıyla anılan, Avrupa Endüstriyel Gaz Birliği de hidrojen konusu ile ilgili olarak birçok belge hazırlamıştır. Bahse konu bazı belgeler Tablo 8'de gösterilmiştir.

**Tablo 8. Avrupa Endüstriyel Gaz Birliği Kurumunun Hazırladığı Hidrojen Konulu Bazı Belgeler**

EIGA Belge Kodu	Açıklaması
122/18	Avrupa Endüstriyel Gazlar Birliği tarafından hazırlanan ve IED direktifi altında hidrojen tesislerinin çevresel etkileri ve mevcut en iyi teknikler üzerine önceki rehberliklerin revizyonunu içeren bir belge (European Industrial Gases Association, 2018).
15/21	Gazlı hidrojen istasyonlarının tasarımcıları ve operatörleri için hazırlanmış bir uygulama kodudur ve hidrojenin üretimi, dağıtımı ve kullanımı sırasında güvenlikle ilgili ulusal ve şirket standartlarına atıfta bulunur (European Industrial Gases Association, 2021).
IGC Doc 121/14	Hidrojen boru hatları için endüstri uygulamalarını özetler; bu uygulamalar, boru hatlarının tasarımı, inşası ve bakımı sırasında kullanılan malzemelerin seçimi ve uygunluğuna odaklanır (European Industrial Gases Association, 2014).
6/19	Tehlikeli gazları taşıyan gemilerin inşası ve donanımı ile ilgili uluslararası standartları belirleyen ve güvenlik ile çevresel koruma konularında minimum gereklilikleri özetleyen bir kod (European Industrial Gases Association, 2019).
23/18	Sıvılaştırılmış gazları taşıyan gemiler için belirlenen uluslararası standartları ve bu gemilerin inşası, donanımı ve işletilmesi sırasında alınması gereken güvenlik önlemlerini özetleyen kod (European Industrial Gases Association, 2018).
75/21	Tehlikeli gazların güvenli taşınması için gerekli olan güvenlik mesafelerinin belirlenmesi yöntemlerini ve bu mesafelerin nasıl hesaplanacağını detaylandıran belge (European Industrial Gases Association, 2021).
134/21	Sıvılaştırılmış gaz taşıyan gemilerin inşası ve donanımı için uluslararası güvenlik ve tasarım standartlarını belirler; bu standartlar her boyuttaki gemilere uygulanabilir ve gemi, mürettebat ve çevrenin güvenliğini en üst düzeye çıkarmayı hedefler (European Industrial Gases Association, 2021).

1913 yılındaki kuruluş sürecinden bu yana 100 yılı aşkın süredir, standartlar yayınlayan CGA yani geniş açılımıyla Uluslararası Sıkıştırılmış Gaz Birliği, hidrojen başlığı altında Tablo 9 içeriğindeki belgeleri hazırlamıştır.

**Tablo 9. Sıkıştırılmış Gaz Birliği Kurumunun Hazırladığı Hidrojen Belgeleri**

Kodu	Açıklaması
G-5.3	Gazlı ve sıvı hidrojenin yanı sıra yakıt hücresi uygulamaları için hidrojenin mevcut ticari özelliklerini tanımlayan, analiz yöntemleri ve numune alma teknikleri, kalite doğrulamaları, tipik kullanım tabloları ile ek grafikler ve veri tabloları hakkında önemli bilgiler sağlayan yayın (Compressed Gas Association, 2024).
G-5.4	Kullanıcı konumlarındaki hidrojen boru hatları için standartları belirleyen ve tasarım kriterleri, boru malzemeleri, sistem bileşenleri, temizlik prosedürleri ve kurulum gibi konuları kapsayan rehber (Compressed Gas Association, 2019).
G-5.5	Hidrojen havalandırma sistemlerinin güvenli tasarımı, kurulumu ve işletimi için minimum gereklilikleri sağlar (Compressed Gas Association, 2021).
G-5.8	Tüketicinin konumundaki yüksek basınçlı hidrojen boru hatları için özellikleri ve genel ilkeleri belirleyen standart (Compressed Gas Association, 2007).
C-6.4	Standart, yalıtımlı kargo tanklarında, tank vagonlarında ve taşınabilir kaplarda sıvı karbondioksitin güvenli transferi için rehber (Compressed Gas Association, 2023).

Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu (ASME)'nin hidrojen konusunda hazırladığı standartlar Tablo 10 içeriğinde sunulmuştur.

**Tablo 10. Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu'nun bazı hidrojen standartları**

Kodu	Açıklaması
ASME B31.12	Hidrojen boru hatları ve boru hattı sistemlerinin tasarımı, inşası ve muayenesi için gereksinimleri kapsayan ve güvenli işletme ve bakımı sağlayan kapsamlı bir standart (The American Society of Mechanical Engineers, 2023).
ASME PTC 50	Yakıt hücresi güç sistemlerinin performans karakterinin belirlenmesi için prosedürler, yöntemler ve tanımlar sağlayan, girdi yakıtı ve oksitleyicinin çıktı elektrik ve termal enerjiye dönüşümü için gereken tüm bileşenleri içeren bir performans test kodu (The American Society of Mechanical Engineers, 2019).
ASME BPVC	ASME tarafından geliştirilen, kazan ve basınçlı kapların güvenli tasarımını, inşasını ve muayenesini sağlamak için bir dizi standart içerir (The American Society of Mechanical Engineers, 2023).

CSA kısaltmasıyla bilinen Kanada Standartlar Birliği isim değişikliği ile CSA Group olmuştur. Kurum 1919 yılındaki kuruluşundan bu yana birçok standart hizmete sunmuştur. Grubun hidrojen konusundaki standartları Tablo 11’de sunulmuştur.

**Tablo 11. Kanada Standartlar Birliği (CSA)  
Aşağıdaki Standartları Hazırlamıştır**

Kodu	Açıklaması
ANSI/CSA Amerika FC 12004	Elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik üreten sabit yakıt hücresi güç sistemlerinin güvenli işletimi, sağlam ve dayanıklı yapısı ve kabul edilebilir performansı için gereklilikler (Canadian Standards Association, 2021).
ANSI/CSA Amerika FC 3-2004	Ticari, endüstriyel ve konut kullanımı için tehlike arz etmeyen yerlerde, Ulusal Elektrik Kodu ANSI/NFPA 70’e uygun olarak, nominal çıkış voltajı 600 V’yi aşmayan AC ve DC tipleri dahil olmak üzere taşınabilir yakıt hücresi güç sistemleri için gereklilikler (Canadian Standards Association, 2017).
CSA Amerika HPRD1	Sıkıştırılmış hidrojen araç yakıt bölümlerinde kullanılan termal olarak aktive edilen basınç rahatlatma cihazları için gereklilikleri belirler ve standart kapsamında güvenli işletim, dayanıklı yapı ve performans testleri (Canadian Standards Association, 2021).

Hidrojen ve hidrojen sistemleri üzerine yapılan araştırmalarda, önceden hazırlanmış rehberlerin sağladığı bilgiler, bu alandaki çalışmalar için önemli birer referans noktasıdır ve bu nedenle bu rehberlere başvurmak yararlı olur. Tablo 12’de örnek rehberler sunulmuştur.

**Tablo 12. Hidrojen Güvenliği ile İlgili Kılavuzlar**

Kılavuz
Hidrojen Güvenliği ile İlgili Ortak Araştırma Merkezi’nin Dokümanları Arşivi (Joint Research Centre, 2024).
Hidrojen ve yakıt hücreli sabit uygulamalar için kurulum izin kılavuzu (Health and Safety Executive, 2023).
Avrupa’daki Acil Durum Tepki Protokolleri Rehberi (HyResponse, 2016).

### 3. HİDROJEN GÜVENLİĞİ ARAŞTIRMALARINDAKİ GELİŞMELER

Hidrojen güvenliği araştırmaları alanında hidrojen depolama ve kullanımının güvenliğini artırmaya yönelik önemli adımlar atılmıştır. Araştırmacılar, hidrojen endüstrisindeki güvenlik önlemlerini desteklemek için malzeme bilimi, sensör teknolojisi ve risk analizi gibi çeşitli yönleri incelemişlerdir. Schlapbach ve Züttel tarafından yapılan çalışmalar, hidrojenin özelliklerini ve depolama gereksinimlerini anlamının önemini vurgulayarak mobil uygulamalar için hidrojen depolama malzemelerine odaklanmıştır (Schlapbach ve Züttel, 2001). Bu araştırma, güvenli hidrojen depolamanın

sağlanması için çok önemli olan, patlayıcılık veya toksisite gibi riskler olmadan hidrojeni güvenli bir şekilde depolayabilen malzemelerin önemine ışık tutmaktadır (Oka vd., 2022).

Ayrıca, Morsbach vd. tarafından yapılan araştırmalar, malzeme değişikliklerini analiz etmek için elektron mikroskobu ve termogravimetrik gibi gelişmiş teknikler kullanarak yakıt hücreli araçlar için polimerlerin hidrojen uyumluluğunu araştırmıştır (Morsbach vd., 2022). Polimerlerin hidrojen ortamlarındaki davranışlarını anlamak, hidrojen sistemlerindeki bileşenlerin bütünlüğünü sağlamak için hayati önem taşımaktadır. Paladyum bazlı optomekanik hidrojen sensörleri üzerine yapılan çalışma, hidrojen gazını doğru bir şekilde tespit edebilen ve hidrojen tesislerinde erken sızıntı tespiti ve önlenmesine katkıda bulunan yenilikçi sensör teknolojilerinin gelişimini göstermektedir (McKeown, Wang, Yu, ve Goddard, 2017).

Ayrıca, Zhang vd. tarafından enerji depolama uygulamaları için metal hidritler üzerine yapılan araştırma, yüksek kapasite ve güvenlik özelliklerine sahip gelişmiş enerji depolama malzemeleri arayışını vurgulamaktadır (Zhang, Lou, Gao, Pan, ve Liu, 2024). Bu araştırma, sadece hidrojeni verimli bir şekilde depolamakla kalmayıp aynı zamanda depolama ve kullanım sırasında güvenliği de sağlayan malzemeler geliştirmenin önemini vurgulamaktadır. Kleszcz ve Assadi tarafından yapılan çalışmalar, hidrojenle çalışırken kapalı alanlarda sıkı güvenlik hususlarına duyulan kritik ihtiyacı vurgulamakta ve riskleri etkili bir şekilde azaltmak için sağlam güvenlik protokollerinin önemini vurgulamaktadır (Kleszcz ve Assadi, 2023).

Hidrojen güvenliği araştırmalarındaki gelişmeler, hidrojenin güvenli bir şekilde işlenmesini ve kullanılmasını sağlamak için malzeme bilimi, sensör teknolojisi ve güvenlik protokollerini içeren multidisipliner bir yaklaşımı kapsamaktadır. Bu araştırmalar, hidrojen endüstrisi için güvenlik standartlarının ve düzenlemelerinin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamakta, daha güvenli ve daha sürdürülebilir bir hidrojen ekonomisinin yolunu açmaktadır.

#### **4. KANTİTATİF RİSK ANALİZİNİN UYGULANMASI**

Hidrojen güvenliği bağlamında nicel risk analizinin uygulanmasına, bazı önemli çalışmalar katkısı sağlayabilir. Bu çalışmalardan biri, hidrojen sistemlerinin nicel risk değerlendirmesi için tasarlanmış HyRAM metodolojisini ve araç setini tanıtan Groth ve Hecht tarafından 2017'de yapılan çalışmadır (Groth ve Hecht, 2017). Bu çalışma, hidrojen güvenliğini artırmak için doğruluğu teyit edilmiş bilimsel çalışmaları ve mühendislik modellerini birbiriyle buluşturarak kullanmanın önemini vurgulamaktadır.

Mohammadfam ve Zarei tarafından 2015 yılında yapılan çalışma, hidrojen ve doğal gaz salınımlarıyla ilgili güvenlik modellemesi ve büyük kaza analizi için kapsamlı bir risk analizi çerçevesi sunmaktadır (Mohammadfam ve Zarei,

2015). Bu çalışma, hidrojen sistemleri bağlamında risk değerlendirmesinin karmaşıklığının anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve sağlam bir analitik çerçeveye duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Du vd. tarafından 2023'te yapılan araştırma Çin'deki hidrojen enerjisi sanayi zinciri için özel olarak uyarlanmış bir güvenlik değerlendirme modeli sunmaktadır (Du vd., 2023). Bu araştırma, hidrojen endüstrisinde güvenlik önlemlerini geliştirmek için son derece uygun olabilecek, tüm sistem için risk seviyesi analizi de dahil olmak üzere nicel ve nitel bir değerlendirme yaklaşımını tartıştığı için çok önemlidir.

Ayrıca, yapılan bir çalışmada, kentsel alanlardaki hidrojen yakıt ikmal istasyonlarına odaklanarak Bağımsız Koruma Katmanlarını (IPL) Koruma Katmanı Analizi (LOPA) ve RISKCURVES yazılımı ile birleştiren bir risk değerlendirme yöntemi sunmaktadır (Park, Kim, Lee, Paik, ve Kang, 2021). Bu çalışma, yıkıcı kazaları önlemek için riski çeşitli açılardan değerlendiren pratik bir vaka çalışması sunmakta ve hidrojen güvenliğinde nicel risk analizinin uygulanması için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Operasyonel güvenliğin sağlanmasında ve potansiyel tehlikelerin azaltılmasında nicel risk analizinin önemini vurgulayan bu çalışmalar, hidrojen ve hidrojen sistemleri için güvenlik standartlarının ilerlemesine katkıda bulunmaktadır.

## 5. GÜVENLİK STANDARTLARININ GELECEĞİ

Hidrojen ve hidrojen sistemlerine yönelik güvenlik standartlarının geleceği düşünüldüğünde, ilerleme ve iyileştirme için kritik öneme sahip birkaç temel alan ortaya çıkmaktadır. Önemli hususlardan biri, çok hassas ve hızlı hidrojen sensörlerinin geliştirilmesidir (Wang, Sun, Schneider-Ramelow, Lang, ve Ngo, 2021). Bu sensörler, sızıntıların veya diğer potansiyel tehlikelerin hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağlayarak hidrojen operasyonlarının güvenliğinin sağlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Buna ek olarak Alves, Gul, Cimini Junior, ve Ha tarafından 2022 yılında yapılan bir çalışmada, teknolojik kısıtlamaların üstesinden gelmede ve hidrojen kompozit tanklarının güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamada yönetmeliklerin ve standartların önemini vurgulamakta ve bu alanda düzenleyici çalışmaların devam etmesi gerektiğine işaret etmektedir (Alves, Gul, Cimini Junior, ve Ha, 2022).

Araştırmacılar Omid, Şahin, ve Cora tarafından 2024 yılında yapılan çalışma, hidrojenin ikincil bir enerji kaynağı ve taşıyıcı olarak önemini altını çizmekte ve hidrojenin üretimi, depolama teknolojileri ve taşınması konularında devam eden araştırma ve ilerlemelere duyulan ihtiyaca işaret etmektedir (Omid, Şahin, ve Cora, 2024). Bu durum, hidrojen sistemlerinin güvenliğini ve verimliliğini daha da artırmak için bu alanlardaki zorlukların ele alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Hidrojeni cazip bir seçenek haline getiren özelliklere ışık tutan Schlapbach ve Züttel tarafından yapılan araştırma, güvenlik hususları için bu özelliklerin anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır (Schlapbach ve Züttel, 2001). Ayrıca Chaplin vd. tarafından yapılan bir çalışmada hidrojenle ilgili güvenlik endişelerinin giderilmesinde uygun mühendislik tasarımının ve güvenlik önlemlerinin rolünü vurgulayarak, güvenlik önlemlerinin hidrojen sistemlerinin tasarımına ve işletilmesine entegre edilmesine sürekli odaklanılması gerektiğine işaret etmektedir (Chaplin vd., 2012). Hidrojenle ilgili tesislerdeki potansiyel tehlikeleri kontrol etmek ve azaltmak için sıkı güvenlik düzenlemelerinin (Baroutaji, Wilberforce, Ramadan, ve Olabi, 2019) ve etkili risk değerlendirme metodolojilerinin gerekliliğini vurgulayan çalışmalardan elde edilen içgörülerini dikkate almak önemlidir (Park, Kim, Lee, Paik, ve Kang, 2021). Bu çalışmalar, hidrojenin güvenli kullanımının sağlanmasında, sağlam güvenlik protokollerinin ve risk değerlendirme uygulamalarının önemini altını çizmektedir.

Hidrojen ve hidrojen sistemlerine yönelik güvenlik standartlarının geleceği sensör teknolojileri, düzenleyici çerçeveler, üretim ve depolama yöntemlerindeki ilerlemelerin yanı sıra risk değerlendirmesi ve güvenlik önlemlerinin sürekli öne çıkarılmasına bağlı olacaktır. Bu zorlukları ele almak ve bu alanlarda daha fazla araştırma ve geliştirme faaliyetinde bulunmak, güvenlik standartlarını geliştirmek ve hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak güvenli entegrasyonunu sağlamak için çok önemli olacaktır.

## SONUÇ

Hidrojen ve hidrojen sistemlerine yönelik güvenlik standartları, bu çok yönlü enerji taşıyıcısının güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için çok önemlidir. Bölüm boyunca, hidrojenle ilgili operasyonlarda güvenliğin artırılmasına katkıda bulunan çeşitli hususları inceledik. Hidrojenin temel özelliklerini ve ilgili riskleri vurgulayarak, sağlam güvenlik önlemlerinin gerekliliği ifade edilmiştir. Hidrojen güvenliğini düzenleyen yasal çerçevenin ve uluslararası yönetmeliklerin anlaşılması, uyumluluk ve tek tip güvenlik uygulamaları için gereklidir (Bhattacharyya, Singh, Grover, ve Bhanja, 2021).

Hidrojen sistemlerine özgü teknik düzenlemeler, operasyonel güvenliğin sağlanmasında çok önemli bir rol oynamakta ve belirlenmiş standartlara bağlılığın önemini vurgulamaktadır (Shen ve Miller, 2018). Hidrojen güvenliği için özel olarak hazırlanmış kodlar ve standartlar, güvenli uygulamalar için kapsamlı kılavuzlar sağlar ve bu çalışmalar güvenlik standartlarının gelişimi ile yakından bağlantılıdır.

Kantitatif risk analizi, güvenlik standartlarının uygulanması ve geliştirilmesinde kritik bir araçtır. Hidrojen güvenlik standartlarının gelişimi için çalışırken, potansiyel risklerin önüne geçmek ve güvenlik önlemlerini sürekli iyileştirmeye çalışmak zorunludur. Sürekli gelişen güvenlik standartları ortamında, en üst düzeyde güvenlik sağlamak için yeni teknolojilere ve yöntemlere uyum sağlamak gereklidir.

Sonuç olarak, yasal düzenlemelerin, kodların ve araştırmaların sentezi, hidrojen ve hidrojen sistemleri için güvenlik standartlarını geliştirmeye yönelik kapsamlı bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Güvenliğe yönelik proaktif yaklaşım benimseyerek, gelecekteki yönelimleri belirleyerek ve zorlukları ele alarak, hidrojen endüstrisinin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde ilerlemesi mümkün olabilir.

## KAYNAKÇA

- (RID). (2025). Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail. [https://otif.org/en/?page\\_id=1105](https://otif.org/en/?page_id=1105) adresinden alındı
- ADN. (2008). *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways*. <https://unece.org/about-adn> adresinden alındı
- ADR. (2025). *ADR 2025 - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*. <https://unece.org/adr-2025-files> adresinden alındı
- Alves, M. P., Gul, W., Cimini Junior, C., ve Ha, S. K. (2022). A Review on Industrial Perspectives and Challenges on Material, Manufacturing, Design and Development of Compressed Hydrogen Storage Tanks for the Transportation Sector. *Energies*, 15(14). doi:10.3390/en15145152
- Properties of Hydrogen.. (1979). T. OHTA (Dü.) içinde, *Solar-Hydrogen Energy Systems* (s. 254-255). doi:10.1016/B978-0-08-022713-9.50019-7
- ATEX 137. (1999). *Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres*. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0092> adresinden alındı
- ATEX. (2014). *Equipment for potentially explosive atmospheres*. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/equipment-potentially-explosive-atmospheres-atex\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/equipment-potentially-explosive-atmospheres-atex_en) adresinden alındı
- Bannenberg, L. J., Boelsma, C., Asano, K., Schreuders, Bernard Dam, H., ve Dam, B. (2020). Metal Hydride Based Optical Hydrogen Sensors. *Journal of the Physical Society of Japan*, 89(5). doi:10.7566/JPSJ.89.051003
- Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M., ve Olabi, A. G. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, s. 31-40. doi:10.1016/j.rser.2019.02.022
- Bhattacharyya, R., Singh, K. K., Grover, R. B., ve Bhanja, K. (2021). Nuclear hydrogen production for industrial decarbonization: Creating the business case for the near term. *International Journal of Energy Research*, 46(5), s. 6929-6943. doi:10.1002/er.7572

- Canadian Standards Association. (2017). *Portable Fuel Cell Power Systems* (ANSI/CSA AMERICA FC 3-2004 (R2017)). <https://webstore.ansi.org/standards/csa/ansicsaamericafc2004r2017> adresinden alındı
- Canadian Standards Association. (2021). *Portable Fuel Cell Power Systems* (ANSI/CSA AMERICA FC 3-2004 (R2021)). <https://www.csagroup.org/store/product/ANSI-CSA%20AMERICA%20FC%203-2004/> adresinden alındı
- Canadian Standards Association. (2021). *Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle (HGV) fuel containers* (CSA/ANSI HPRD 1:21). <https://www.csagroup.org/store/product/2428948/> adresinden alındı
- Chaplin, B. P., Reinhard, M., Schneider, W. F., Schüth, C., Shapley, J. R., Strathmann, T. J., ve Werth, C. J. (2012). Critical Review of Pd-Based Catalytic Treatment of Priority Contaminants in Water. *Environmental Science ve Technology*, 46(7), s. 3655–3670. doi:10.1021/es204087q
- Commission Directive 2009/2/EC. (2009). *of 15 January 2009 amending, for the purpose of its adaptation to technical progress, for the 31st time, Council Directive 67/548/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and.* EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=OJ%3AL%3A2009%3A011%3ATOC> adresinden alındı
- Commission Regulation (EU) 2019/543. (2019). *modifies Annex IV of Regulation (EC) No 661/2009 by updating references to and incorporating specific Regulations from the United Nations Economic Commission for Europe.* EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/543/oj> adresinden alındı
- Commission Regulation (EU) No 406/2010. (2010). *of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles (1).* EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=OJ%3AL%3A2010%3A122%3ATOC> adresinden alındı
- Compressed Gas Association. (2007). *High Pressure Hydrogen Piping Systems at Consumer Locations* (CGA G-5.8). <https://webstore.ansi.org/standards/cga/cga-1275643> adresinden alındı
- Compressed Gas Association. (2019). *Compressed Gas Association*(CGA G-5.4-2019). Standard for Hydrogen Piping Systems at User Locations. <https://webstore.ansi.org/standards/cga/cga2019-2395308> adresinden alındı
- Compressed Gas Association. (2021). *Standard for Hydrogen Vent Systems* (CGA G-5.5-2021). <https://webstore.ansi.org/standards/cga/cga2021-2447147> adresinden alındı
- Compressed Gas Association. (2023). *Safe Transfer of Liquid Carbon Dioxide in Insulated Cargo Tanks, Tank Cars, and Portable Containers* (CGA G-6.4-2023). <https://webstore.ansi.org/standards/cga/cga2023-2504627> adresinden alındı

- Compressed Gas Association. (2024). *Commodity Specification for Hydrogen* (CGA G-5.3-2024). <https://webstore.ansi.org/standards/cga/cga2024-2548518> adresinden alındı
- Darabont, D.-C., Smîdu, E., Trifu, A., Ciocîrlea, V., Ivan, I., Bejinariu, C., . . . Bernevig-Sava, M.-A. (2019). MEVA - a new method of occupational health and safety risk assessment. *MATEC Web of Conferences*, 290. doi:10.1051/mateconf/201929012008
- Darmadi, I., Nugroho, F. A., ve Langhammer, C. (2020). High-Performance Nanostructured Palladium-Based Hydrogen Sensors—Current Limitations and Strategies for Their Mitigation. *ACS Sensors*, 5(11), s. 3306–3327. doi:10.1021/acssensors.0c02019
- Directive - 89/391. (1989). *Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/dir/1989/391/oj> adresinden alındı
- Directive 2010/35/EU. (2010). *of the European Parliament and of the Council of 16 June 2010 on transportable pressure equipment and repealing Council Directives 76/767/EEC, 84/525/EEC, 84/526/EEC, 84/527/EEC and 1999/36/EC (Text with EEA relevance)*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/35/oj> adresinden alındı
- Directive 2014/35/EU. (2014). *of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage lim*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/35/oj> adresinden alındı
- Du, L., Liao, G., Wu, Y., Deng, Q., Li, A., ve Mao, N. (2023). Safety Evaluation Modelling of Hydrogen Energy Industrial Chain for Transportation-energy Integration System in China. *Journal of Physics: Conference Series*, 2454. doi:10.1088/1742-6596/2454/1/012013
- EMC Directive. (2014). *Electromagnetic Compatibility*. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en) adresinden alındı
- European Committee for Standardization. (2022). *Hydrogen fuel - Product specification and quality assurance for hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen - Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for vehicles* (EN Standard No. 17124:2022). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/90016399-7325-4ffa-a34f-058be6306350/en-17124-2022> adresinden alındı
- European Committee for Standardization. (2024). *Outdoor hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols* (EN Standard No. 17127:2024). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/728dbf15-e72a-404c-91ba-5d3d0679886b/en-17127-2024> adresinden alındı

- European Industrial Gases Association. (2014). *Hydrogen Pipeline Systems* (IGC Doc. 121/14). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC121.pdf> adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2018). *Environmental impacts of hydrogen plants* (EIGA Doc. 122/18). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC122.pdf> adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2018). *Safety training of employees* (EIGA Doc. 23/18). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC023.pdf> adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2019). *Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen* (EIGA Doc. 6/19). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC006.pdf> adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2021). *Gaseous Hydrogen Installations* (EIGA Doc. 15/21). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC015.pdf> adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2021). *Determination of Safety Distances* (EIGA Doc. 75/21). [https://www.eiga.eu/ct\\_documents/doc075-pdf/](https://www.eiga.eu/ct_documents/doc075-pdf/) adresinden alındı
- European Industrial Gases Association. (2021). *Potentially explosive atmosphere – EU Directive 1999/92/EC* (EIGA Doc. 134/21). <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC134.pdf> adresinden alındı
- Fellay, C., Dyson, P., ve Laurency, G. (2008). A Viable Hydrogen-Storage System Based On Selective Formic Acid Decomposition with a Ruthenium Catalyst. *Angewandte Chemie*, 47(21), s. 3966-3968. doi:10.1002/anie.200800320
- Groth, K. M., ve Hecht, E. S. (2017). HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), s. 7485-7493. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.07.002
- Health and Safety Executive. (2023). *Guidelines for authorizing the setup of stationary applications for hydrogen and fuel cells* . <https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr715.htm> adresinden alındı
- HyResponse. (2016). *Guide for Emergency Reaction Protocols in Europe* .
- IGC Code. (1986). IMO. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IGCCode.aspx> adresinden alındı
- IMDG Code. (2022). <https://www.imo.org/en/publications/Pages/IMDG%20Code.aspx> adresinden alındı
- Industrial safety. (2012). *The Seveso-III Directive (Directive 2012/18/EU) on the control of major-accident hazards involving dangerous substances provides for the relevant framework on risk management measures to prevent major accidents and to limit their consequences*. European Commission. [https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-accidents\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-accidents_en) adresinden alındı

- Inland Transport of Dangerous Goods. (2008). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:tr0006> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (1999). *Liquid hydrogen — Land vehicle fuelling system interface* (ISO Standard No. 13984:1999). <https://www.iso.org/standard/23570.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2006). *Liquid hydrogen — Land vehicle fuel tanks* (ISO Standard No. 13985:2006). <https://www.iso.org/standard/39892.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2007). *Hydrogen generators using fuel processing technologies* (ISO Standard No. 16110-1:2007). <https://www.iso.org/standard/41045.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2007). *Gas cylinders — Refillable welded stainless steel cylinders Part 1: Test pressure 6 MPa and below* (ISO Standard No. 18172-1:2007). <https://www.iso.org/standard/38598.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2007). *Gas cylinders — Refillable welded stainless steel cylinders Part 2: Test pressure greater than 6 MPa* (ISO Standard No. 18172-2:2007). <https://www.iso.org/standard/38599.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2007). *Gas cylinders — Safe handling* (ISO Standard No. 11625:2007). <https://www.iso.org/standard/39814.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2009). *Gaseous hydrogen and hydrogen blends — Land vehicle fuel tanks* (ISO Standard No. DD ISO/TS 15869:2009). <https://www.iso.org/standard/52871.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2009). *Gas cylinders — Operational procedures for the safe removal of valves from gas cylinders* (ISO Standard No. 25760:2009). <https://www.iso.org/standard/45999.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2010). *Hydrogen generators using fuel processing technologies* (ISO Standard No. 16110-2:2010). <https://www.iso.org/standard/41046.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2010). *Hydrogen detection apparatus — Stationary applications* (ISO Standard No. 26142:2010). <https://www.iso.org/standard/52319.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2010). *Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 3: Autogenous ignition test for non-metallic materials in oxygen atmosphere* (ISO Standard No. 11114-3:2010). <https://www.iso.org/standard/50506.html> adresinden alındı

- International Organization for Standardization. (2011). *Gas cylinders - Guidance for design of composite cylinders Part 1: Stress rupture of fibres and burst ratios related to test pressure* (ISO/TR Standard No. 13086-1:2011). <https://iso.org/standard/52747.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2013). *Fuel cell road vehicles — Safety specifications — Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen* (ISO Standard No. 23273-2:2013). <https://www.iso.org/standard/64047.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2015). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems* (ISO/TR Standard No. 15916:2015). <https://www.iso.org/standard/56546.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2017). *Safety of pressure swing adsorption systems for hydrogen separation and purification* (ISO/TS Standard No. 19883:2017). <https://www.iso.org/standard/61169.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2017). *Transportable gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 4: Test methods for selecting steels resistant to hydrogen embrittlement* (ISO Standard No. 11114-4:2017). <https://www.iso.org/standard/64587.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2017). *Gas cylinders — Guidance for design of composite cylinders Part 2: Bonfire test issues* (ISO/TR Standard No. 13086-2:2017). <https://www.iso.org/standard/70619.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2017). *Gas cylinders — Service life testing for cylinders and tubes of composite construction* (ISO/TR Standard No. 19811:2017). <https://www.iso.org/standard/66261.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2018). *Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride* (ISO Standard No. 16111:2018). <https://www.iso.org/standard/67952.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2018). *Gaseous hydrogen — Fuelling stations Part 3: Valves* (ISO Standard No. 19880-3:2018). <https://iso.org/standard/64754.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2018). *Gaseous hydrogen — Land vehicle fuel containers* (ISO Standard No. 19881:2018). <https://www.iso.org/standard/65029.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2018). *Gaseous hydrogen — Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers* (ISO Standard No. 19882:2018). <https://www.iso.org/standard/64655.html> adresinden alındı

- International Organization for Standardization. (2018). *Gas cylinders — Guidance for design of composite cylinders Part 3: Calculation of stress ratios* (ISO/TR Standard No. 13086-3:2018). <https://www.iso.org/standard/70371.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2018). *Gas cylinders — Cylinder bundles — Periodic inspection and testing* (ISO Standard No. 20475:2018). <https://www.iso.org/standard/68150.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2019). *Gaseous hydrogen — Fuelling stations Part 5: Dispenser hoses and hose assemblies* (ISO Standard No.19880-5:2019). <https://www.iso.org/standard/73787.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2019). *Hydrogen fuel quality — Product specification* (ISO Standard No. 14687:2019). <https://www.iso.org/standard/69539.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2019). *Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications* (ISO Standard No. 22734:2019). <https://www.iso.org/standard/69212.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2019). *Gas cylinders — Refillable permanently mounted composite tubes for transportation* (ISO/TS Standard No. 17519:2019). <https://www.iso.org/standard/77998.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2019). *Gas cylinders — Cylinder bundles — Design, manufacture, testing and inspection* (ISO Standard No. 10961:2019). <https://www.iso.org/standard/73003.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2020). *Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices* (ISO Standard No. 17268:2020). <https://www.iso.org/standard/68442.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2020). *Gaseous hydrogen — Fuelling stations* (ISO Standard No. 19880-1:2020). <https://www.iso.org/standard/71940.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2020). *Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 1: Metallic materials* (ISO Standard No. 11114-1:2020). <https://www.iso.org/standard/76081.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2021). *Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 2: Non-metallic materials* (ISO Standard No. 11114-2:2021). <https://www.iso.org/standard/77832.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2022). *Fuel cell road vehicles — Energy consumption measurement — Vehicles fuelled with compressed hydrogen* (ISO Standard No. 23828:2022). <https://www.iso.org/standard/78416.html> adresinden alındı

- International Organization for Standardization. (2022). *Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 5: Test methods for evaluating plastic liners* (ISO Standard No. 11114-5:2022). <https://www.iso.org/standard/77441.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2023). *Gas cylinders — Composite cylinders and tubes — Periodic inspection and testing* (ISO Standard No. 11623:2023). <https://www.iso.org/standard/76501.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2024). *Gaseous hydrogen — Fuelling stations Part 8: Fuel quality control* (ISO Standard No. 19880-8:2024). <https://www.iso.org/standard/83949.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2024). *Fuel cell road vehicles — Performance measurement — Vehicles fuelled with compressed hydrogen* (ISO/TR Standard No. 11954:2024). <https://www.iso.org/standard/84730.html> adresinden alındı
- International Organization for Standardization. (2024). *Gas cylinders — Guidance for design of composite cylinders Part 4: Cyclic fatigue of fibres and liners* (ISO/TR Standard No. 13086-4:2024). <https://www.iso.org/standard/88113.html> adresinden alındı
- IPPC Directive. (2008). *Directive 2008/1/EC concerning integrated pollution prevention and control*. European Commission. 11, 2014 tarihinde <https://wayback.archive-it.org/12090/20230305030402/https://ec.europa.eu/environment/archives/air/stationary/ippc/summary.htm> adresinden alındı
- Jaworski, J., Kułaga, P., ve Blacharski, T. (2020). Study of the Effect of Addition of Hydrogen to Natural Gas on Diaphragm Gas Meters. *Energies*, 13(11). doi:10.3390/en13113006
- Joint Research Centre. (2024). *Archive of Research Documents on Hydrogen Safety from the Joint Research Centre*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/search?query=hydrogen%20safetyvesort=relevance> adresinden alındı
- Kleszcz, S., ve Assadi, M. (2023). Hydrogen safety considerations: Mitigating risks and securing operations in enclosed spaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1294. IOP Publishing Ltd. doi:10.1088/1757-899x/1294/1/012057
- LaChance, J. L., Middleton, B., ve Groth, K. M. (2012). Comparison of NFPA and ISO approaches for evaluating separation distances. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), s. 17488-17496. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.05.144
- Machinery Directive (MD). (2006). *2006/42/EC*. European Parliament and of the Council. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/machinery-md\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/machinery-md_en) adresinden alındı

- McKeown, S. J., Wang, X., Yu, X., ve Goddard, L. L. (2017). Realization of palladium-based optomechanical cantilever hydrogen sensor. *Microsystems ve Nanoengineering*, 16087(2017). doi:10.1038/micronano.2016.87
- Meng, S., Kaxiras, E., ve Zhang, Z. (2007). Metal–Diboride Nanotubes as High-Capacity Hydrogen Storage Media. *Nano Letters*, 7(3), s. 663–667. doi:10.1021/nl062692g
- Model Regulations on the Transport of Dangerous Goods. (2023). UNECE. <https://unece.org/transport/dangerous-goods/un-model-regulations-rev-23> adresinden alındı
- Mohammadfam, I., ve Zarei, E. (2015). Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), s. 13653-13663. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.07.117
- Molkov, V. V. (2022). 4.04 - Hydrogen Safety Engineering and Standards. T. M. Letcher (Dü.) içinde, *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)* (Cilt 4, s. 86-118). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-819727-1.00023-6
- Morsbach, S., Giersch, D., Zhang, K. A., Schüßling, A., Weberskirch, D., ve Börger, A. (2022). Hydrogen Compatibility of Polymers for Fuel Cell Vehicles. *Energy Technology*, 10(9). doi:10.1002/ente.202200018
- National Fire Protection Association. (1999). *Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites* (NFPA 50A:1999). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-50a-standard/p0050acode> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (1999). *Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites* (NFPA 50B:1999). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-50b-standard/p0050bcode> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (2023). *Hydrogen Technologies Code* (NFPA 2:2023). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-2-code/p0002code> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (2023). *Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code* (NFPA 52:2023). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-52-code/p0052code> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (2023). *Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code* (NFPA 55:2023). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-55-code/p0055code> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (2024). *Standard for High Challenge Fire Walls, Fire Walls, and Fire Barrier Walls* (NFPA 221:2024). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-221-standard/p0221code> adresinden alındı
- National Fire Protection Association. (2025). *Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Systems* (NFPA 853:2025). <https://www.nfpa.org/product/nfpa-853-standard/p0853code> adresinden alındı

- Ndaya, C. C., Javahiraly, N., ve Brioude, A. (2019). Recent Advances in Palladium Nanoparticles-Based Hydrogen Sensors for Leak Detection. *Sensors*, 19(20). doi:10.3390/s19204478
- New Design for the 2024 International Codes. (2024). International Code Council®. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2024P1> adresinden alındı
- Oka, K., Tobita, Y., Kataoka, M., Kobay, K., Kaiwa, Y., Nishide, H., ve Oyaizu, K. (2022). Hydrophilic isopropanol/acetone-substituted polymers for safe hydrogen storage . *Polymer International*, 71(3), s. 348-351. doi:10.1002/pi.6337
- Omid, M. A., Şahin, M. E., ve Cora, Ö. N. (2024). Challenges and Future Perspectives on Production, Storage Technologies, and Transportation of Hydrogen: A Review. *Energy Technology*, 12(4). doi:10.1002/ente.202300997
- Park, B., Kim, Y., Lee, K., Paik, S., ve Kang, C. (2021). Risk Assessment Method Combining Independent Protection Layers (IPL) of Layer of Protection Analysis (LOPA) and RISKCURVES Software: Case Study of Hydrogen Refueling Stations in Urban Areas. *Energies*, 14(13). doi:10.3390/en14134043
- Poluda, O. N., Gimishyan, L. S., Voronkova, I. V., Ignatkina, A. L., ve Lebedeva, E. S. (2021). Public awareness in the context of the state and legal policy of 19th century Russia in the fight against epidemics. *SHS Web Conf.*, 118. doi:10.1051/shsconf/202111803017
- Pressure Equipment Directive. (2014). European Commission. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/pressure-equipment-sector/pressure-equipment-directive\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/pressure-equipment-sector/pressure-equipment-directive_en) adresinden alındı
- Regulation (EU) 2016/425. (2016). *of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on personal protective equipment and repealing Council Directive 89/686/EEC (Text with EEA relevance)*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/425/oj> adresinden alındı
- Regulation (EU) 2016/426. (2016). *of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on appliances burning gaseous fuels and repealing Directive 2009/142/EC (Text with EEA relevance)*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/426/oj> adresinden alındı
- Regulation (EU) 2018/858. (2018). *establishes EU-wide standards for the approval, market surveillance, and environmental compliance of motor vehicles, their trailers, and related components, enhancing safety and oversight while amending previous legislations*. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj> adresinden alındı
- Regulation (EU) 2019/2144. (2024). *adopted by the European Parliament and the Council on November 27, 2019*. EUR-Lex. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2144/2024-07-07> adresinden alındı

- Regulation No 134 of the UN/ECE. (2019). *Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV)*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8aad3d19-7870-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en> adresinden alındı
- SAE. (2020). *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles* (J2601:2020). [https://www.sae.org/standards/content/j2601\\_202005/](https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/) adresinden alındı
- SAE. (2020). *Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles* (J2719:2020). [https://www.sae.org/standards/content/j2719\\_202003/](https://www.sae.org/standards/content/j2719_202003/) adresinden alındı
- SAE. (2023). *Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety* (J2578:2023). [https://www.sae.org/standards/content/j2578\\_202301/](https://www.sae.org/standards/content/j2578_202301/) adresinden alındı
- SAE. (2024). *Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software* (J2799:2024). [https://www.sae.org/standards/content/j2799\\_202406/](https://www.sae.org/standards/content/j2799_202406/) adresinden alındı
- Salter, R., Chu, J., ve Hippler, M. (2012). Cavity-enhanced Raman spectroscopy with optical feedback cw diode lasers for gas phase analysis and spectroscopy. *The Analyst*, 137(20), s. 4669-4676. doi:10.1039/C2AN35722D
- Schlapbach, L., ve Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, s. 353–358. doi:10.1038/35104634
- Schneemann, A., White, J. L., Kang, S., Jeong, S., Wan, L. F., Cho, E. S., . . . Stavila, V. (2018). Nanostructured Metal Hydrides for Hydrogen Storage. *Chemical Reviews*, 118(22), s. 10775–10839. doi:10.1021/acs.chemrev.8b00313
- Shen, A., ve Miller, D. (2018). Ventdef: A new engineering model for vented gas deflagration based on NFPA 68 (2018). *Process Safety Progress*, 41(4), s. 738-750. doi:10.1002/prs.12391
- Simple Pressure Vessels Directive. (2014). European Commission. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/pressure-equipment-sector/simple-pressure-vessels-directive\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/pressure-equipment-sector/simple-pressure-vessels-directive_en) adresinden alındı
- The American Society of Mechanical Engineers. (2019). *Fuel Cell Power Systems Performance* (ASME Standard No. PTC 50 - 2002 (R2019)). <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/fuel-cell-power-systems-performance/2002/pdf> adresinden alındı
- The American Society of Mechanical Engineers. (2023). *Hydrogen Piping and Pipelines* (ASME Standard No. B31.12 - 2023). <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines> adresinden alındı

- The American Society of Mechanical Engineers. (2023). *Boiler and Pressure Vessel Code* (ASME BPVC-2023). <https://www.asme.org/codes-standards/bpvc-standards/bpvc-2023> adresinden alındı
- Wang, B., Sun, L., Schneider-Ramelow, M., Lang, K.-D., ve Ngo, H.-D. (2021). Recent Advances and Challenges of Nanomaterials-Based Hydrogen Sensors. *Micromachines*, 12(11). doi:10.3390/mi12111429
- Wang, C. J., ve Wen, J. X. (2017). Numerical simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixtures with concentration gradients. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), s. 7657-7663. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.06.107
- Yang, C., Wang, T., Muzzio, D. J., Cleaf, S. V., Phillips, E. M., Fine, A. J., . . . Roth, M. (2021). Safety Assessments Supporting Scale-up of Chemistry Involving Hydrogen. *Organic Process Research ve Development*, 25(8), s. 1979–1987. doi:10.1021/acs.oprd.1c00256
- Yang, Y., Xu, H., Lin, L., Bao, W., Zhang, B., ve Ai, B. (2020). Development of Standards for Hydrogen Safety. *E3S Web of Conferences*, 194. doi:10.1051/e3sconf/202019402013
- Zhang, X., Lou, Z., Gao, M., Pan, H., ve Liu, Y. (2024). Metal Hydrides for Advanced Hydrogen/Lithium Storage and Ionic Conduction Applications. *Accounts of Materials Research*, 5(3), s. 371–384. doi:10.1021/accountsmr.3c00267
- Zhang, Y.-n., Peng, H., Qian, X., Zhang, Y., An, G., ve Zhao, Y. (2017). Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 244, s. 393-416. doi:10.1016/j.snb.2017.01.004
- Zhou, P., Cao, Z., Xiao, X., Li, R., Liang, Z., Zhang, H., . . . Chen, L. (2022). Dynamically Staged Phase Transformation Mechanism of Co-Containing Rare Earth-Based Metal Hydrides with Unexpected Hysteresis Amelioration. *ACS Applied Energy Materials*, 5(3), s. 3783–3792. doi:10.1021/acsaem.2c00242

# HİDROJEN YAKIT HÜCRELERİNDE SAĞLIK VE GÜVENLİK: ELEKTROLİTLER

---

**Fırat AYDIN**

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği ABD,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-5869-7811

**Emine CAN**

Prof. Dr., İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
İş Sağlığı ve Güvenliği ABD, İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-1192-2994

---

## GİRİŞ

Hidrojen ve yakıt hücrelerinin küresel enerji sistemindeki rolü tartışılmakta ve bu teknolojilerin derin karbon azaltımı için potansiyel sunduğu belirtilmektedir. Hidrojen teknolojileri, elektrik, ısı, endüstri, ulaşım ve enerji depolama alanlarında kullanılmaktadır. Hidrojenin ekonomik olarak uygulanabilirliği, maliyet ve performans açısından gelişmeler gösterdiğini ve birçok ülkede hidrojen araçlarının ticari olarak sunulduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin maliyet ve performans açısından hala iyileştirilmesi gerektiği, ancak gelecekte rekabetçi olma potansiyeline sahip oldukları vurgulanmaktadır.

Yakıt hücrelerinin temel bileşeni olan elektrolitler, hücre içindeki kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için kritik bir rol oynar. Proton Değişim Membranı (PEM) gibi elektrolitler, protonların anottan katoda geçişini sağlar, böylece elektrik akımı üretimi mümkün olur. Elektrolitlerin seçimi, yakıt hücresinin verimliliğini, ömrünü ve maliyetini etkileyen önemli bir faktördür (Staffell vd., 2019).

Hidrojen yakıt hücreleri, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir çözüm sunar, ancak bu sistemlerin güvenli kullanımı kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, elektrolitler, hücrelerin verimliliğini ve güvenliğini belirleyen ana bileşenlerden biridir. Elektrolitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri hem performansı hem de potansiyel sağlık risklerini doğrudan etkiler.

## **Bölümün Amacı ve Kapsamı**

Kitap bölümünün amacı, hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolit malzemelerinin sağlık ve güvenlik üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmek ve bu teknolojilerin güvenli kullanımına yönelik en iyi uygulamaları belirlemektir. Bölüm, elektrolitlerin kimyasal özellikleri, potansiyel toksisiteleri ve çevresel etkileri üzerinde durarak, güvenli depolama, kullanım ve bertaraf yöntemleri ile ilgili rehberlik sağlar. Ayrıca, hidrojen gazının yanıcılığı ve patlayıcılığı gibi risk faktörlerine karşı alınması gereken önlemler de ele alınarak, kullanıcıların ve çevrenin korunmasını hedefleyen kapsamlı bir güvenlik protokolü sunar. Bu bağlamda, bölüm hem endüstri profesyonelleri hem de araştırmacılar için değerli bir kaynak olmayı amaçlamaktadır.

## **1. ELEKTROLİTLERİN TANIMI VE ÖNEMİ**

Elektrolitler, yakıt hücrelerinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren temel bileşenlerdir. Bu dönüşüm sürecinde elektrolitler, anot ve katot arasındaki protonların taşınmasından sorumlu olurken elektronların geçişini engeller. Elektrolitler, yakıt hücrelerinin performansını belirleyen proton iletkenliği, termal ve kimyasal kararlılık gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle, yüksek iletkenlik ve dayanıklılık sağlayan malzemeler, yakıt hücrelerinin verimliliğini artırmada kritik öneme sahiptir (Sajid vd., 2022).

### **1.1. Hidrojen Yakıt Hücrelerinde Elektrolitlerin Rolü**

Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, protonların anottan katoda taşınmasını sağlayarak elektrik akımı üretir. Bu hücrelerde, elektrolit olarak genellikle polimer elektrolit membranlar (PEM) kullanılır. PEM'ler, yüksek proton iletkenliği ve düşük yakıt geçişi gibi özellikler sunar. Ancak, PEM'lerin yüksek üretim maliyeti ve sınırlı termal kararlılık gibi dezavantajları vardır. Alternatif olarak, katı oksit yakıt hücreleri (SOFC) ve eriyik karbonat yakıt hücreleri (MCFC) gibi farklı türde yakıt hücrelerinde, daha yüksek çalışma sıcaklıklarında kararlı olan seramik ve sıvı elektrolitler kullanılmaktadır. Bu elektrolitlerin seçimi, yakıt hücrelerinin verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü doğrudan etkiler (Sajid et al., 2022).

Hidrojen yakıt hücreleri, yüksek verimlilikleri ve düşük kirlilik seviyeleri nedeniyle elektrik üretiminde çekici alternatifler olarak kabul edilmektedir. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri, mobil uygulamalar için en uygun yaklaşım olarak görülmektedir. Bununla birlikte, bu membranlar, çalışması için nemli koşullar gerektirir ve bu durum, çalıştıkları sıcaklıkları 100°C'nin altına sınırlar. Aynı zamanda, metanol ve hidrojene karşı geçirgen olmaları, yakıt verimliliğini düşürür. Solid, inorganik asit bileşikleri (veya basitçe, katı asitler) gibi  $\text{CsHSO}_4$  ve  $\text{Rb}_3\text{H}(\text{SeO}_4)_2$  yüksek proton iletkenlikleri ve faz geçiş davranışları nedeniyle geniş çapta incelenmiştir. Yakıt hücrelerinde

uygulama için bu bileşikler, anhidrit proton taşınması ve yüksek sıcaklık stabilitesi (250°C'ye kadar) gibi avantajlar sunar. Ancak, katı asitlerin su içinde çözünürlükleri ve yüksek sıcaklıklarda aşırı süneklikleri, şimdye kadar onları yakıt hücresi elektrolit alternatifleri olarak uygun kılmamıştır (Haile vd., 2001).

## 2. ELEKTROLİT TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Proton Değişim Membranı (PEM) Elektrolitleri

Proton Değişim Membranı (PEM) elektrolitleri, yakıt hücrelerinde protonların anot ve katot arasında iletilmesinden sorumlu olan malzemelerdir. PEM elektrolitleri, düşük sıcaklıklarda (genellikle 100°C'nin altında) çalışan polimer bazlı malzemeler olup, en yaygın kullanılanı perflorosülfonik asit polimeri olan Nafion'dur. Bu membranlar, proton iletkenliği sağlar ve aynı zamanda elektronların geçişini engelleyerek yakıt hücresinin etkin çalışmasını sağlar. PEM elektrolitleri, özellikle taşınabilir enerji kaynakları ve otomotiv uygulamaları gibi alanlarda kullanılır. Bu malzemelerin yüksek proton iletkenliği, iyi kimyasal dayanıklılığı ve uzun ömürlü olmaları, onları yakıt hücreleri için ideal hale getirir. Ancak, düşük sıcaklık çalışma aralığı ve su içeriğine bağlı olarak proton iletkenliğinin azalması gibi sınırlamaları vardır. Bu nedenle, daha yüksek sıcaklıklarda (150-300°C arası) çalışabilen katı asit elektrolitler gibi alternatif malzemeler araştırılmaktadır (Goni-Urtiaga vd., 2012).

Proton Değişim Membranı (PEM) elektrolitleri, hidrojen yakıt hücrelerinde protonların anot ve katot arasında taşınmasını sağlayan kritik bir bileşendir. Bu membranlar, genellikle perflorosülfonik asit (PFSA) polimerlerinden yapılmış yoğun yapılar olup, anot ve katot bölmeleri arasında proton geçişine izin verirken gaz ve elektron geçişini engeller. PEM elektrolitlerinin temel işlevi, hücredeki elektrik akımının sürekliliğini sağlamak için proton iletkenliği sağlamaktır. Bu elektrolitlerin özellikleri arasında yüksek proton iletkenliği, düşük gaz geçirgenliği ve kimyasal kararlılık yer alır. PEM'ler, yakıt hücrelerinin verimliliği ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir, çünkü gazların (özellikle hidrojen ve oksijen) membran boyunca geçişi (crossover) hücre performansını olumsuz etkileyebilir. PEM'ler, elektroliz ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılır ve özellikle enerji geçişi sürecinde hidrojen üretimi ve depolaması için önemlidir. Ancak, gaz geçişini en aza indirmek için kullanılan daha ince membranlar, hidrojen crossover'ı gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu durum, hücre verimliliğini artırmak amacıyla membran tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür (Fahr vd., 2024).

### 2.2. Nafion ve Diğer Floropolimer Membranlar

Nafion ve diğer floropolimer membranlar, perflorosülfonik asit (PFSA) polimerlerinden yapılmış olup, proton değişim membranları (PEM) olarak bilinirler. Bu membranlar, hidrojen yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılır.

Floropolimerler, su itici özellikleri ve yüksek kimyasal stabiliteleri ile bilinir. Özellikle Nafion, ilk olarak DuPont tarafından geliştirilmiş olup, yüksek proton iletkenliği ve kimyasal dayanıklılığı ile öne çıkar. Bu membranların ana bileşeni, florlu polimerlerin hidrofilik ve hidrofobik bölgelerinin kendiliğinden düzenlenmesiyle oluşan iyonik sülfonik gruplardır. Bu yapı, yakıt hücrelerinde hidrojen iyonlarının taşınmasını sağlayarak elektrik üretimine katkıda bulunur. Ancak, PFSA membranları, zamanla mekanik ve kimyasal bozulmaya maruz kalabilir. Özellikle, karboksil uç grupları, radikal saldırısı sonucunda bozulmaya yol açabilir ve bu durum, membranın mekanik bütünlüğünü ve proton iletkenliğini azaltabilir. Floropolimer membranların bozulma mekanizmaları, özellikle karboksil uç gruplarının varlığına bağlı olarak incelenmiştir. Bu gruplar, radikal saldırısına uğrayarak flor salınımına neden olabilir ve bu da katalizör zehirlenmesine ve membranın daha hızlı bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle, membranın karboksil uç gruplarının sayısını azaltmak veya bu grupları daha kararlı kimyasal formlara dönüştürmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında karboksil gruplarının florlanması, radikal tuzaklarının eklenmesi ve membranın kimyasal yapısının değiştirilmesi yer alır (Baturina vd., 2024).

PEM sistemleriyle ilişkili riskler arasında dinamik çalışma altında bileşen güvenilirliği, aşırı basınç veya bileşen arızası nedeniyle potansiyel hidrojen sızıntısı ve sistemde hidrojen-oksijen karışımları olasılığı yer alır. Hidrojen yakıt hücrelerindeki elektrolitlerle ilgili önemli sağlık ve güvenlik endişelerinden biri hidrojen sızıntısı potansiyelidir. Bu, sistem içindeki aşırı basınç veya bileşen arızası nedeniyle oluşabilir ve güvenlik tehlikelerine yol açabilir (Zhu vd., 2023).

### **2.3. Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) Elektrolitleri**

Solid Oxide Fuel Cells (SOFC), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yüksek verimli elektrokimyasal cihazlardır. SOFC'lerde kullanılan elektrolitler, hücre performansını ve dayanıklılığını artırmak için kritik bir bileşen olarak işlev görür. Elektrolitler, anot ve katot arasındaki oksijen iyonlarının taşınmasını sağlar ve bu süreçte yüksek sıcaklıklarda (genellikle 600-1000°C) çalışırlar. Bu elektrolitler, oksijen iyonlarının iletkenliğini artırmak için genellikle itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) veya gadolinyum ile katkılı serya (GDC) gibi seramik malzemelerden yapılırlar. SOFC elektrolitlerinin ana işlevi, oksitleyici ve indirgeme ortamları arasında doğrudan reaksiyonu engelleyerek hücre verimliliğini artırmaktır. Ayrıca, elektrolitlerin yoğun olması, gaz sızmasını ve hücredeki performans kaybını önlemek için gereklidir (Liang vd., 2024).

Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC) sistemlerinin yüksek çalışma sıcaklığı, yakıcı, reformatör, ısıtıcılar ve SOFC yığınının kendisi gibi ilgili bileşenlerin doğası nedeniyle önemli bir yangın ve patlama riski oluşturur. Bu yüksek sıcaklık termal tehlikelere yol açabilir. SOFC sistemlerinde yer alan malzeme ve

gazların kimyasal özellikleri sağlık ve güvenlik risklerine katkıda bulunabilir. Gaz kaçağı ve sistemdeki spesifik kimyasal reaksiyonlar gibi faktörler kaza olasılığını artırabilir (Shamsuddin vd., 2022) .

Solid Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yüksek verimli elektrokimyasal cihazlardır. Bu hücrelerde en yaygın kullanılan elektrolit, itriyum ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) olup, yüksek iyonik iletkenliği ve mekanik dayanıklılığı ile bilinir. YSZ, yüksek sıcaklık koşullarında oksijen iyonlarının iletkenliğini sağlar, bu da SOFC'nin verimli çalışmasını sağlar. YSZ'nin yapısal özellikleri, nadir toprak elementleri ve geçiş metallerinin katkı maddesi olarak eklenmesiyle iyileştirilebilir. Bu katkı maddeleri, elektrolit malzemesinin kristal yapısını, mekanik özelliklerini ve iyonik iletkenliğini etkiler. YSZ'ye alternatif olarak, nadir toprak elementleri ile katkılanmış serya ( $CeO_2$ ) ve lantanit bazlı elektrolitler de kullanılmaktadır. Bu alternatif malzemeler, düşük sıcaklıklarda çalışabilme potansiyeline sahip olup, daha düşük aktivasyon enerjisi ile iyonik iletkenlik sunabilir. Elektrolitlerin performansı, katkı maddelerinin iyonik yarıçapı, katkı maddelerinin konsantrasyonu ve sinterleme sıcaklığı gibi birçok faktörden etkilenir. YSZ ve alternatif elektrolit malzemeleri, SOFC'nin verimliliğini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için sürekli olarak araştırılmaktadır (Danilenko vd., 2024).

## 2.4. Alkali Yakıt Hücresi (AFC) Elektrolitleri

Alkalın Yakıt Hücreleri (AFC), elektrik üretmek için elektrokimyasal reaksiyonları kolaylaştıran alkalın bir elektrolit kullanır. Genellikle potasyum hidroksit (KOH) kullanılan bu elektrolit, anot ve katot arasındaki hidroksit iyonlarının ( $OH^-$ ) taşınmasında kritik bir rol oynar. Anotta hidrojenin oksidasyonu ve katotta oksijenin indirgenmesi gibi temel reaksiyonlar sonucunda su ve elektrik enerjisi üretilir. Elektrolitin bileşimi ve konsantrasyonu, hücrenin iletkenliği, verimliliği ve ömrü gibi performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. AFC'ler, nispeten düşük sıcaklıklarda çalışabilme, yüksek verimlilik ve düşük emisyon gibi avantajlara sahiptir. Ancak, sıvı elektrolit kullanımı sızıntı ve karbonatlaşma gibi zorluklara neden olabilir, bu da hücrenin performansını zamanla azaltabilir (Wang vd., 2024).

Alkali Yakıt Pili (AFC) elektrolitleri geleneksel olarak bireyler için önemli sağlık riskleri oluşturan asbest veya amonyak gibi toksik ve kanserojen maddeler içerir. AFC'lerde yaygın olarak ayırıcı olarak kullanılan asbest, zamanla maruz kaldığında akciğer kanseri ve mezotelyoma gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilen bilinen bir kanserojen ajandır. AFC elektrolitlerinde bir başka yaygın bileşen olan amonyak bazlı alkali membranlar sadece toksik değil, aynı zamanda yanıcıdır, bu da bu malzemelerle çalışan kişilere kaza ve zarar riskini artırır. Bu toksik ve tehlikeli maddelerin AFC elektrolitlerinde kullanılması, yakıt hücrelerinin üretimi, kullanımı ve bertaraf süreçleri sırasında işçi güvenliği ile ilgili endişeleri artırarak daha güvenli alternatifler bulmanın önemini vurgulamaktadır (Raimundo vd., 2020).

## 2.5. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC) Elektrolitleri

Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. PAFC'lerde kullanılan elektrolit, yoğun bir silikon karbür matrisi içinde bulunan konsantre fosforik asittir. Bu elektrolit, yakıt hücresinin anot ve katot arasında protonların taşınmasını sağlar. PAFC'lerin çalışma sıcaklığı yaklaşık 160-220°C arasındadır ve elektrolit kristalleşmesini önlemek için 42°C'nin altına düşmemelidir. PAFC'lerde elektrolit, hidrojenin anotta ayrışarak proton ve elektrona dönüşmesini sağlar. Protonlar elektrolit aracılığıyla katoda geçerken, elektronlar harici bir devre üzerinden hareket eder ve elektrik üretir. Katotta, protonlar ve elektronlar oksijenle birleşerek su oluşturur. Fosforik asit elektroliti, yüksek sıcaklıklarda kararlı olup, hücrenin verimliliğini artırırken elektrolit kayıplarını minimize eder. Hidrojenle çalışan PAFC'ler, doğalgazla çalışan sistemlere göre daha yüksek elektrik verimliliğine sahiptir çünkü hidrojen operasyonunda reformer kayıpları ortadan kalkar ve yakıt tamamen kullanılabilir. Bu özellikler, PAFC'leri verimli ve sürdürülebilir enerji üretimi için çekici kılar (Biebl vd., 2024).

Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC), elektrolit olarak konsantre fosforik asit kullanan yakıt hücreleridir. Bu tür yakıt hücreleri, 190°C ile 220°C arasındaki orta sıcaklık aralığında çalışarak hem elektrik hem de ısı üretebilirler. PAFC'ler, saf hidrojen veya kömür gazlaştırması sonrası gaz karışımları gibi geniş bir yakıt yelpazesi ile uyumlu olup, geleneksel enerji ağlarıyla entegrasyon potansiyeline sahiptir. Konsantre fosforik asit, hücre içindeki kimyasal reaksiyonlarda hidrojen iyonlarının iletimini sağlar, bu da hücredeki elektrokimyasal sürecin temelini oluşturur. Bu yakıt hücrelerinin temel avantajlarından biri, metal malzemelere karşı düşük korozif etki göstermesi ve böylece hücre stabilitesini ve ömrünü artırmasıdır. Ancak, belirli kimyasal reaksiyonların bu sıcaklık aralığında istenen verimde gerçekleşmemesi, hücre verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, PAFC'lerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar, elektrotların katalitik özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanmaktadır (Jiang vd., 2024).

## 2.6. AFC Elektrolitleri: Potasyum Hidroksit (KOH) Çözeltileri

Alkalin Yakıt Hücreleri (AFC), elektrik üretmek için potasyum hidroksit (KOH) çözeltilerini elektrolit olarak kullanan bir yakıt hücresi türüdür. Bu hücrelerde, elektrolit olarak kullanılan KOH çözeltisi, yakıt hücresinin anot ve katot elektrotları arasında hidroksit iyonlarının ( $\text{OH}^-$ ) iletilmesini sağlar. Bu iyonik iletkenlik, hidrojenin anotta oksidasyonu ve katotta oksijenin indirgenmesi reaksiyonlarını destekleyerek elektrik enerjisi üretir. KOH çözeltileri, yüksek iyonik iletkenlikleri nedeniyle tercih edilir. Elektrolit çözeltisinin konsantrasyonu ve saflığı, yakıt hücresinin verimliliği ve ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. AFC'lerin bir avantajı, nispeten düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleridir; bu, yüksek verimlilik ve düşük karbon

emisyonları ile sonuçlanır. Ancak, KOH gibi alkali çözeltilerin kullanımı, elektrolit kaçağı ve karbonatlaşma gibi operasyonel zorluklara neden olabilir, bu da hücre performansını zamanla azaltabilir (Weng vd., 2024).

### 3. ELEKTROLİTLERİN SAĞLIK VE GÜVENLİK TEHLİKELERİ

**Metanolün Toksisitesi:** Hidrojen yakıt hücrelerinde yaygın olarak yakıt olarak kullanılan metanolün insanlar için toksik olduğu bilinmektedir. Maruz kalma konsantrasyonu ve süresi önemliyse metanole maruz kalma ölümcül olabilir. 8 saatlik bir süre boyunca metanol için izin verilen maksimum maruz kalma sınırının milyonda 200 parça (ppm) olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, metanol kullanımı ciddi bir sağlık riski oluşturur.

**Elektrolit Arızası Riski:** Hidrojen yakıt hücrelerinde, bir zardan yapılan elektrolit, nispeten kısa hizmet ömrü nedeniyle arızaya eğilimlidir ve tipik olarak sadece birkaç yüz ila birkaç bin saat sürer. Bu arıza, oldukça yanıcı olan ve içten yanma riski oluşturabilen hidrojen gazının salınmasına yol açabilir ve potansiyel olarak bir ateşleme kaynağı altında yangın veya patlamaya neden olabilir. **Hidrojen Yanma Riski:** Yakıt hücrelerinde hidrojen yakıtı (H<sub>2</sub>) ve oksijen (O<sub>2</sub>) karışımı, özellikle ateşleme kaynağı gibi belirli koşullar altında içten yanma riskine yol açabilir. Bu yanma riski, özellikle elektrik devresi gibi bir ateşleme kaynağına yakın bir hidrojen sızıntısı varsa yangına veya patlamaya neden olabilir. **Hidrojen Yakıtının Kullanılması:** Hidrojen, yakıt hücrelerinde yakıt olarak kullanıldığında, tipik olarak 200 bar'ı aşan yüksek basınçlı depolama koşulları gerektirir. Bu yüksek basınçlı depolama, özellikle yanlış işlemlerin veya talimatlara uyulmaması hidrojen sızıntılarına ve müteakip yangın veya patlama risklerine yol açabileceği tank doldurma gibi işlemlerde güvenlik zorlukları yaratır.

**Önleme Önlemleri:** Hidrojen yakıt hücrelerindeki elektrolitlerle ilişkili sağlık ve güvenlik tehlikelerini azaltmak için sıkı önleme ve koruma önlemlerinin uygulanması çok önemlidir. Bu, metanol gibi toksik maddelerin işlenmesi, elektrolit arızalarını önlemek için düzenli bakımın sağlanması ve hidrojen yakıtının güvenli bir şekilde kullanılması ve depolanması için katı protokollerin uygulanması için uygun eğitimi içerir (Bultel, Arousseau, Ozil, & Perrin, 2007).

Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, doğru kullanılmazsa sağlık ve güvenlik tehlikeleri oluşturabilir. Elektrolitlerde yer alan kimyasallarla ilişkili potansiyel riskler nedeniyle bu tehlikelerin dikkate alınması çok önemlidir. Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitlerle ilişkili başlıca sağlık tehlikelerinden biri kimyasal yanma riskidir. Elektrolitler genellikle temas halinde ciddi cilt ve göz tahrişine neden olabilecek aşındırıcı maddeler içerir. Bu tür yaralanmaları önlemek için bu elektrolitleri kullanırken uygun kişisel

koruyucu ekipman giyilmelidir. Elektrolit buharlarının solunması da solunum sorunlarına ve tahrişe neden olabilir. Zararlı buharları soluma riskini en aza indirmek için elektrolitlerle uğraşırken iyi havalandırılan alanlarda çalışmak önemlidir. Diğer bir güvenlik endişesi yangın veya patlama riskidir. Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan bazı elektrolitler yanıcıdır ve ısıya veya açık alev maruz kaldıklarında tutuşabilir. Kazaları önlemek için uygun depolama ve taşıma prosedürlerine uyulmalıdır. Acil sağlık tehlikelerine ek olarak, belirli elektrolit bileşenlerine uzun süreli maruz kalmanın sağlık üzerindeki olumsuz etkileri olabilir. Kronik sağlık sorunlarına karşı korunmak için maruziyeti sınırlamak ve güvenlik kurallarına uymak çok önemlidir. Elektrolitlerin yanlışlıkla yutulması da son derece tehlikeli olabilir ve zehirlenmeye neden olabilir. Elektrolitleri güvenli bir şekilde saklamak ve onları yanlışlıkla yutabilecek çocukların veya kişilerin erişemeyeceği yerlerde tutmak önemlidir. Hidrojen yakıt hücreleri ile çalışan herkes için elektrolitleri kullanma ve ilgili sağlık ve güvenlik risklerini anlama konusunda uygun eğitim şarttır. Herhangi bir kaza veya dökülmeyi derhal ele almak için acil müdahale prosedürleri uygulanmalıdır. Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitlerle ilişkili potansiyel sağlık ve güvenlik tehlikelerini belirlemek ve azaltmak için düzenli risk değerlendirmeleri ve güvenlik denetimleri yapılmalıdır. Bu kimyasalların bulunduğu herhangi bir ortamda güvenlik her zaman birinci öncelik olmalıdır (Wilkinson vd.,1993).

Potasyum hidroksit (KOH) gibi hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, aşındırıcı yapıları ve kullanımla ilişkili potansiyel riskler nedeniyle sağlık ve güvenlik tehlikeleri oluşturur. Potasyum hidroksit (KOH), alkali yakıt hücrelerinde (AFC'ler) yaygın olarak kullanılır ve güvenlik ve çevresel etki açısından zorlu bir süreç olabilen yakıt ve oksidanlardan karbondioksitin ortadan kaldırılmasını gerektirir. AFC'lerdeki elektrotlar tipik olarak az miktarda katalizör içeren düşük maliyetli gözenekli malzemelerden yapılır, bu da üretim ve işleme süreçleri sırasında ek güvenlik hususları getirebilir. AFC sistemleri verimli ve etkili olmakla birlikte hem mobil hem de sabit uygulamalarda güvenlik tehlikelerine yol açabilecek sızıntıları veya dökülmeleri önlemek için elektrolit sirkülasyon sisteminin dikkatli bir şekilde yönetilmesini gerektirir. Genel sistem güvenliğini ve güvenilirliğini artırmayı amaçlayan daha kalın PTFE katmanları veya gözenek oluşturucu olarak amonyak bikarbonat gibi alternatif malzemeler kullanılarak, özellikle katotlar yoluyla potasyum hidroksit (KOH) sızıntısını azaltarak AFC'lerde güvenliği artırmak için çaba gösterilmiştir. Alkali hücreler için mevcut katalizörlerin seçimi, şu anda platin grubu metalleri ve tungsten karbürler gibi spesifik malzemelerle sınırlı olan asidik hücrelere kıyasla daha geniştir. AFC'lerdeki bu daha geniş katalizör seçenekleri yelpazesi, katalizörün kullanımı ve bertarafı ile ilgili güvenlik hususlarını etkileyebilir. Bu sistemlerde kullanılan elektrolitler ve diğer bileşenlerle ilişkili sağlık ve güvenlik risklerini azaltmak için AFC'lerle çalışırken uygun eğitim, kullanım prosedürleri ve güvenlik protokolleri şarttır (Cifrain vd., 2003).

Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, doğru kullanılmazsa sağlık ve güvenlik tehlikeleri oluşturabilir. Bu tehlikeler, yakıt hücresi sistemlerinin güvenli çalışmasını sağlamak için dikkate alınması çok önemlidir. Yakıt hücrelerindeki elektrolitlerle ilgili başlıca endişelerden biri kimyasal yanma potansiyelidir. Elektrolitler genellikle temas halinde cilt tahrişine veya yanıklara neden olabilecek aşındırıcı maddelerdir. Elektrolit buharlarının solunması da solunum sorunlarına ve tahrişe neden olabilir. Soluma maruz kalma riskini en aza indirmek için elektrolitlerin iyi havalandırılan alanlarda kullanılması esastır. Ek olarak, yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler yanıcı veya yanıcı olabilir ve bu da yangın tehlikesi riskini artırır. Yanıcılık ile ilgili kazaları önlemek için uygun depolama ve taşıma prosedürleri gereklidir. Elektrolitlerin yanlışlıkla yutulması zehirlenmeye ve ciddi sağlık sonuçlarına neden olabilir. Elektrolitleri güvenli bir şekilde saklamak ve yetkisiz kişiler tarafından erişilebilir olmadıklarından emin olmak çok önemlidir, özellikle yanlışlıkla yutulmanın mümkün olduğu ortamlarda. Hidrojen yakıt hücrelerindeki elektrolitlerle ilişkili bu sağlık ve güvenlik tehlikelerini azaltmak için, sıkı güvenlik protokollerini takip etmek, bu maddeleri kullanan personele yeterli eğitim sağlamak ve uygun depolama ve bertaraf uygulamalarını uygulamak esastır. Yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitlerle ilişkili olası tehlikeleri belirlemek ve ele almak için düzenli risk değerlendirmeleri ve güvenlik denetimleri yapılmalıdır. Güvenlik konusunda proaktif bir yaklaşım sürdürmek, kazaların önlenmesine ve yakıt hücresi sistemleriyle çalışan bireylerin refahını sağlamaya yardımcı olabilir (Barilo vd., 2017).

Hidrojen yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, yakıt hücresi sisteminde yer alan malzemelerin doğası nedeniyle sağlık ve güvenlik tehlikeleri oluşturabilir. Birincil endişelerden biri, zararlı kimyasallara maruz kalmaya yol açabilecek elektrolitin yakıt hücresi sisteminden sızma potansiyelidir. Proton değişim plastik membranları gibi elektrolitlere maruz kalmak, uygun önlemler alınmazsa cilt tahrişine veya kimyasal yanıklara neden olabilir. Cilt tahrişine ek olarak, elektrolit buharlarının veya dumanlarının solunması solunum sorunlarına neden olabilir ve sağlık komplikasyonlarını önlemek için bundan kaçınılmalıdır. Yakıt hücresi sistemi içindeki elektrolit proton değişim plastik membranı, deri ile teması veya buharların solunmasını önlemek için dikkatli kullanılmalıdır. Hidrojen yakıt hücreleri ile çalışan bireyler için elektrolit kullanımıyla ilişkili riskleri en aza indirmek için uygun eğitim ve güvenlik protokolleri uygulanmalıdır. Olası elektrolit sızıntılarını önlemek ve zararlı maddelere maruz kalmayı önlemek için yakıt hücrelerinin güvenlik cihazlarında gaz geçirmez içi boş gövdelerin olması esastır. Güvenlik cihazlarında alarmları tetiklemek için sinyal lambalarının uygulanması, elektrolit sızıntıları da dahil olmak üzere yakıt hücresi sistemiyle ilgili herhangi bir sorun konusunda bireyleri uyararak ek bir koruma katmanı sağlayabilir.

Kritik endişelerden biri, kimyasal maruziyete ve yakıt hücresi sistemlerinin bakımı ve işletilmesine dahil olan kişilere zarar verebilecek elektrolit sızıntısı potansiyelidir. Asidik çözeltiler veya aşındırıcı malzemeler gibi belirli

elektrolit bileşenlerine maruz kalmak cilt tahrişine, yanıklara veya diğer olumsuz sağlık etkilerine neden olabilir. Elektrolit buharlarının veya sislerin solunması solunum sorunlarına veya solunum yollarında tahrişe neden olabilir ve bu maddelerin kullanımında uygun havalandırma ve güvenlik önlemlerinin önemini vurgulamaktadır. Elektrolitlerin yanlışlıkla yutulması son derece tehlikeli ve toksik olabilir ve bu tür olayları önlemek için sıkı protokollere ve eğitime duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitler, belirli koşullar altında yangın veya patlama tehlikeleri de oluşturabilir ve riskleri etkili bir şekilde azaltmak için uygun depolama, kullanım ve acil müdahale prosedürlerinin önemini vurgulamaktadır. Özetle, hidrojen yakıt hücrelerindeki elektrolitlerle ilişkili sağlık ve güvenlik tehlikeleri, kimyasal yapılarından, sızıntı potansiyellerinden ve çeşitli yollardan maruz kalma risklerinden kaynaklanmaktadır. Bu sistemlerle çalışan bireylerin bu tehlikelerin farkında olmaları ve kazaları önlemek ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için sıkı güvenlik protokollerine uymaları çok önemlidir (Venugopalan, 2021).

### 3.1. Güvenlik Yönetimi ve Önlemler

Hidrojen yakıt hücreleri güvenlik açısından hem fırsatlar hem de zorluklar sunar. Yakıt hücrelerinde proton değişim membranlarının (PEM'ler) bozulması, hidrojen geçişine ve dahili kısa devre akımlarına yol açabilir ve bu da güvenli çalışma için bu tehlikeler arasında net bir ayırım yapılmasını gerektirir (Ding vd., 2024). Ek olarak, hidrojen enerji sistemleri üzerine yapılan inceleme, üretim, depolama, nakliye ve kullanım dahil olmak üzere tüm hidrojen değer zincirinde güvenlik önlemlerinin önemini vurgulayarak sürdürülebilir ve verimli bir hidrojen ekonomisi sağlamak için dengeli bir yaklaşıma duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Sadeq vd., 2024), (Calabrese vd., 2024). Ayrıca, PEM yakıt hücrelerinde anodik devridaim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, operasyonel güvenliği ve kendi kendine nemlendirme süreçlerini geliştirmek için ayarlanabilir geometri ejektörlerin kullanılmasının önemini vurgulamakta ve sonuçta yakıt hücresi yığınının genel güvenliğine ve performansına katkıda bulunmakta. (Le Tri vd., 2024). Hidrojen akış kontrolü için dalgalı bulanık yöntem gibi yenilikçi kontrol sistemleri, yakıt hücresi çıkış voltajını stabilize etmede ve değişen yük koşulları altında optimum performansı sağlamada çok önemli bir rol oynar, böylece yakıt hücresi çalışmasında güvenliği ve kararlılığı artırır (Pangaribowo vd., 2024).

Hidrojenle ilişkili ana tehlikelerden biri, üretim, depolama, nakliye ve kullanım sırasında risk oluşturan yanıcılığıdır. Hidrojen, contalardan, bağlantılardan veya valflerden sızarak potansiyel yangın veya patlama tehlikelerine yol açabilir.

Mekanik hasar, korozyon veya yanlış kurulum nedeniyle hidrojen sızıntısı meydana gelebilir, bu da kaçak tespit sistemleri ve önleyici bakım ihtiyacını vurgular. Isı kontrolü, aşırı ısınmayı önlemek ve hidrojen sistemlerinin güvenli çalışmasını sağlamak için çok önemlidir, sıcaklık izleme ve kontrol

mekanizmalarının önemini vurgular. Hidrojen uygulamalarında hidrojen gevrekleşmesine ve korozyona dayanması için malzeme dayanıklılığı, uygun malzeme ve kaplamaların seçimini gerektiren esastır. Hidrojenin malzemeler üzerindeki kimyasal etkilerini anlamak, bozulma, kırılabilirlik ve diğer olumsuz etkileri önlemek için hayati önem taşır ve malzeme uyumluluğu değerlendirmeleri ve testleri gerektirir (Salehi vd., 2022).

Hidrojen yakıt hücresi sistemlerinde sızıntı tespiti için çeşitli algılama cihazlarının uygulanması çok önemlidir. Bu cihazlar, herhangi bir sızıntıyı derhal tespit etmek ve potansiyel tehlikeleri önlemek için hidrojen sensörleri ve alarmları içerebilir. Sızıntıları kontrol etmek için sistem tasarımında emniyet valfleri kullanılmaktadır. Bu emniyet vanaları, hidrojenin basıncını ve akışını yönetmeye yardımcı olur, güvenli çalışmayı sağlar ve sızıntı riskini en aza indirir.

**Hidrojen sızıntısı:** Hidrojen yakıt hücreleriyle ilişkili birincil tehlikelerden biri, uygun şekilde yönetilmezse yangın veya patlama risklerine yol açabilen hidrojen kaçağı potansiyelidir. Yüksek yanıcılık: Hidrojen son derece yanıcıdır, bu nedenle kazara tutuşmayı önlemek için son derece dikkatli bir şekilde kullanılmasını ve saklanmasını çok önemlidir. Basınç tehlikeleri: Hidrojen yakıt hücreleri yüksek basınç altında çalışır ve basınç etkin bir şekilde kontrol edilmezse güvenlik olaylarına neden olabilecek sızıntı veya yırtılma riski oluşturur (Liu, 2023: 76).

Hidrojen yakıt hücresi sistemlerinde, hidrojenle uyumlulukları ve zorlu çalışma koşullarına dayanma kabiliyetleri nedeniyle paslanmaz çelik, polimerler ve spesifik alaşımlar gibi malzemeler yaygın olarak kullanılır.

Bu sistemlerde kullanılan malzemeler, hidrojene maruz kalmaya karşı dayanıklılıkları, uzun vadeli performans ve güvenlik sağlamak için seçilmiştir. Bozulmayı önlemek ve sistem bütünlüğünü korumak için uygun malzeme seçimi şarttır.

Korozyona dayanıklı kaplamalar ve polimer filmler gibi koruyucu kaplamalar, dayanıklılıklarını artırmak ve hidrojen kaynaklı bozulmadan korumak için bileşenlere uygulanır. Bu kaplamalar, malzemelerin ömrünü uzatarak ve sistem güvenilirliğini artıran bir bariyer görevi görür.

Sıcaklığı düzenlemek ve aşırı ısınmayı önlemek için etkili termal yönetim sistemleri hidrojen yakıt hücresi sistemlerine entegre edilmiştir. Bu, optimum performansı korumak ve sistem bileşenlerinin güvenliğini sağlamak için çok önemlidir.

Isı eşanjörleri ve soğutma sıvısı sirkülasyon mekanizmaları dahil soğutma sistemleri, hidrojen yakıt hücrelerinin çalışması sırasında üretilen fazla ısıyı dağıtmak için kullanılır. Isıyı verimli bir şekilde yöneterek, bu sistemler hidrojen yakıt hücresi sisteminin genel güvenliğine ve verimliliğine katkıda bulunur.

### 3.2. Acil Durum Planları ve Eğitimi

Risk Değerlendirmeleri ve Önlemler: Risk değerlendirmeleri, potansiyel tehlikeleri belirlemek, riskleri değerlendirmek ve hidrojenle ilgili faaliyetlerde güvenliği sağlamak için uygun kontrol önlemlerini uygulamak için gereklidir. Uygun havalandırma, kaçak tespit sistemleri ve acil müdahale planları gibi önlemler, hidrojenle ilgili riskleri etkili bir şekilde yönetmek için kritik öneme sahiptir. Güvenlik uygulamaları arasında düzenli denetimler, ekipmanın bakımı ve personelin hidrojeni güvenli bir şekilde kullanması için eğitim yer alır (Salehi, 2022: 74).

Sızıntı veya patlama gibi hidrojenle ilgili bir olay durumunda eylemlere rehberlik etmek için tanımlanmış acil durum protokolleri oluşturulur. Bu protokoller, personelin ve çevresindeki çevrenin güvenliğini sağlamak için risklerin tahliyesi, muhafazası ve azaltılması için adımları özetlemektedir.

Hidrojen yakıt hücresi sistemleriyle çalışan personel için güvenlik prosedürleri, acil müdahale protokolleri ve uygun kullanım uygulamaları konusunda eğitmek için kapsamlı eğitim programları yürütülmektedir. Eğitim, bireylerin kritik durumlarda etkili bir şekilde yanıt vermelerini sağlayarak farkındalığı ve hazırlığı artırır (Kleszcz ve Assadi, 2023).

Kaçak algılama sistemleri: Gelişmiş kaçak algılama sistemlerinin uygulanması, herhangi bir hidrojen kaçağının erken tespitine yardımcı olabilir ve kazaları önlemek için hızlı eylemler sağlar. Hidrojen yakıt hücrelerinin kullanıldığı alanlarda yeterli havalandırma sağlamak, sızan hidrojen gazının dağılmasına yardımcı olarak tutuşma riskini azaltabilir. Hidrojen yakıt hücresi sistemlerinin düzenli bakım kontrolleri ve denetimleri, olası güvenlik sorunlarını proaktif olarak belirlemek ve ele almak için gereklidir. Hidrojen yakıt hücreli araç operasyonlarının genel güvenliğini artırmak için güvenlik protokollerinde gerekli ayarlamaların yapılmasını, güvenlik prosedürlerinin güncellenmesini ve güvenlik uygulamalarının sürekli iyileştirilmesini içerir. Kuruluşlar güvenlik yönetimine sistematik bir yaklaşım oluşturabilir, güvenlik önlemlerini sürekli olarak değerlendirebilir ve geliştirebilir ve hidrojen yakıt hücreli araçların güvenli ve verimli çalışmasını sağlayabilir (Liu vd., 2023).

## 4. ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME ALANLARI

### 4.1. Yeni Elektrolit Malzemeleri ve Teknolojiler

#### *Hidrojen Yakıt Hücrelerinde Yeni Elektrolit Malzemeleri ve Teknolojileri*

#### **Polibenzimidazol (PBI) ve Nafion bazlı Membranlar:**

Araştırmacılar, farklı sıcaklıklarda çalışan hidrojen yakıt hücreleri için polibenzimidazol ve Nafion bazlı membranlarda proton iletkenliğini geliştirmeye odaklanıyorlar.

- **Gelişmiş Protonik İletkenlik için İletken Malzemeler:** Çalışmalar, iletken ve iletken olmayan malzemeler olarak kategorize edilen membran protonik iletkenliğini artırabilen malzemeleri tanımlamıştır.

**-İletken Malzemeler Grubu:**

Bu grup, yakıt hücresi zarlarında proton iletkenliğinin iyileştirilmesine aktif olarak katkıda bulunan ve böylece genel hücre performansını artıran malzemeleri içerir.

**-İletken Olmayan Malzemeler Grubu:**

İletken olmayan malzemeler, iletken malzemelere kıyasla farklı mekanizmalar yoluyla da olsa membranlardaki protonik iletkenlik üzerindeki potansiyel etkileri açısından araştırılmaktadır.

**-Sıcaklık Dikkat Edilmesi Gerekenler:**

Odak noktası, çok çeşitli uygulamalara hitap eden, hem 100° C'nin altındaki hem de üzerindeki sıcaklıklarda çalışan hidrojen yakıt hücreleri için uygun elektrolit malzemeleri geliştirmektir.

**-Proton Değiştirilmiş Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC'ler) :**

Elektrolit malzemelerindeki gelişmeler, PEMFC'lerin verimliliğini ve performansını artırmayı ve onları hidrojen yakıt hücreleri alanındaki çeşitli pratik uygulamalar için daha uygun hale getirmeyi amaçlamaktadır.

**-Uygulama Çok Yönlülüğü:**

Yeni elektrolit malzemeleri ve teknolojileri üzerine yapılan araştırmalar, PEMFC'lerin çok yönlü ve verimli elektrolitlerin önemini vurgulayan geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılma potansiyeli tarafından yönlendirilmektedir.

**-Genel Etki:**

Hidrojen yakıt hücrelerinde elektrolit malzemelerinin ve teknolojilerinin sürekli geliştirilmesi, alanı çeşitli sektörlerde yakıt hücresi teknolojisinin daha verimli, güvenilir ve yaygın olarak benimsenmesine doğru ilerletmek için çok önemlidir (Phuc, Xian, & Atsunori, 2020).

**-Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC'ler) :**

Erimiş karbonat yakıt hücreleri yüksek sıcaklıklarda çalışır ve elektrolit olarak erimiş karbonat tuzu karışımı kullanır.

Bu yakıt hücreleri, yüksek verimlilikleri ve çeşitli yakıtları kullanma yetenekleri nedeniyle büyük ölçekli sabit güç üretimi için uygundur

**-Gelişmiş Elektrolit Malzemeleri:**

Yakıt hücrelerinin performansını ve dayanıklılığını artırabilecek gelişmiş elektrolit malzemeleri geliştirmek için araştırmalar devam etmektedir.

Perovskit oksitler, katkılı ceria ve katı elektrolit membranları gibi malzemeler, yakıt hücresi verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü artırma potansiyelleri açısından araştırılmaktadır.

#### **-İyonik Sıvı Elektrolitler:**

İyonik sıvılar, düşük uçuculukları, yüksek iyonik iletkenlikleri ve termal kararlılıkları nedeniyle yakıt hücresi elektrolitleri için başka bir ilgi alanıdır.

Bu elektrolitler, yakıt hücresi uygulamalarında güvenlik, performans ve esneklik açısından avantajlar sunabilir.

#### **-Nanoyapısal Elektrolitler:**

Yakıt hücresi elektrolitlerinin iletkenliğini ve mekanik özelliklerini geliştirmek için nanokompozit membranlar gibi nano-yapılandırılmış elektrolitler araştırılmaktadır.

Bu malzemeler, çeşitli çalışma koşullarında yakıt hücresi performansının ve dayanıklılığının iyileştirilmesine yol açabilir (Rajalakshmi ve Gopalan, 2021).

**Temiz Enerjiye Geçiş:** Dünya sera gazı emisyonlarını azaltmak için temiz enerji kaynaklarına ve elektrikli araçlara doğru ilerliyor. Hidrojen yakıt hücreleri (HFC'ler), elektrikli araçlardaki potansiyelleri açısından giderek daha fazla araştırılıyor ve sürdürülebilir bir gelecek sunmaktadır.

**Malzeme Geliştirme:** Platin, hidrojen ve oksijen reaksiyonlarını kolaylaştırmadaki kararlılığı, verimliliği ve performansı nedeniyle şu anda HFC'lerde kullanılan birincil katalizör malzemesidir. Bununla birlikte, karbon kaplı nikel, azot-karbon karışımları (MNC'ler) ve geçiş metali nitrürleri (TMN'ler) gibi alternatif katalizörler, platine benzer umut verici performans göstermektedir. Uzun vadeli etkinliği izleme gerektirmesine rağmen, rutenyum grafen de bir katalizör olarak incelenmektedir.

**Gelecekteki Malzeme Trendleri:** Platin yaygın olarak kullanılırken, sınırlı kaynakları ve daha yüksek maliyetleri araştırmaları alternatif katalizör malzemeleri bulmaya yönlendiriyor. Karbon kaplı nikel, MNC'ler, TMN'ler ve rutenyum grafen gibi malzemeler, verimlilikleri ve performansları nedeniyle gelecekte platin için potansiyel alternatifler olarak kabul edilmektedir.

**Zorluklar ve Sınırlamalar:** HFC teknolojisinin potansiyeline rağmen, üstesinden gelinmesi gereken zorluklar var. Bunlar, hidrojen çıkarma ve depolamadaki zorlukların yanı sıra verimli yakıt ikmali sistemlerinin eksikliğini içerir. Mevcut teknoloji sınırlamaları, ezici hidrojen depolama ve dağıtım sorunları ve güvenlik endişeleri, elektrikli araçlarda ve diğer uygulamalarda HFC'lerin yaygın olarak benimsenmesinin önünde engeller oluşturmaktadır.

**Gelecek Beklentileri:** Mevcut zorluklara rağmen, hidrojen enerjisi ve HFC'lerin uygulanması elektrikli araçlar ve diğer endüstriler için gelecek olarak görülüyor. Devamlı araştırma ve geliştirme çabaları, mevcut sınırlamaları ele almayı ve gelecekte daha geniş uygulama için HFC teknolojisinin verimliliğini ve pratikliğini artırmayı amaçlamaktadır (Xu, 2022).

**Proton İletken Elektrolit Malzemelerinin Geliştirilmesi:** Araştırma makalesi, düşük sıcaklıktaki yakıt hücreleri için yeni proton iletken elektrolit malzemelerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Sezyum pentahidrojen difosfat (CPP) ile güçlendirilmiş bir gadolinyum katkılı seryum pirofosfat (CGP) konakçı matrisinden oluşan bir kompozit elektrolit sunar. Bu kompozit elektrolit, farklı sıcaklıklarda gelişmiş iyonik iletkenlik göstererek onu yakıt hücresi uygulamaları için umut verici bir aday haline getirdi.

**Çekirdek-Kabuk Yapısı Oluşumu:** Kompozit elektrolitte CPP ile takviye, çekirdek-kabuk yapısının oluşumuna yol açtı. Bu yapı, protonların elektrolit materyalinin kabuğuna asidik olarak çözünmesini teşvik ederek proton göçünü kolaylaştırdı. Asidik çözünme, hidroliz kinetiğini hızlandırarak elektrolitin iyonik iletkenliğinin iyileştirilmesine katkıda bulundu.

**Geliştirilmiş İyonik İletkenlik:** Kompozit elektrolit, nemlendirilmiş hava atmosferi altında  $110^{\circ}\text{C}$ 'de yaklaşık  $9\text{ mS cm}^{-1}$  ve kuru hava atmosferi altında  $230^{\circ}\text{C}$ 'de  $0,8\text{ mS cm}^{-1}$  maksimum iyonik iletkenlik sergiledi. Bu iletkenlik değerleri, yeni elektrolit malzemelerinin düşük sıcaklıklarda proton iletimini kolaylaştırmadaki etkinliğini vurgular

**Elektrolit Malzemelerinin Yoğunlaştırılması:** Çalışma ayrıca kompozit elektrolitlerin yoğunlaşmasını vurguladı ve tüm bileşimlerin % 95'in üzerinde dikkate değer bir yoğunlaşma sağladı. Bu yüksek yoğunlaşma seviyesi, geliştirilen malzemelerin düşük sıcaklıktaki yakıt hücrelerinde kullanım için pratik uygunluğunu doğrular ve çalışma sırasında etkinliklerini ve stabilitelerini sağlar

**Pratik Etkileri:** Gelişmiş iyonik iletkenliğe ve yüksek yoğunlaştırmaya sahip kompozit elektrolit malzemelerinin başarılı bir şekilde geliştirilmesi, düşük sıcaklıktaki yakıt hücrelerinin verimliliğini ve performansını artırmak için yeni olanaklar sunar. Elektrolit teknolojisindeki bu gelişmeler, hidrojen yakıt hücreleri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için daha verimli ve sürdürülebilir enerji dönüştürme cihazları oluşturma çabalarına katkıda bulunur (Mathur vd., 2020).

Hidrojen yakıt hücreleri alanında, yeni elektrolit malzemeleri ve teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Araştırmalar, olağanüstü performans ve kararlılığa sahip ultra düşük maliyetli metal içermeyen oksijen indirgeme reaksiyonu (ORR) katalizörlerinin sentezi (Singh vd., 2024), yakıt hücrelerinde verimli hidrojen peroksit indirgeme reaksiyonları (HPRR) için  $\text{CeO}_2$  bazlı hetero yapılandırılmış katalizörlerin üretimi (Gao vd., 2024), su bölmede gelişmiş elektro katalitik performans için N-katkılı grafitli karbon malzemelere bağlı Co nanopartiküllerinin sentezi (Wu vd., 2024), umut verici bir hidrojen depolama malzemesi olarak lityum borohidritin araştırılması performans geliştirme stratejileri (Yang vd., 2024) ve katı oksit yakıt hücreleri için  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CO}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\Delta}$  gibi karışık iletken

malzemelerin araştırılması, elektrot yapısı optimizasyonunun ve seryum oksidin elektrot özelliklerinin iyileştirilmesinde katalitik aktivitesinin önemini vurgulamaktadır (Boukamp ve Carru, 2024). Bu çalışmalar, verimliliği, kararlılığı ve genel performansı artırmayı amaçlayan hidrojen yakıt hücrelerinde elektrolit malzemelerinin ve teknolojilerinin devam eden evrimine toplu olarak katkıda bulunur.

## **SONUÇ ve GELECEK PERSPEKTİFLERİ**

Pil teknolojisindeki elektrolitlerin geleceği, güvenlik ve sağlık yönlerini geliştirmeye doğru ilerliyor. Araştırmalar, tamamen fosfatlı elektrolitler gibi yanıcı olmayan elektrolitlerin benimsenmesinin pillerin güvenliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir (Chen vd., 2024). Ek olarak, düşük toksisiteye sahip sürdürülebilir elektrolitlerin geliştirilmesi, gelecekteki pil gelişmeleri için çok önemlidir (Ma vd., 2024). Elektrolit keşfi için yapay zekayı kullanmak gibi yeni yaklaşımlar, iyonik iletkenlik, kararlılık ve verimlilik gibi özellikleri tahmin etmede umut verici sonuçlar göstermiştir ve bu da yüksek voltajlı piller için daha güvenli elektrolitlerin tasarımına yol açmıştır (Kumar vd., 2024). Ayrıca, çözme yapılarını benzersiz katyonlar aracılığıyla ayarlamak gibi yenilikçi stratejiler, çeşitli pil bileşenleriyle ultra yüksek güvenlik, kararlılık ve uyumluluk elde etme potansiyelini göstererek, yeni nesil enerji depolama cihazlarında uzun kullanım ömrü ve yüksek voltaj direnci sağlama potansiyelini göstermiştir (Ding vd., 2024). Bu gelişmeler toplu olarak gelecekteki pil teknolojilerinde güvenlik, sağlık ve çevresel sürdürülebilirliğe öncelik veren elektrolitlerin tasarımının yolunu açıyor.

Pil teknolojisindeki elektrolitlerin geleceği, güvenlik ve sağlık yönlerini iyileştirmek için daha güvenli ve daha sürdürülebilir seçeneklere doğru kayıyor. Araştırmalar, geleneksel organik elektrolitlerin yanıcılık ve toksisite açısından sınırlamalarını ele almak için iyonik sıvılar, tuz içinde su elektrolitleri (WISE) ve lokal olarak konsantre elektrolitler gibi çeşitli alternatifleri araştırmıştır (Mariani vd., 2023). Ek olarak, pekiştirmeli öğrenme algoritmalarını kullanan veriye dayalı klinik karar destek araçlarının geliştirilmesi, yoğun bakım hastaları için elektrolit replasman politikalarının uyarlanmasında, aşırı reçeteyi azaltmada ve güvenliğini artırmada umut verici sonuçlar göstermiştir (Prasad vd., 2022). Ayrıca, düşük toksisiteye ve çevresel etkiye sahip sürdürülebilir elektrolitlere odaklanmak, yeşil elektrolit tasarım ilkelerine ve çözücüler ve tuzlardaki ilerlemelere duyulan ihtiyacı vurgulayarak gelecekteki pil gelişimi için çok önemlidir (Ma vd., 2024). Bu çabalar, akülerde elektrolit kullanımının güvenliğini, hassasiyetini, etkinliğini ve maliyet etkinliğini artırmayı ve enerji depolama teknolojilerine daha sürdürülebilir ve sağlık bilincine sahip bir yaklaşım sağlamayı amaçlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Barilo, N., Weiner, S. C., James, C. (2017). Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program part 2: Hydrogen and fuel cells: Emphasizing safety to enable commercialization. *International journal of hydrogen energy*, 42(11), 7625-7632.
- Baturina, E. P., Kashin, A. M., Morozova, S. M. (2024). Mini-review on degradation mechanism of perfluorosulfonic acid membranes induced by carboxylic end-groups. *Polymer Degradation and Stability*, 110857.
- Biebl, M., Roes, J., Hoster, H. (2024). Investigation of the technical potential of a hydrogen powered phosphoric acid fuel cell (PAFC) for CHP. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*.
- Boukamp, B. A., Carru, J.-C. (2024). Characterization of porous La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub> based cathode films for intermediate temperature solid oxide fuel cells. An electrochemical impedance study. *Solid State Ionics*, 412, 116600.
- Bultel, Y., Arousseau, M., Ozil, P., Perrin, L. (2007). Risk analysis on a fuel cell in electric vehicle using the MADS/MOSAR methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(3), 241-250.
- Calabrese, M., Portarapillo, M., Di Nardo, A., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G., Di Benedetto, A. (2024). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Production, Storage, Transport, Utilization, and CFD-Based Consequence and Risk Assessment. *Energies*, 17(6), 1350. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/6/1350>
- Chen, H., Chen, K., Yang, J., Liu, B., Luo, L., Li, H., Feng, J. (2024). Designing Advanced Electrolytes for High-Safety and Long-Lifetime Sodium-Ion Batteries via Anion–Cation Interaction Modulation. *Journal of the American Chemical Society*.
- Cifrain, M., Kordesch, K., Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H. A. (2003). Hydrogen/oxygen (air) fuel cells with alkaline electrolytes. *Handbook of fuel cells—Fundamentals, Technology and Applications*, 1, 267-280.
- Danilenko, I., Gorban, O., Shylo, A., Akhkozov, L., Gorban, S., Lasko, G., Mysovets, V. (2024). Determination of the nature of the co-doping effect on the structure, mechanical properties and ionic conductivity of SOFC electrolyte based on YSZ. *Solid State Ionics*, 412, 116581.
- Ding, F., Zhan, X., Wei, T., Sun, J., Huang, H., Cui, Y., Shao, Z. (2024). Similarities and differences between internal short-circuit current and hydrogen crossover current in a proton exchange membrane fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 153091.

- Fahr, S., Engel, F. K., Rehfeldt, S., Peschel, A., Klein, H. (2024). Overview and evaluation of crossover phenomena and mitigation measures in proton exchange membrane (PEM) electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, 68, 705-721.
- Gao, Y., Yang, Y., Lv, Y., Yao, J., Yin, J., Zhu, K., Wang, G. (2024). Synergistic enhancement of oxygen vacancy enrichment and morphology regulation in CeO<sub>2</sub>-NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> heterostructure catalysts for high-performance cathodes in direct borohydride-hydrogen peroxide fuel cells. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Goni-Urtiaga, A., Presvytes, D., Scott, K. (2012). Solid acids as electrolyte materials for proton exchange membrane (PEM) electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, 37(4), 3358-3372.
- Haile, S. M., Boysen, D. A., Chisholm, C. R., Merle, R. B. (2001). Solid acids as fuel cell electrolytes. *Nature*, 410(6831), 910-913.
- Jiang, R., You, B., Zhai, H. (2024). Research on the Application and Development of Fuel Cells. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 83, 286-292.
- Kleszcz, S., Assadi, M. (2023). Hydrogen safety considerations: Mitigating risks and securing operations in enclosed spaces. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Kumar, R., Vu, M. C., Ma, P., Amanchukwu, C. (2024). Electrolytomics: A unified big data approach for electrolyte design and discovery.
- Le Tri, D. T., Nguyen, H. L., Woo, J., Kim, Y., Yu, S. (2024). Regulation of anode gas pressure for durable and secure operation of proton exchange membrane fuel cells with variable-flow-rate ejector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 104650.
- Liang, F., Pan, Z., Wang, H., Jiao, Z., Yan, Z., Shen, X., Wu, J. (2024). Scalable and facile fabrication of tri-layer electrolytes by reactive sputtering for efficient and durable solid oxide fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 484, 149523.
- Liu, G., Lu, Y., Wang, L., Gao, Y., Yang, Y. (2023). Research on Safety Management Mode of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Demonstration Operation Based on Intrinsic Safety Control. Paper presented at the World Hydrogen Technology Convention.
- Ma, X., Zhang, D., Wen, J., Fan, L., Rao, A. M., Lu, B. (2024). Sustainable Electrolytes: Design Principles and Recent Advances. *Chemistry—A European Journal*, e202400332.
- Mariani, A., Liu, X., Han, J., Varzi, A., Passerini, S. (2023). The Nanostructured Future of Electrolytes. Paper presented at the Electrochemical Society Meeting Abstracts 244.

- Mathur, L., Kim, I.-H., Bhardwaj, A., Singh, B., Park, J.-Y., Song, S.-J. (2020). Structural and electrical properties of novel phosphate based composite electrolyte for low-temperature fuel cells. *Composites Part B: Engineering*, 202, 108405.
- Pangaribowo, T., Utomo, W. M., Budiman, A. H., Bakar, A. A., Khaerudini, D. S. (2024). Enhancing voltage stability through wavelet-fuzzy control of hydrogen flow in OC-PEM fuel cell. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(4), 2279-2288.
- Phuc, N. H., Xian, O. Y., Atsunori, M. (2020). New developments in hydrogen fuel cells. In *New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen* (pp. 273-298): Elsevier.
- Prasad, N., Mandyam, A., Chivers, C., Draugelis, M., Hanson III, C. W., Engelhardt, B. E., Laudanski, K. (2022). Guiding efficient, effective, and patient-oriented electrolyte replacement in critical care: an artificial intelligence reinforcement learning approach. *Journal of Personalized Medicine*, 12(5), 661.
- Raimundo, R., Vargas, J., Ordonez, J., Balmant, W., Polla, P., Mariano, A., Marino, C. (2020). A sustainable alkaline membrane fuel cell (SAMFC) stack characterization, model validation and optimal operation. *International journal of hydrogen energy*, 45(9), 5723-5733.
- Rajalakshmi, N., Gopalan, R. (2021). Recent trends in science and technology of hydrogen and polymer electrolyte membrane fuel cells. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 6(2), 189-218.
- Sadeq, A. M., Homod, R. Z., Hussein, A. K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H. F., Moghaddam, A. H. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of The Total Environment*, 173622.
- Sajid, A., Pervaiz, E., Ali, H., Noor, T., Baig, M. M. (2022). A perspective on development of fuel cell materials: Electrodes and electrolyte. *International Journal of Energy Research*, 46(6), 6953-6988.
- Salehi, F., Abbassi, R., Asadnia, M., Chan, B., Chen, L. (2022). Overview of safety practices in sustainable hydrogen economy—An Australian perspective. *International journal of hydrogen energy*, 47(81), 34689-34703.
- Shamsuddin, D. S. N. A., Muchtar, A., Nordin, D., Khan, F., Lim, B. H., Rosli, M. I., Takriff, M. S. (2022). Dynamic Hazard Identification on SOFC system using Bayesian Network. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(2), 93-105.
- Singh, R. K., Douglin, J. C., Kumar, V., Tereshchuk, P., Santori, P. G., Ferreira, E. B., Jaouen, F. (2024). Metal-free Advanced Energy Materials for the Oxygen Reduction Reaction in Anion-Exchange Membrane Fuel Cells. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 124319.

- Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491.
- Venugopalan, G. (2021). High Temperature Polymer Electrolytes for Hydrogen Fuel Cells and Electrochemical Pumps: Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- Wang, M., Ruan, J., Zhang, J., Jiang, Y., Gao, F., Zhang, X., Guo, J. (2024). Modeling, thermodynamic performance analysis, and parameter optimization of a hybrid power generation system coupling thermogalvanic cells with alkaline fuel cells. *Energy*, 292, 130557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130557>
- Weng, C., Napier, C., Katte, C., Walse, S. S., Mitch, W. A. (2024). Electrochemical Generation of Hydroxide and Hydrogen Peroxide for Hydrolysis of Sulfuryl Fluoride Fumigant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Wilkinson, D., Thomas, G., Dudley, J., Juric, P. (1993). Electrochemical cells containing a safety electrolyte solvent. In: Google Patents.
- Wu, Y.-L., Jiao, C.-K., Wang, F.-F., Tang, P.-F., Yan, Y.-T., Song, Y.-Y., Wang, Y. (2024). High Electrocatalytic Oxygen Evolution Reaction and Hydrogen Evolution Reaction of N-Doped Co@ CN Materials Derived from Two Cobalt-Based Metal-organic frameworks (MOFs). *Journal of Molecular Structure*, 138945.
- Xu, Z. (2022). Hydrogen Fuel-cell Technology in Electric Vehicles: Current Usage, Materials and Future Applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 17, 20-29.
- Yang, X., Su, J., Lu, X., Kong, J., Huo, D., Pan, Y., Li, W. (2024). Application and development of LiBH<sub>4</sub> hydrogen storage materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 1001, 175174.
- Zhu, T., Qi, M., Yin, M., Dang, J., Zhang, X., Zhao, D. (2023). On the hazards of proton exchange membrane (PEM) water electrolysis systems using system theoretic process analysis (STPA). *Process Safety and Environmental Protection*, 180, 1118-1131.

# HİDROJENİN TAŞINMASI

Fazıl ÇELİK

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-6704-9162

## GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak küreselleşen dünyada artan nüfus karşısında fosil yakıtların tükenme tehlikesi ve kullanımına bağlı olarak çevreye verdiği zarar, insanları yeni enerji kaynaklarını araştırmaya yöneltmiştir (Omar & Szpunar, 2022). Fosil yakıtlara bağımlılık ve bu yakıtların ekosistem üzerindeki zararları temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını kullanarak azaltılabilir. Fosil yakıtların faydalarının sürdürülebilir ikamesi rüzgâr, jeotermal, güneş enerji uygulamaları gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ile mümkündür (Dinçer vd., 2021).

*Ülkemiz fosil yakıt ihtiyacının çoğunu ithal ederek karşılamaktadır. Sürdürülebilir enerji politikalarının nihai amacı; ihtiyaç duyulan enerjinin en ucuz sosyal ve çevresel maliyetle, istenilen yer ile zamanda ve sürekli olarak temin edilmesini sağlamaktır. Fosil yakıt kullanımının azaltılması, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının artırılarak ekolojik dengenin korunması ile çevrenin geliştirilmesi hususları enerji politikalarının merkezinde konumlandırılmalıdır (Ömeroğlu, 2020).*

Stratejik konumu ve doğal kaynakları dikkate alındığında ülkemiz gelecek yüzyılda yeni enerji ihtiyacını bor ve hidrojenle karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Hidrojen için Karadeniz dip sularında yapılan çalışmalar ile dünya bor rezervlerinin %74'üne sahip olunması ülkemize yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı konusunda yeni imkânlar sunmaktadır. Bu iki değer üzerinde teknoloji geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir (Altınsoy, 2024).

Yoğun enerji taleplerinin olduğu ve teknolojinin hızla geliştiği günümüz dünyasında önemli bir sorun olan karbon salınımı ve azaltılması kapsamında alınması gereken tedbirler Kyoto Protokolü ile yasal bir boyut kazanmıştır (Kyoto Protokolü, 1998)

Küresel ısınma ve iklim değişikliği sebebi ile ekosistemde geri dönüşü olmayan zararlar meydana gelmektedir. Gelecek nesillere yaşanabilir ve temiz bir dünya bırakmak için gereken tedbirlerin alınması ve yasal düzenlemelerin yapılması önem arz etmektedir. Ekosisteme verilen zararların boyutlarını bilen ve fosil yakıtlarının tükenme endişesini taşıyan bazı ülkeler hidrojen enerjisinin üretilmesi, depolanması ve ihtiyaç duyulan yerlere uygun taşıma yöntemleri ile taşınması üzerine planlar yapmakta ve uygulamak için kaynak ayırmaktadır (Altınsoy, 2024).

## 1. HİDROJENİN TANIMI ve ÖZELLİKLERİ

Hidrojen doğada en fazla bulunan, rengi, tadı ve kokusu olmayan, zehirsiz ve havadan 14 kat daha hafif bir elementtir. Tabiatın yaklaşık %75'lik bir kısmını oluşturmasına rağmen, doğada saf haliyle bulunmamaktadır (Kılıç, 2023). Yapısında birer adet proton ve elektron bulunmakta olup kararsız yapısı sebebiyle evrende serbest yapıda değil diğer bileşiklerin içerisinde bulunmaktadır (Bektaş vd., 2021).

Ayrıca atom yapısı itibarıyla evrenin en basit elementi olan hidrojen, hali hazırda kabul edilen kâinatın oluşumu teorilerinde de ifade edildiği gibi gökyüzündeki tüm yıldız ile gezegenlerin temel adresidir (Ermış, 2008).

Hidrojenin çeşitli kullanım alanları ve şekilleri vardır. Hidrojenin ayrışması sonucunda oluşan kimyasal enerji; ısı ve elektrik enerjilerine dönüştürülerek uzay araçlarında, petrol ve türevlerinin üretimi ile ulaştırma sektöründe kullanılabilir (Bektaş vd., 2021). Yakılması halinde ise tüm canlıların yaşam kaynağı olan su buharı oluşmakta, doğaya zararlı madde yaymayıp bu yönüyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında kendisine önemli bir yer bulmaktadır (Kılıç, 2023).

Hidrojen, oksijenle reaksiyona girdiğinde hemen hemen 2.600 °C' ye yakın yüksek değerde sıcaklık meydana gelmektedir. Ancak ayrılan hidrojen atomlarının yeniden birleştirilmesiyle meydana gelen ısı ise çok daha yüksek olup 3.400 °C civarındadır (Bektaş vd., 2021).

Molekül ve özgül ağırlıklarının düşük olması gibi fiziksel özellikleri sebebiyle belirli bir miktardaki hidrojenin belirli bir alana sıkıştırılması veya depolanması için gerekli enerji, aynı miktardaki doğal gazın aynı alana sıkıştırılması veya depolanması için gereken enerjiden çok daha fazladır (Değirmenci, 2022).

Hidrojen yoğunluk olarak havadan 14 kat, doğal gazdan ise 9 kat daha hafiftir. Isıl değer açısından yaklaşık metreküp/12.000.000 Joule'dür. Normal

atmosfer basıncı altında  $-253^{\circ}\text{C}$ 'de soğutulması durumunda sıvı hale gelmektedir. Sıvılaştırılmış hidrojenin ısı değeri ise metreküp/84.000.000 Joule'dür (Ermış, 2008).

Başka bir ifade ile hidrojenin suyla reaksiyonun sonucu yalnızca su ve enerji olup meydana gelen enerji birim kütle başına miktarı 120 MJ/kg.'dır. Açığa çıkan enerji benzine kıyasla 44 MJ/kg'dan daha yüksektir. Yani hidrojen enerji açısından benzine oranla daha verimlidir. (Omar & Szpunar, 2022).

## 2. HİDROJENİN TAŞINMASI

Hidrojenin istenilen yer ve zamanda depolanması ya da dağıtım maksadıyla mevcut doğal gaz alt yapısından faydalanarak nihai kullanıcıya erişinceye kadar yapılan faaliyetlerin tamamı çok önemlidir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Hidrojenin ihtiyaç duyulan yere nakledilmesinde; hidrojenin üretim yöntemi, üretim teknolojisi, üretilen miktar ile ne şekilde depolanacağı, taşınacağı yerin ulaşımı imkân ve kabiliyetleri, hedef kitlenin ne kadar sıklıkta ve miktarda ihtiyaç duyduğu, var olan istasyon miktarı, taşımanın maliyeti gibi hususlar kritik öneme sahiptir (Sünbül, 2022).

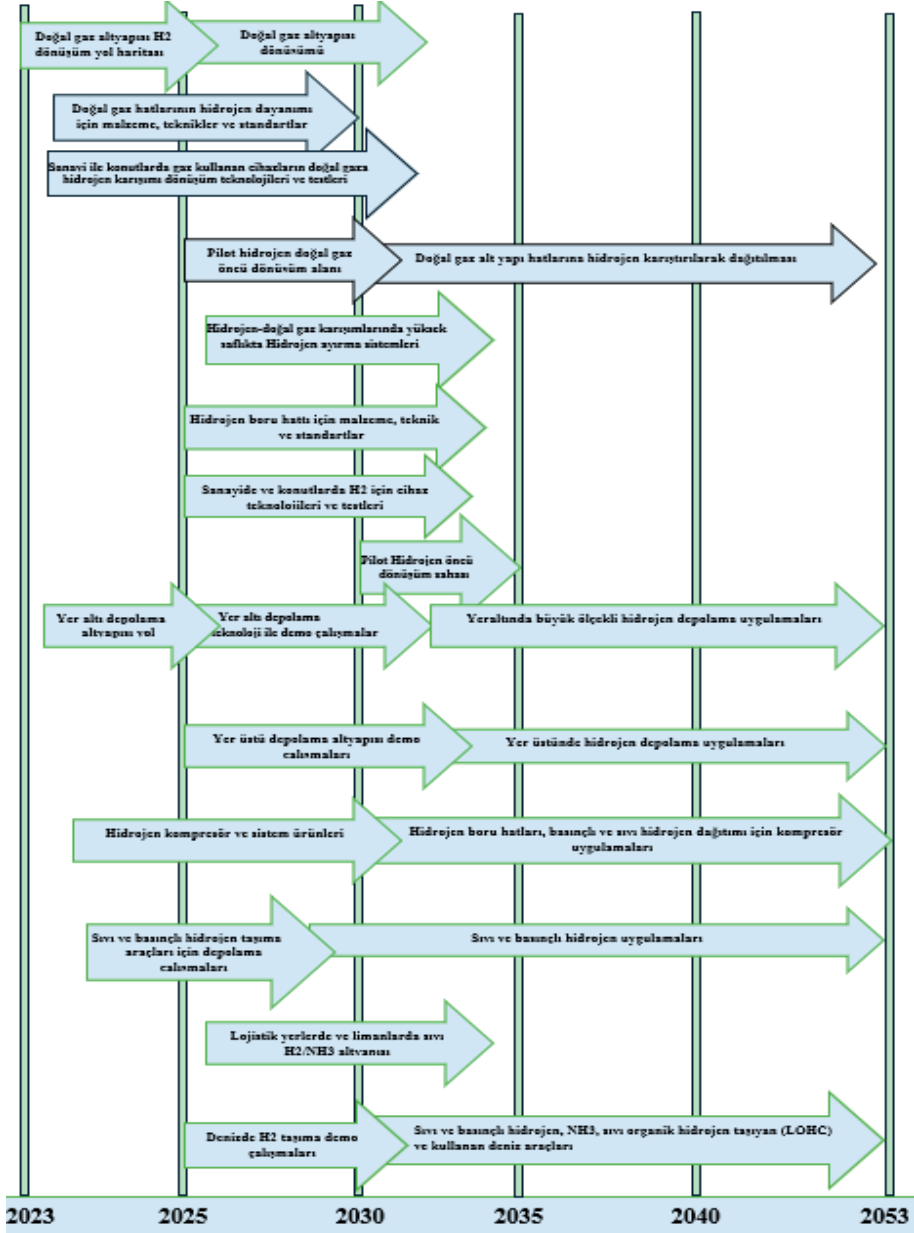
Hidrojenin iletilmesini müteakip kullanım bölgesine taşınması maksadıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Hidrojenin ulaştırılması gaz şeklinde sıkıştırılarak ya da basınçlı tanklarda sıvı hale dönüştürülerek tankerler vasıtasıyla yapılmaktadır. Müteakip dönemde hidrojen ihtiyacının artacağı değerlendirildiğinde hali hazırda kullanılan doğal gaz alt yapısı aracılığıyla iletilmesi de mümkün olacaktır (Hakyemez vd., 2023).

Özellikle üretilen hidrojenin depolanması, taşınması ve dağıtılması maksadıyla uygun araç ve yöntemlerin bulunması hidrojen ekonomisinin temel taşlarıdır. Taşıma ve dağıtım maksadıyla kriyojenik sıvı yakıt tankerleri, doğalgaz hattına hidrojenin karıştırılması, boru hatları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Omar & Szpunar, 2022).

Hidrojenin ihtiyaç duyulan bölgelere iletilmesi ile dağıtılması, hidrojenin kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi, insan kaynaklı karbon salınımının azaltılması ve doğal çevrenin temiz enerjiyle buluşması bakımından son derece önemlidir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Günümüzde hidrojen genellikle mevcut boru alt yapıları vasıtasıyla, karayollarındaysa silindirler ve kriyojenik tanklar aracılığıyla kullanım alanlarına ulaştırılmaktadır (Ural & Karaca, 2016).

Hidrojen kullanımının yaygınlaştırılması maksadıyla depolama ile boru alt yapılarının kullanılarak tüketici talepleri doğrultusunda iş yeri ve konut gibi yerlere ulaşıncaya kadar yapılan işlemlerin tamamını ifade eden değerler zinciri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Hidrojen dağıtım teknolojileri yol haritası  
(Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Şekil 1’de Hidrojen Dağıtım Teknolojileri Yol Haritasında da ifade edildiği üzere ülkemiz 2053 senesine kadar boru hattı alt yapı planlamasına sanayinin yoğun olduğu yerler ile enerji santrallerinin olduğu bölgeleri de dahil etmeli, taşımanın emniyetli yapılabilmesi için gerekli tedbirlerin alınması ve ilgili standartların oluşturulması kapsamında Ar-Ge çalışması yaptırmalıdır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Avrupa Birliği'nde elektrik kullanarak yeşil enerji üretebilen rüzgâr paneli toplulukları ile güneş enerji panellerinden oluşan alanlar hidrojen üretim altyapısını oluşturmaktadır. Avrupa ülkeleri hidrojenin ihtiyaç duyulan bölgelere aktarımı maksadıyla her 1000 kilometrelik mesafe için 0,11-0,21 Euro/kg tahmini bedel belirlenmiştir (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022). Ayrıca dünyadaki toplam 4500 kilometrelik hidrojen alt yapı boru hatları Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunmaktadır (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022).

Günümüzde temiz enerji olarak bilinen hidrojen teknolojisi gerek üretim maliyetlerinin yüksek olması gerek depolamada yaşanan zorluklar ile taşıma giderlerinin fazla olması gibi sebeplerle endüstride yeteri kadar kullanılmamaktadır (Hakyemez vd., 2023).

Hidrojenin depolanması veya kullanması maksadıyla nakliyesi teknik olarak oldukça zordur. Eğer taşıma karayolu yapılacaksa patlama tehlikesi sebebiyle tahliye ile basınçlandırma işlemini yapacak sistem, olası aşırı gerilimlerden korunmak maksadıyla ihtiyaçı karşılayacak koruma kullanılması sağlanmalı, eğer taşıma deniz yoluyla yapılacaksa ilave olarak patlamadan korunmak için tedbir alınmalıdır (Hidrojen Taşıma, 2024).

### **3. HİDROJENİN TAŞINMASINDA ETKİLİ OLAN FAKTÖRLER**

#### **3.1. Miktar**

Hidrojenin büyük miktarda taşınması için en ucuz yöntem boru hatlarının kullanılmasıdır. Ancak taşınması maksadıyla okyanusların geçilmesi gündeme geliyorsa bu durumda en ucuz yöntemin hidrojenin sıvılaştırılarak tankerlerle taşınması olacağını söylemek mümkündür. Boru hattı, maliyetleri düşük olmasına rağmen, bahse konu sistemin kurulum maliyeti çok yüksektir. Düşük miktarlardaki hidrojenin boru hatlarıyla taşınması ekonomik olmamaktadır. Sebebi ise boru hatlarının ilk kurulum harcamalarının oldukça yüksek olmasıdır. Böyle bir durumda hidrojeni taşımanın en uygun yöntemi sıkıştırılarak gaz haline dönüştürölüp taşınmasıdır. Bu yöntem sıvı hidrojenin taşınması ile kıyaslandığında, hidrojenin sıkıştırılmış gaz olarak taşınması durumunda enerji tüketimi ile ilk kurulum harcamalarının daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Bu iki yöntem ile hangisinin daha ekonomik olduğunun tespit edilmesinde hidrojenin taşınacağı mesafe önem arz etmektedir. Eğer taşınacak mesafe uzun ise enerji maliyetinin yüksek olması sebebiyle sıvılaştırılarak taşınması maliyetli olacaktır. Metal hidritin taşınması, ilk kurulum harcamalarının oldukça yüksek olmasına rağmen sıkıştırılmış gaz formundaki hidrojene oranla miktar olarak daha fazla hidrojen taşıma kapasitesine sahip olacağı için tercih edilebilir bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır (Hidrojenin Taşınması, 2024).

Düşük miktardaki hidrojenin taşınması maksadıyla basınçlı silindirlerde gaz formunda kamyonlarla taşımak ekonomik olması sebebiyle tercih edilmektedir. Kamyonla taşıma, sıvılaştırılmış halde veya boru hatları ile taşıma yöntemiyle kıyaslandığında sabit maliyetinin çok düşük olması, istenilen zaman ve güzergâhın kullanılması gibi sebeplerle uygun bir seçenek olduğunu söylemek mümkündür. Ancak daha uzun mesafelere ve daha büyük miktarlarda taşımalar için hidrojenin sıvılaştırılarak taşınması uygun olduğu için tercih edilmektedir. Çok daha büyük miktarlarda hidrojenin nakliyesi söz konusu olduğunda ise boru hatları ile taşınmasının daha uygun bir seçenek olduğunu söylemek mümkündür (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022).

### 3.2. Mesafe ve Güç Tedariği

Hidrojenin taşıma maliyetleri üzerinde mesafenin oldukça etkili olduğu daha önce ifade edilmişti. Kısa mesafe taşımaları için boru hatlarının kullanılması, kurulum maliyetlerinin nispeten düşük olması sebebiyle ekonomik olmaktadır. Ancak mesafe arttıkça boru hattı altyapısının ilk kurulumunun maliyeti de artmakta ve yapılacak taşımanın ekonomik olup olmadığı taşınacak miktar ile tespit edilmektedir. Mesafe, sıvılaştırılarak mı yoksa sıkıştırılmış gaz formunda mı taşınacağına seçilmesinde esas alınacak noktalardan birisi olmaktadır. Uzun mesafeler söz konusu ise aynı miktarda gaz formundaki hidrojenin taşınması için ihtiyaç duyulan araç sayısı sıvılaştırılmış hidrojenin taşınması için gereken araç sayısından daha fazla olacaktır (Hidrojenin Taşınması, 2024).

Hidrojenler uzun mesafelere genellikle çok iyi yalıtılmış tanklarda, taşıma için tasarlanmış vagonlarda ve kriyojenik tanklarla sıvı halde iletilir. Nihai tüketiciye geldiğinde kullanılmak maksadıyla buharlaştırılır. Yüksek basınca dayanıklı silindirler kullanılarak kısa mesafe taşımaları yapılabilir. Sıvılaştırılan hidrojenlerin tüp römorklarıyla 100-200 mil arası taşınması tercih edilebilir bir yöntemdir. Ayrıca 1000 Mile kadar yapılacak taşımalarda sıvı hidrojen tankıyla ya da boru hatları aracılığıyla taşıma başka bir seçenektir. Hidrojenin çok daha uzun mesafeleri taşınması durumu söz konusu olduğunda bahse konu tekniklerinin uygulanmasının zor olacağını söylemek mümkündür. Hidrojen normal şartlarda 1-2 MPa basınçta boru hatları vasıtasıyla sıkıştırılmış formda ya da 20-35 MPa basınçta, 2000-6200m<sup>3</sup> hacminde ve tahmini 150-500 kg kadar miktarda ve yakın mesafelere kamyonlarla karayolunda taşınabilir (Ural & Karaca, 2016). Hidrojenin sıvılaştırılmasındaki teknolojik açıdan en büyük güçlük dönüşüm esnasından enerji kapasitesinin yaklaşık olarak %30'unun harcanarak yok olmasıdır (Ural & Karaca, 2016).

Halihazırda hidrojenin 10 kilometre mesafeye kadar olan kısımlar için taşıma, boru şebekesinin alt yapısı kullanarak yapılmaktadır. Ancak 290 km gibi çok daha uzun mesafelere de yine bahse konu boru sistemleri altyapısı kullanılarak taşıma yapılmaktadır. Örnek olarak Houston'da Airproducts'ta

100 km, Fransa’da Air Liquide’de 290 km uzunluğundaki boru hattı kullanarak hidrojenin taşınması işlemi gerçekleştirilmektedir (Aytaş, 2017).

Uluslararası Enerji Kurumu’nun verileri göz önüne alındığında hidrojenin 1500-3000 km arası mesafelere taşınmasında en uygun yöntemin boru hatları olduğu ifade edilmektedir. Çok daha uzun mesafe taşınmaları söz konusu olduğunda hidrojenin sıvılaştırılarak veya amonyak gibi yöntemler kullanılarak taşınması alternatif çözüm olmaktadır (Özgür, 2023).

Hidrojen enerjisinin uzun mesafelere aktarılması konusu farklı bir problem sahası olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidrojenin boru şebekesi alt yapıları vasıtasıyla elektrik enerjisi ya da ısı enerjisi olarak ihtiyaç duyulan yerlere taşınması ve az miktardaki enerji kayıpları sebebiyle oldukça ekonomik olmaktadır. Yani hidrojenden elde edilen enerjinin istenilen yere boru hatları vasıtasıyla taşınması ekonomik bir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır (Hidrojenin Taşınması, 2024).

#### 4. HİDROJENİN TAŞINMA ŞEKİLLERİ

Hidrojene olan ihtiyaç arttıkça üretilen hidrojenin istenilen yere istenilen zamanda taşınması konusu lojistik açıdan önemli bir problem teşkil etmektedir. Hidrojenin emniyetli ve düşük maliyetli olarak taşınması konusu tam olarak çözüme kavuşmamıştır. Üretilen hidrojenin ihtiyaç duyulan yere zamanında ve ekonomik olarak ulaştırılması şeklinde ifade edebileceğimiz “Hidrojen Lojistiği” ciddi anlamda bir altyapı ve yatırım finansmanı ihtiyacı olarak ifade edilmektedir. Bahse konu sorunun çözüme ulaşması kapsamında taşıma ve depolama altyapılarına yatırım yapılmasıyla birlikte üretilen hidrojenin veya türevlerinin mümkünse kullanılacağı yerde üretilmesi, mümkün değilse taşıma ve depolama açısından en uygun yerde üretilmesi için gerekenlerin yapılması hususu önem arz etmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Hidrojenin taşınması ve dağıtım maksadıyla boru hatları, demir yolları, kamyonlar ya da bunların karışımı bir yöntem kullanılmaktadır. Tablo 1’de çeşitli taşıma şekilleri, taşıma mesafeleri ve bunların uygunluk durumu gösterilmektedir (Pascal, 2022).

**Tablo 1.** Hidrojen taşıma yöntemleri uygunluk durumu (Pascal, 2022).

Taşıma Şekli	Uyumlu Depolama Yöntemleri	Taşıma Mesafesi (Km.)
Kamyon	Sıvılaştırma, Amonyak, Sıkıştırma	<1000
Demiryolu	Sıvılaştırma, Amonyak, Sıkıştırma	800-1100
Boru Hattı	Sıkıştırma	1000-4000
Gemi (Denizyolu)	Sıvılaştırma, Amonyak	>4000

Tablo1’de belirtildiği gibi 1100 km’ye kadar olan mesafelerde kamyon ve demiryolu taşımacılığı uygun iken daha uzun mesafelerde sırasıyla deniz yolu ve boru hattı taşımacılığının uygun olduğunu söylenebilir.

Hidrojenin üretildiği tesislerden depolamanın yapılacağı bölgelere taşınmasında, demir yolu tankları, taşıma için tasarlanmış kamyonlar ve boru hattı alt yapıları gibi farklı iletim yöntemleri kullanılmaktadır. Bahse konu her bir iletim alternatifinin gerek işletme maliyetleri ve tesise olan mesafeleri, gerekse taşıma kapasiteleri bakımından kendilerine özgü birtakım farklılıkları vardır (Erdoğan, 2022).

Hidrojenin taşınmasında depolama şekli esas alındığında sıvı, gaz ve katı halde taşınması ile aktarılması söz konusu olmaktadır. Taşıma işlemi bu kapsamda değerlendirildiğinde depolanma şekli ne olursa olsun hidrojen; boru hattı alt yapıları kullanılarak, demir yolu, denizyolu ve basınçlı kaplarda karayolu kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir (Sünbül, 2022).

Sıvı hale getirilen hidrojenin genel olarak kısa ve orta ölçekli yurt içi ve yurt dışına taşınmasında karayolu kullanılırken, daha uzun mesafeli yurt dışına yapılacak taşımalarda ise demiryolu kullanılır (Aziz, 2021).

Ülkemizde de doğal gaz boru hatlarına hidrojen enjekte edilerek Avrupa’ya gaz taşıma çalışmalarına devam edilmektedir. Hal böyleyken bahse konu yöntemin en ekonomik taşıma yöntemini olduğunu söylemek uygun olacaktır. Fakat geçiş döneminde hali hazırdaki doğal gaz taşıma alt yapısının hidrojenin taşınması için uygun duruma getirilmesi kapsamında özellikle emniyet ile ilgili standartların oluşturulması ve gerekliliklerinin karşılanması için ilave bütçe ayrılması gerekmektedir (Dedeoğlu, 2023).

#### **4.1. Basınçlı Tanklarda Sıkıştırılarak Gaz Formunda Taşınması**

Yüz yıldan fazla zamandır hidrojen genellikle basınçlı kaplarla gaz formunda ve depolama sahalarında tutularak ihtiyaç duyulan yerlere taşımaktadır. Hidrojen ilk olarak 1898 yılında 140 barlık basınca dayanıklı ve 43 litre kapasiteye sahip çelikten imal edilmiş silindirik bir kapta depolanmıştır (Mercan, 2023). Silindirik tankın ilk basınç testi ise 1916 yılında yapılmış olup taşıma onay belgesi alınmıştır. Müteakip yıllarda taşıma maksadıyla kullanılan bu tankların gerekli standartları karşılaması ve aşırı basınçtan zarar görmesini engellemek maksadıyla meydana gelebilecek basınçların tahliye edilebilmesi için emniyet subapları geliştirilmiştir (Mercan, 2023).

#### **4.2. Hidrojenin Sıvılaştırılarak Taşınması ve Dağıtılması**

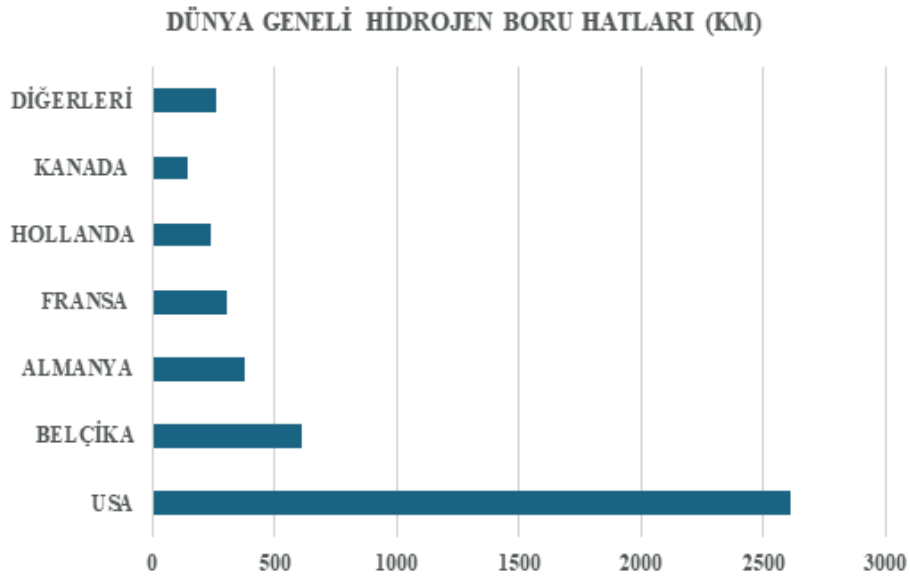
Hidrojenin sıvı formunun büyük ve orta ölçekte ülkeler arası taşımacılığı çoğunlukla demiryolu ya da karayoluyla yapılmaktadır. Normal bir kriyojenik sıvı tanker kamyonu yaklaşık olarak 2100-4200 kg arası sıvılaştırılmış hidrojeni taşıyabilmektedir (Atalmış, 2023). Sekiz tona kadar olan yükler ise uygun şartların sağlandığı bir vagon ile taşınabilir. Bahse konu yöntemin, dönüşüm

esnasında daha fazla enerjinin kaybolmasına sebep olmasına rağmen orta ve uzun mesafeler için uygun bir taşıma yöntemi olduğunu söylemek mümkündür (Atalmış, 2023).

Hidrojenin taşınmasından en çok kullanılan yöntemlerden biri olan sıvılaştırılmış halde ya da basınçlı gaz formunda tankerlerle taşınabilmesi mümkündür. Sıvılaştırılmış ve gaz formundaki hidrojenlerin uygun tasarlanmış tanklarla karayolunda taşınabilmesi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır (Özgür, 2023).

### 4.3. Mevcut Boru Hatları ile Taşınması

Dünyada, hemen hemen tamamını büyük hidrojenin üreticilerinin işlettiği taşıma maksadıyla kullanılan 4500 km'den daha çok boru hattı vardır. Amerika Birleşik Devletleri Teksas ve Louisiana eyaletlerinde işletilen boru hatları en uzun boru hatları olup bu hattı Almanya ile Belçika'daki hatlar izlemektedir. Uzunluk sıralamasına göre dünya genelinde hidrojenin naklinde kullanılan boru hatları aşağıda Şekil 2'de verilmiştir (Dinçer vd., 2021).



Şekil 2- Hidrojen boru hatları genel durumu (Dinçer vd., 2021)

Teksas'ta bulunan 80 km uzunluğundaki boru hattı ve 1938'de Almanya'da Ruhr bölgesinde faaliyete başlayan ve hâlâ kullanılan 204 kilometrelik uzunluğa sahip, 15 atmosfer basınçla taşıma yapan boru hattını hidrojenin boru hattı ile taşınmasına örnek olarak verebilir (Ermiş, 2008).

Günümüzde aktif olarak kullanılan boru hatlarının birçoğu genellikle taşıma maliyetlerinin azaltılması maksadıyla kimyasal üretim yapan fabrikalar ile sanayi sektörünün gelişmiş olduğu bölgeler ve petrol rafinerilerine yakın yerlerde bulunmaktadır (Özgür, 2023).

#### 4.4. Hidrojenin Deniz Yoluyla Taşınması

Karbon salınımının azaltılması ve temiz bir çevre için kullanılan hidrojen enerjisinin taşınmasında kullanılacak olan uygun donanımlı gemilerin de hidrojeni yakıt enerjisi olarak kullanması mümkündür. Hidrojenin taşınmasında ağır tonajlı tankerlerin kullanımı henüz denenmemiştir. Fakat Amerika Birleşik Devletleri, Fransa, Belçika ile Norveç gibi gelişmiş ve tabiatı korumanın yollarından birisinin de temiz enerji kullanımı olduğuna inanan ülkeler hidrojen enerjisini, daha düşük tonajlı deniz araçları ile feribotlarda test etmiş ve olumlu sonuçlar almışlardır. Mevcut deniz araçlarında kapsamlı bir değişikliğe gidilmeden hidrojen enerjisinin kullanılması da başka bir avantajdır (Özgür, 2023).

#### 5. HİDROJENİN TAŞINMASINDA DOĞAL GAZ HATTININ ROLÜ

Günümüzde pek çok ülke fosil yakıtlar ile çevreye verdikleri zarardan kurtulmak, yenilenebilir ve temiz enerji kullanımını artırmak amacıyla doğal gazın taşındığı boru hatlarına belirli bir oranda hidrojenin enjekte edilmesi gibi ekonomik yöntemler uygulamaktadır. Ancak doğal gaz hattına karıştırılacak hidrojenin olası zararlı etkilerinin ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi için gerekli oranın tespiti ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Konu kapsamındaki en yeni proje Keele Üniversitesinin iki yılda tamamladığı HyDeploy Projesi olup bahse konu proje kapsamında yapılan çalışmalarda İngiltere’de kullanılan boru hatlarına yaklaşık %20 oranında hidrojenin enjekte edilebileceği tespit edilmiştir (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022).

Hidrojenin taşınmasında doğalgaz altyapısının kullanılması ile ilgili Almanya ve Avrupa birliği ülkelerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda hatta verilecek %5-%10’luk hidrojen miktarının doğal gaz boru hattına fazla zarar vermeyeceği değerlendirilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada ise hatta karıştırılacak hidrojen miktarının %10’un üzerinde olması durumunda basınç ünitelerinde ve kontrol elemanlarında değişikliklerin yapılması gerektiği, boru hatlarında kırılmalarında meydana gelebileceği ifade edilmektedir (Ali ve Farrok, 2024) .

Boru hattına karıştırılacak hidrojen oranının belirlenmesinde, hat inşa edilirken kullanılan malzemenin cinsi ve kalitesi, kullanım yoğunluğu, taşınacak miktar gibi hususların kritik önemi vardır.

Yirmi altı farklı ülkede doğal gaz boru hatlarına karıştırılacak hidrojen oranı üzerinde çalışmalar yapılırken Avrupa Birliği ülkelerinin asıl hedefinin 2040 yılında halihazırda doğal gaz boru hattı olarak kullanılan hatların tamamında hidrojenin taşınması olduğu ifade edilmektedir. Bu hedefin gerçekleşmesi için 2020 yılının temmuz ayında Avrupa ülkelerinden 23 gaz alt yapı firması yetkililerinden oluşan bir ekip 2040 yılına kadar yaklaşık 39.700

Kilometrelik “Avrupa Hidrojen Omurgası İnisyatifi” adındaki hidrojen boru hattı planladıklarını açıklamışlardır (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022). Bahse konu plan Avrupa birliği ülkelerinin önümüzdeki süreçte ihtiyaç duyacağı hidrojenin bu ağlar ile taşınmasını kapsamaktadır. Hidrojenin taşınması için oluşturulacak hattın %75’lik kısmının halen kullanılmakta olan boru hatlarının dönüşümüyle, geriye kalan %25’lik kısmının ise yeni tesis edilecek boru hatlarından oluşacağı belirtilmektedir (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022).

Yine temiz enerji kaynağı hidrojenin ihtiyaç duyulan yere karayolu vasıtasıyla taşınmasının yanında gaz formunda mevcut boru hatlarından faydalanarak da taşınabilmesi mümkünken, doğalgaz altyapısından faydalanılması konusunda da kapsamlı olarak araştırmalar yapılmaktadır. Hidrojenin taşınması maksadıyla tasarlanmış doğal gaz boru hattı aynı koşullarda %80 ila %90 arası verimlilikte çalışabilir (Atalmış, 2023).

Ülkemizde GAZBİR-GAZMER şirketlerince yürütülen “Cleangas” Türkiye adlı proje kapsamında da hidrojenin doğalgaz hattı kullanılarak emniyetli bir şekilde taşınması için hatta enjekte edilecek oranın tespiti üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu bahse konu proje kapsamında Konya’da devam eden çalışmalarda doğal gaz alt yapısının kullanılması halinde %20’ye kadar hidrojenin hatta verilmesi planlanmaktadır. Yapılan araştırmalar %20’lik oranın sisteme enjekte edilmesinin mümkün olabileceğini belirtmektedir (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022) .

## **6. TAŞIMA YÖNTEMLERİNİN KIYASLANMASI**

Sıvılaştırılmış hidrojenin taşınması, gaz formunda basınçlı kaplarla taşımayla kıyaslandığında yüksek yoğunluk sebebiyle daha fazla enerji sağlayacaktır. Yani hidrojenin sıvılaştırılarak taşınması gaz formunda taşınmasından daha verimlidir (Bayram, 2022).

Ayrıca ifade edilmesinde fayda olan bir başka husus da aynı uzunluk ve çaplardaki boru hatları karşılaştırıldığında doğal gaz hatlarının hidrojen boru hattına oranla kıyasla %10 ile %15 arasında daha ucuz olduğunu söylemek mümkündür (Özgür, 2023). Mevcut doğal gaz boru hatlarının hidrojen taşımaya elverişli hale getirilmesi için yapılacak masraf ile yeniden hidrojen boru hattı inşası için yapılacak harcama arasında göz ardı edilmeyecek kadar ciddi bir maliyet farkı vardır. Var olan hattın hidrojen taşımaya elverişli hale getirmesi için yapılacak harcama %50 ila %80 arasında bir maliyet azalmasına denk gelmektedir. Dolayısıyla mevcut hattın dönüştürülmesi maliyet açısından daha uygun görülmektedir (Özgür, 2023).

Düşük miktarlardaki kullanımlar için basınçlı tanklarda gaz formunda kamyonla taşıma bir tercih sebebidir. Ayrıca kamyonla taşıma sıvı halde ya da boru hatlarıyla taşınması ile kıyaslandığında, maliyeti düşük olduğu için

ve istenilen yer ve zamanda istenilen rotanın kullanması gibi konular de değerlendirildiğinde uygun bir seçenek olmaktadır. Mesafeler uzadıkça ve hacimler büyüdükçe ise hidrojenin sıvı formda taşınması ekonomik hale gelmektedir. Ancak çok daha fazla miktarda hidrojenin taşınması söz konusu ise bu durumda boru hattı şebekesinin kullanılması uygun bir hal tarzı haline gelmektedir (Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi, 2022).

Taşıma maliyetleri bakımından hidrojenin sıvı formda taşınması uzun mesafeli nakiller için uygun bir seçenek iken, kısa mesafe ve düşük miktarlardaki taşımalar için gaz formunda taşıma uygun hale gelmektedir. Çok daha büyük hacimlerde taşımalar içinse boru hatlarıyla taşıma daha avantajlı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Dinçer vd., 2021).

Genel anlamda taşıma yöntemlerinin kıyaslanmasını özetleyecek olursak;

-Boru hatlarıyla taşımanın büyük miktarlar ile uzun mesafelere güç iletilmesinde,

-Sıvılaştırılmış hidrojenin uzun mesafe taşımalarında,

-Sıkıştırılmış gaz formda taşımanın kısa mesafe ve düşük miktarların taşınmasında,

-Metal hidritin kısa mesafe taşımalarında uygun yöntem olduğu söylenebilir (Hidrojenin Taşınması, 2024).

## 7. HİDROJENİN TAŞINMASINDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

Hidrojen de tıpkı doğal gaz ile benzin gibi yanıcılık özelliği yüksek olan bir gazdır. Taşıma ve depolama esnasında hata yapılırsa yangın ya da patlama tehlikeleri sonucu ölüm veya yaralanma vakaları ile karşılaşılabilir. Bu sebeple yangın veya patlama sonucu meydana gelecek yaralanma ya da ölüm gibi kötü sonuçlarla karşılaşmamak, ayrıca karbon salınımının azaltılması ve sürdürülebilir hidrojen enerji sisteminin oluşturulması için ihtiyaç duyulan her türlü emniyet tedbiri alınmalıdır (Erdoğan, 2022).

Hidrojenin taşınması maksadıyla sıvılaştırılması veya sıkıştırılmış gaz halinde taşınması sızıntıya sebep olabilir. Bu durum ise yangın meydana gelmesine zemin hazırlar. Hidrojen alevinin zor görülür olması ise yangınla mücadeleyi zorlaştırır. Hafızalarda yer edinen en ciddi hidrojen yangını örneği LZ 129 Hindenburg zeplin faciasıdır (Gülten, 2022).

Hidrojen dağıtımındaki temel problemler hidrojenin saf olmaması ve yeteri kadar verimli olmaması şeklinde sıralanabilir. Hidrojenin dağıtım altyapısını sağlıklı olarak işletebilmek maksadıyla değişik teknolojilerin birbirlerine entegre edilmesi seçeneklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. İhtiyaç duyulan taşıma altyapısı hidrojen talebinde oluşacak arz ve talep dengesi ile gelişecektir (Dinçer vd., 2021).

Hidrojen taşınmasında karşılaşılan diğer problemler sızıntının önlenmesi veya minimize edilmesi ve altyapı kurulum maliyetinin fazla olması olarak sıralanabilir. İfade edilen problemlerin çözümü kapsamında Ar-Ge çalışmaları yapılmalı ve farklı teknoloji türlerinin birbirine entegre edilmesi yolları aranmalıdır (Karaman & Yapmaz, 2024).

Hidrojenin yakılmasıyla elde edilen kütleli ısı değeri yüksek olsa da hidrojen basınç altında ve gaz formunda taşındığı için taşıma hattına %20 'lik hidrojenin enjekte edilmesi, toplam enerji verimliliğinin %14 oranında düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca boru hatlarının karbon çelikten imal edilmiş olması hidrojenin taşınması maksadıyla bahse konu hatta %20 oranında hidrojen enjekte edilmesinin karbon çelik borularda zayıflamaya sebep olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Dedeoğlu vd., 2023). Hali hazırda kullanılan dağıtım ağları doğal gaz taşımak üzere tasarlandığı için çok sayıda vana basınç düşürme ekipmanı bağlantı parçaları ve ölçüm istasyonundan oluşur. Bu sebeptir ki kullanılan dağıtım alt yapısının hidrojen dağıtılması maksadıyla kullanılması pek de kolay olmayacaktır (Dedeoğlu vd., 2023).

Hidrojen taşınması maksadıyla oluşturulacak boru hatlarında esnek ve kırılabilir olmayan paslanmaz çelikler de kullanılmaktadır. Kullanılan malzemelerin pahalı olması yatırım maliyetlerinin de yüksek olması anlamına gelmektedir ki bu çok ciddi bir dezavantajdır (Gaz Fazında Hidrojen Taşıma Amaçlı Plastik Boru Sistemi Geliştirilmesi, 2017).

## **SONUÇ ve ÖNERİLER**

Hidrojenin yanıcılık özelliği yüksek olması sebebiyle taşıma ve depolama esnasında yangın ya da patlama tehlikeleri sonucu ölüm veya yaralanma vakalarına sebep olabilmektedir.

Hidrojenin sıvılaştırılması veya sıkıştırılmış gaz halinde taşınmasının sebep olabileceği sızıntıdan kaynaklı yangın meydana gelmesi halinde hidrojen alevinin zor görülür olması yangınla mücadeleyi zorlaştırmaktadır.

Hidrojen doğada saf olarak bulunmamaktadır. Taşıma hattına %20'lik bir hidrojenin karıştırılması, enerji verimliliği açısından %14 oranında bir kayba sebep olmaktadır. Ayrıca mevcut hattın emniyetli olarak işletilmesi için ilave emniyet tedbirlerinin alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Boru hatlarının karbon çelikten imal edilmiş olması sebebiyle %20 oranındaki hidrojenin enjekte edilmesi borularda zayıflamaya sebep olmaktadır.

Mevcut dağıtım ağları doğal gaz taşımak maksadıyla tasarlandığı için çok sayıda vana, basınç düşürme teçhizatı, bağlantı parçaları, emniyet valfleri bulunmaktadır.

Hidrojen taşınması maksadıyla inşa edilecek boru hatlarında esnek veya katlanabilir olmayan ancak pahalı paslanmaz çelikler de kullanılmaktadır.

Sonuç olarak yukarıda belirtilen durumların sebep olabileceği olumsuzlukların giderilebilmesi amacıyla faydası olacağı değerlendirilen öneriler aşağıda verilmiştir.

Taşıma ve depolama esnasında yangın ya da patlama tehlikeleri sonucu ölüm veya yaralanma vakalarını önlemek için risk değerlendirmesi kapsamında gerekli tedbirlerin alınması sağlanmalıdır.

Hidrojenin sıvılaştırılması veya sıkıştırılarak gaz halinde getirilmesi esnasında sızıntının önlenmesi için gereken koruyucu ve önleyici tedbirler alınmalıdır.

Hidrojenin dağıtım altyapısını emniyetli ve verimli olarak işletebilmesi için gerekli emniyet tedbirlerinin alınması sağlanmalı, alt yapıyla ilgili değişik teknolojilerin birbirlerine entegre edilmesi kapsamında Ar-Ge çalışmalarına hız verilmelidir. Yeşil enerjinin son kullanıcıya ulaştırılması kapsamında tedarik edilmesi, taşınması, sırasında hatta verilecek hidrojenin karışım oranı, enjekte edilme şekli ve emniyetli olarak kullanılması konusunda gerekli olan standartların oluşturması gerekir.

Karıştırılan hidrojenin boru hattında korozyona sebep olmaması veya zararın azaltılması için gerekli koruyucu veya önleyici tedbirlerin alınması sağlanmalıdır.

Hali hazırda kullanılan dağıtım alt yapısının, hidrojenin emniyetli olarak taşınmasında kullanılması amacıyla yetkili kamu kurumu ve özel sektör temsilcileri ile üniversitelerin ilgili bölümlerinden teknik yardım alınması sağlanmalıdır.

Hatta karıştırılacak hidrojenin borulara zarar vermesinin engellenmesi ve hattın emniyetli bir şekilde kullanılmasına imkân veren daha ekonomik malzemelerin kullanılması için gerekli tedbirlerin alınması sağlanmalıdır.

Düşük karbon salınımı sağlayan temiz enerji kaynağı hidrojenin üretilmesi, depolanması ve nihai tüketiciye ulaştırılması amacıyla yapılması gereken her türlü yasal düzenlemelerin mevcut iş sağlığı ve güvenliği kanununa ithal edilmesi gerekmektedir.

## **KAYNAKÇA**

Ali, S., & Farrok, O. (2024). Recent updates on hydrogen transportation., in Hydrogen Energy Conversion and Management. Hydrogen energy storage and transportation challenges

Altınsoy, Y. (2024). Hidrojen Depolama ve Taşıma. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü,

Atalmış, G. (2023). Bakır Kaplı ve Genişletilmiş Doğal Grafit Katkılı Lani5 Hidrojen Depolama Malzemesi Geliştirilmesi.(T.C. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı ) Erişim: Yöktez.

- Aytaş, R. (2017). Hidrojen Depolama ve Taşıma. [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/43604/mod\\_resource/content/0/Hafta7-Hidrojen%20enerji%20tüketimi%20-1.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/43604/mod_resource/content/0/Hafta7-Hidrojen%20enerji%20tüketimi%20-1.pdf) adresinden alındı
- Aziz, M. (2021). A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety .Liquid Hydrogen Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 153-8505, 14(18), 5917; <https://doi.org/10.3390/en14185917>.
- Bayram, Ö. (2022). Hidrojen Depolama Maddesi Olarak Hidrazin Boran Kompleksinin Katı Hal Sentezi ve Dehidrojenasyonu .(Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı). Erişim: Yöktez.
- Bektaş, B., Hakyemez, C., Yanık, D. Ö., & Yıldızca, O. (2021). TSKB Türkiye Sınayi ve Kalkınma Bankası Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu. <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/hidrojen-enerjisi-bilgilendirme-notu-120721.pdf> adresinden alındı
- Dedeoğlu. (2023). Hidrojen Taşınmasında Doğal Gaz Ağının Rolü. 242. Sayı: [https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/1156/hidrojen-tasinmasinda-dogalgaz-aginin-rolu\\_32760.html](https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/1156/hidrojen-tasinmasinda-dogalgaz-aginin-rolu_32760.html) adresinden alındı
- Dedeoğlu, V., Gökalp, İ., & Topal, Y. E. (2023). Hidrojen Taşınmasında Doğal Gaz Ağının Rolü Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İktisat Bölümü ve Bilim ve Teknoloji Politikası Araştırmaları Merkezi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kakine Mühendisliği Bölümü. Ankara
- Değirmenci, H. (2022). Havalimanlarında Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen Tedarik Zinciri Senaryoları ve Analizlerii. Eskişehir, Türkiye.
- Dinçer, İ., Eroğlu, İ., & Öztürk, M. (2021). Hidrojen Teknolojileri Derneği. Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası İstanbul.
- Enerji Depolama Teknolojileri Hidrojen Enerjisi. (2022, Mart). [www.ideaport.org.tr](http://www.ideaport.org.tr) adresinden alındı
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023, Mayıs). Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı Öncül Proje Yatırım Programı.Ankara.<https://ttgv.org.tr/media/2024/02/65b8eb1b7ab0c.pdf>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. adresinden alındı
- Erdoğan, A. (2022). Hidrojen Tedarik Zincirinin Modellenmesi ve Türkiye Örneği. ( T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Programı . İstanbul) Erişim: Yöktez.
- Ermış, İ. (2008). Temiz Enerji Yayınları Hidrojen Enerjisi .[https://habitatdernegi.org/wp-content/uploads/2023/06/Y\\_O\\_Hidrojen.pdf](https://habitatdernegi.org/wp-content/uploads/2023/06/Y_O_Hidrojen.pdf) adresinden alındı

- Gaz Fazında Hidrojen Taşıma Amaçlı Plastik Boru Sistemi Geliştirilmesi. (2017, 07 01). Proje Adı: HITAP. <https://mirarge.com/projeler/tamamlanan-projeler/hitap>
- Gülten, G. (2022, 8 3). Hidrojen Enerjisi . <https://www.piagrid.com/rehber/hidrojen-enerjisi> adresinden alındı
- Hakyemez, C., Tangüner, E., Yıldızca, O., & Altan, U. (2023). Enerji Çalışma Grubu. <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/bilgi-notu-guncelleme-hidrojen-enerjisi-final.pdf> adresinden alındı
- Hidrojen Taşıma. (2024). <https://www.pepperl-fuchs.com/turkey/tr/47679.htm> adresinden alındı
- Hidrojenin Taşınması. (2024). <https://www.bilgiustam.com/hidrojenin-tasinmasi/> adresinden alındı
- Hilooğlu, S. (2018). Riskleri ve Ekonomik Kullanımları Açısından Türkiye'ye Geçiş Yapan İstilacı Sulak Alan Bitkisi Eichhornia Crassipes. Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences, 1(2), s. 128-137.
- Karaman, S., & Yapmaz, A. (2024). Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı ve Geleceği. <https://www.ekolojika.com/hidrojenin-yakit-olarak-kullanimi-ve-gelecegi/> adresinden alındı
- Kılıç, F. (2023). Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi. (T.C. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı Alternatif Yüksek Lisans Tezi) Erişim: Yöktez .
- Kyoto.Protokolü. (1998). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi [https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto\\_protokol.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto_protokol.pdf) adresinden ulaşılmaktadır.
- Mercan, M. (2023). Basıncılı Hidrojen Silindirin Dolum Sürecinde Başlangıç Basıncı ve Giriş Sıcaklığının Son Sıcaklığa ve Depolanan Hidrojen Kütlesine Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisans Tezi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Ankara, Türkiye. Erişim Adres: Yöktez.
- Omar, Faye& Szpunar, Jerzy (2022) A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy 47(80)DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.02.112)
- Ömeroğlu, M. (2020). Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilirlik Üzerindeki Rolü. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi Yıl:19 Sayı:39 Güz:2020/3, s. s.1069-1087.
- Özgür, S. (2023). Türkiye'nin Enerji Arz Güvenliğinde Yeşil Hidrojen Potansiyeli. MEF Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Siyaset Bilimi ve Uluslararası İlişkiler Anabilim Dalı Uluslararası Güvenlik ve Strateji Çalışmaları Yüksek Lisans Programı Yüksek Lisans Tezi. AYDIN.Erişim Adresi: Yöktez.

- Pascal, T. (2022). Different methods of storing, transporting, and distributing Hydrogen. <https://www.structuresinsider.com/post/different-methods-of-storing-transporting-and-distributing-hydrogen> adresinden alındı
- Sünbül. (2022). MgNi esaslı Hidrojen Depolayan Şeritlerin Üretilmesi Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora tezi. Trabzon.(Erişim :Yöktez)
- Ural, T., & Karaca, G. (2016). Hidrojen Ekonomisi. Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi e-ISSN: 2149-2735 Cilt 3: Sayı:2 Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla, s. 145-154.

# HİDROJENİN DEPOLANMASI

**Seçkin ÇELİK**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0001-5120-225X

## GİRİŞ

Küresel ısınma ve hava kirliliği toplumun önemli endişesi olması nedeniyle bilim insanlarının çalışma konusu olmuştur. Ulaştırma sektöründe fosil yakıtların tercih edilmesi, aşırı kullanımı sonucu petrol sızıntıları ve hava kirliliği meydana gelmektedir. Hava kirliliği yoğun nüfuslu yerlerde ve tüm canlıların sağlığını tehdit etmektedir. Son dönemlerde meydana gelen petrol sızıntıları sulu ortamlarda uzun bir süre yıkıcı etkisini sürdürmektedir. Endüstriler çevre kirliliğine sebep olmaları sonucu fosil yakıtlar yerine daha temiz alternatifler bularak varlıklarını devam ettirmelidir. Hidrojen, çevre dostu olması nedeniyle farklı yakıt olarak önemini korumaktadır. Hidrojen, ısı ve elektrik gibi yararlı enerji türlerine dönüştürülebilen mükemmel bir enerji kaynağıdır (Kaviani vd., 2018)

Fosil yakıtların alternatifi olan yenilenebilir enerjileri içinde yer alan Hidrojen, Yunancada "İdrogono" kelimesinden türetilmiş olup su ve doğuran sözcüklerinin birleşimidir. (etimolojiturkce, 2024). Sembölü H olup atom sayısı 1 olan ametaldir. Zehirsiz olup havadan 14,4 kat hafiftir. Renssiz, kokusuz, yanıcı ve tatsız özelliklere sahiptir. Bol miktarda bulunmakla birlikte evren kütlesinin %75'ini oluşturmaktadır (Comakli, 2011).

Hidrojen yeryüzünde element formda bulunmamaktadır. Bu sebeple birinci enerji kaynağı sağlayarak üretim yapılabilmektedir. Kullanılan birinci enerji kaynağının yöntemi ve girdisi hidrojenin rengini belirlemektedir.

Örneğin fosil yakıtların değişimi sonucu elde edilen hidrojen Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) tutma görevi ile üretildiği için “mavi hidrojen” olarak adlandırılmıştır. Hidrojenin elektroliz yöntemi ile sudan üretilmesi sera gazları ve emisyon üretimine sebep olmaması nedeniyle yeşil hidrojen ismi ile tanımlanmaktadır (Altınsoy, 2024).

Hacim bazında benzinin yoğunluğu 32 MJ/L iken sıvı hidrojenin yoğunluğu 8 MJ/L'dir. Kütle bazında durum tersinedir. Benzin 44 MJ/kg ve hidrojen 120 MJ/kg enerjiyi kapsar. Hidrojen maliyetinin uygun (0.75 \$/kg hidrojen) ve verimli (% 83) olması sebebiyle SMR (Steam Methane Reforming) yöntemi ile işlenmektedir. SMR yönteminde doğal gaz (metan) ve su buharı, katalitik reaksiyonlarla karbonmonoksit ve hidrojen gibi gazlara dönüştürülür. SMR'nin endüstriyel sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir alternatif yöntemler geliştirilmektedir. Hidrojen yüksek enerji hacminde olmasına rağmen düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Enerji yoğunluğu sıvılaştırma ve sıkıştırma işlemleriyle artırılabilir. Bu işlem maliyeti artırmaktadır. Hidrojen, geniş bir dağıtım ağı aracılığıyla taşınabilmektedir. Bu taşıma, boru römorkları, gaz boruları, sıvılaştırılmış kriyojenik tanklar ve diğer boru hatları gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. (Khandan vd., 2020).

Hidrojenin güvenli koşullarda, uygun maliyetle depolanması önemli bir konudur. Hidrojenin özellikle yakıt pili ile çalışan araçlarda depolanması zordur. Bu zorluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

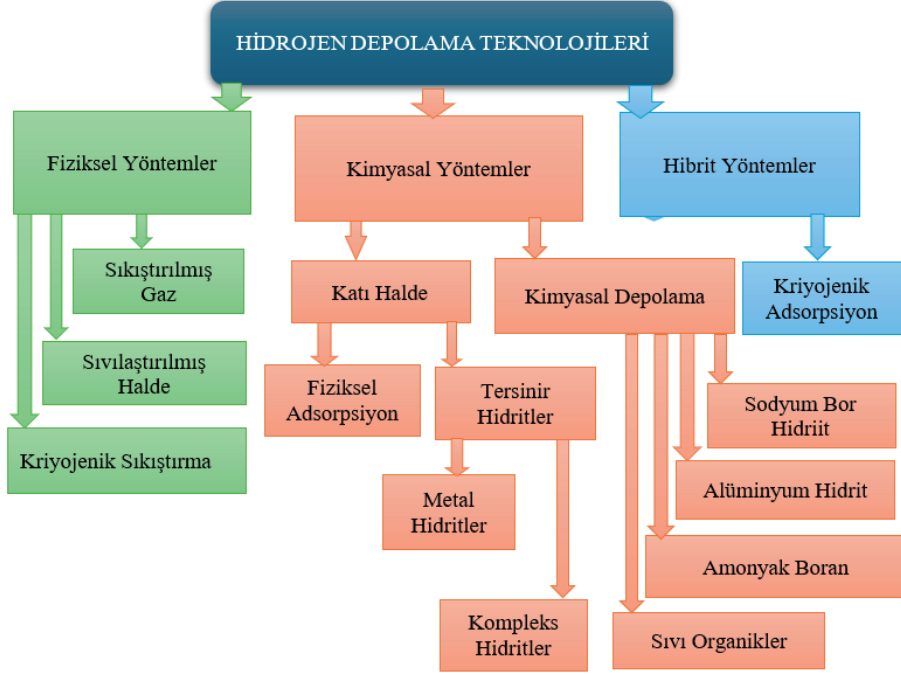
1. Hidrojenin yüksek basınçta depolanması: Normalde 350 ila 700 bar arasında depolanması gerekir. Bu yüksek basınç, tankların güvenli ve dayanıklı olmasını gerektirir.
2. Hidrojenin sıvı halde depolanması: Hidrojenin daha konsantre bir biçimde depolanması için sıvılaştırılması gerekebilir. Ancak sıvılaştırma işleminde enerji yoğun ve pahalıdır (Khandan vd., 2020).
3. Kaybolma riski: Hidrojen küçük bir molekül olduğundan depolama sırasında sızıntı riski vardır. Bu, performans ve güvenlik sorunlarına neden olabilir (Khandan vd., 2020).
4. Malzeme Uyumluluğu: Hidrojen çoğu metali zayıflatabilir veya hidrojeni emerek yapısal özelliklerini değiştirebilir. Hidrojen tankları ve boruları için malzeme seçimi bu nedenle önemlidir (Khandan vd., 2020).

Hidrojeni, sıvı fazda hidrojen depolama, katı hal hidrojen depolama ve kimyasal hidrojen depolama gibi özel fiziksel teknolojilerle kullanabiliriz. En verimli teknoloji sıkıştırılmış hidrojen depolama yöntemidir (Koşar, 2021).

## 1. HİDROJEN DEPOLAMA UYGULAMALARI

Var olan yakıtlar içerisinde hidrojen kalorisi en yüksek yakıt olma özelliğini taşımaktadır. Hidrojenin havaya göre hafif element olması, 1 gram hidrojen

gazının normal atmosfer basıncında 11 litrelik hacim kaplaması hidrojen depolamanın zorluğunu göstermektedir. Depolanan hidrojen metotlarına göre enerji yoğunlukları farklılık göstermektedir. Hidrojenin fazla miktarda depolanması için uygun yöntemlerin olmayışı depolama çalışmalarının önemini artırmaktadır (Demirocak, 2017). Hidrojenin enerji yoğunluğu ve miktarı dikkate alınarak farklı depolama metotları Şekil 1’de gösterilmiştir (Koşar, 2021).



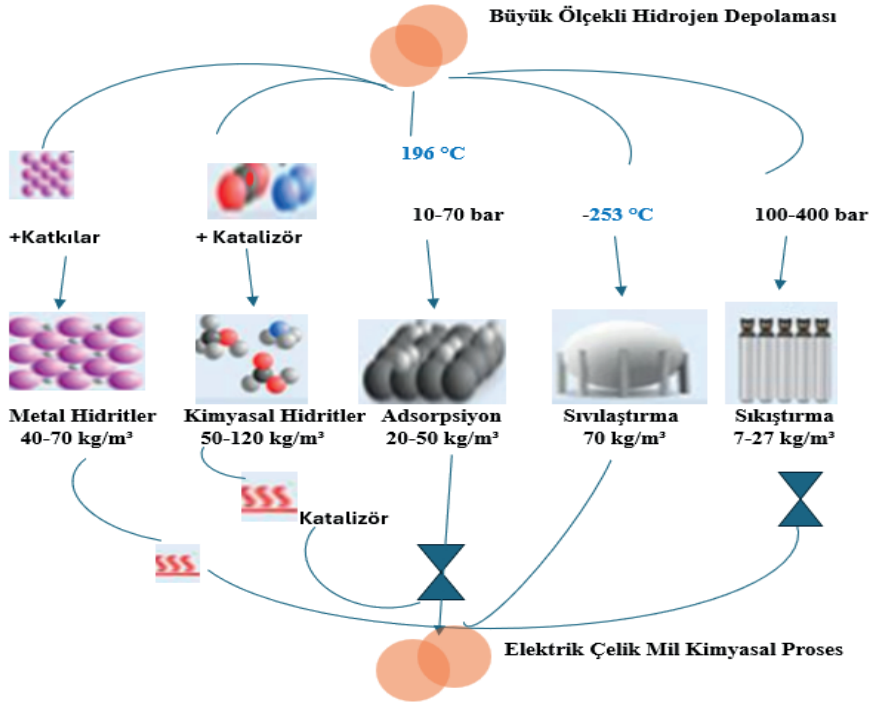
Şekil 1. Hidrojen Depolama Teknolojileri (Koşar, 2021)

Hidrojen miktarı ve enerji yoğunluklarına göre depolama yöntemleri değişiklik göstermektedir.

Hidrojenin depolanmasında en önemli husus hidrojen ile depolandığı kabın malzeme özelliğinden kaynaklanacak etkileşime bağlı sınıflandırma yapılmasıdır. Bu etkileşimler kimyasal yol ile bağlanabilme (adsorbe olabilir), gaz veya sıvı halde depolanabilme, Van Der Waals bağları ile bağlanabilen ya da emilime uğrayan form olmak üzere üç ayrı türde depolanabilir (Khalil, 2018). Metal hidrit ve kimyasal hidritleri metal atomları bulundurmaları sebebiyle kimyasal yol ile bağlanan depolama teknolojilerine örnek verilebilir. Metaller arası hidritler ve hidrojen elementel metal hidritler bir atom iyonuna direk bağlı olabileceği gibi bir metal atomunun kompleks bir bölümünü meydana getirebilir. Hidritler; nitrojen, oksijen, karbon, hidrojen ve bor gibi metalik olmayan elementler ile bütünleşebilir (Khalil, 2018).

Hidrojenin, yüksek ısı değere sahip olmasına rağmen hacimsel yoğunluğunun düşük olması depolanma ve taşınmasında zorluklara sebep

olmaktadır (Khalil, 2018). Şekil 2’de hidrojenin ölçeğine göre depolanma hacimleri verilmiştir.



Şekil 2. Hidrojen Depolama Metodolojisi (Khalil, 2018)

Moleküler hidrojen 32,97 K ile sıvı formda düşük kritik sıcaklığa sahiptir. Kritik sıcaklık bir gazın sıvı ve gaz fazı arasındaki ayrımın belirsizleştiği sıcaklığı temsil eder. Bu sebeple moleküler hidrojenin sıvı halde tutulması için çok düşük sıcaklıklara, ihtiyaç duyulur. Bu düşük sıcaklık hidrojenin depolanması ve taşınmasında özel dikkat gerektirmektedir. Bu sıcaklık sebebi ile hidrojenin enerji teknolojisindeki gelişmesi zorlaşmaktadır. Hidrojenin depolama şartları kullanımında sınırlandırıcı hal almaktadır. Enerji gereksiniminde hidrojen ulaşım amaçlı kullanılmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanmasında hidrojenin depolama metotları önemli ihtiyaçlar arasında yer almaktadır (Khalil, 2018).

Hidrojen depolama tekniklerinden güncel teknoloji olan sıkıştırma ve sıvılaştırma mevcut durumda sınırlı olarak sunulmaktadır. 10.000 psi basınç altında 500 km’lik sürüş özelliğine sahip gaz formunda bulunan hidrojen küçük araçta büyük bir alan kaplayabilir. Bu da hidrojenin depolanması için büyük tanklara ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Bu durum, hidrojenin gaz formunda depolanması ve taşınmasının dezavantajlarından biridir. Sıvılaştırılmış hidrojen, aynı kriterlerde hacimsel alanın yarısından fazlasını kaplarken, içerdiği enerjinin %30 ile %40’ını kaybeder. Hidrojeni fiziksel olarak emen veya kimyasal olarak bağlayan malzemeler, rijit (katı) yapıların kullanımıyla uygulanabilir. Bu tür malzemeler, hidrojen emilimi ve depolanması ya da depolama alanındaki malzemeler olarak adlandırılır (Altınsoy, 2024).

1. Fiziksel emilim: Bu yöntemde hidrojen molekülleri malzemenin yapısına gömülür veya adsorbe edilir. Adsorpsiyon, hidrojenin malzeme yüzeyinde moleküllere bağlanması sürecidir. Bu yöntem, hidrojeni gözenekli karbon malzemeleri veya metalik organik çerçeveler gibi malzemelerde depolamak için kullanılabilir (Altınsoy, 2024).
2. Kimyasal bağlanması: Bu yöntemde, genellikle hidrojen bir metal hidritler ya da metal amidler oluşturur. Bu tür malzemeler, hidrojeni daha yoğun bir şekilde depolamak için kullanılır. Kullanılan malzeme yüksek yoğunluktaki hidrojenin var olan yakıt hücreleri ile uyum sağlaması esnasında 70- 100°C sıcaklıkta şarj ve salma döngüsünü tersine çevirebilme ve minimum enerji ile katkıda bulunabilmesi özelliği taşımalıdır. Uygun depolama ortamlarının ağırlık, kullanım ömrü, güvenlik ve maliyet gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir (Altınsoy, 2024).

### 1.1. Fiziksel Yöntemler (Basınçlı Depolama)

Basınçlı depolama yöntemleri olarak bilinen ve hidrojenin sıkıştırılması prensibine dayanan depolama yöntemi günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır (Durbin, 2013). Sıkıştırılmış yüksek basınçlı tanklarda hidrojen fiziksel olarak muhafaza edilmektedir (Roes & Patel, 2011).

Hidrojen depolama tankları dört standart tipte sınıflandırılmaktadır.

Tip I çelik olmak üzere metal bir özellikte ağır olup endüstride kullanılmaktadır. Tip I tanklar, 200-300 bar basınç altında % 1 hidrojen depolama özelliği taşır. Bu, tankın toplam hacminin yaklaşık %1'i kadar hidrojen depolanabileceği anlamına gelir (Okonkwo vd., 2003) .

Tip III, Tip I tanka göre hafif, metal astarlı çemberlerden sarılmış güçlü yapılardır. Bu tankların yapımında cam elyaf ya da karbon fiber gibi kompozit malzemeler kullanılır. Bu malzemeler, çelik gibi metalik astarlarla kaplanarak desteklenir ve güçlendirilir. Tip III tanklar, içlerindeki hidrojeni yüksek basınç ile 350-700 bar basınç aralığında çalışırlar. Kompozit malzemelerin kullanımı, tankın ağırlığını azaltırken güç ve dayanıklılığını artırabilir. Bu nedenle, Tip III tanklar, daha hafif ve daha güçlü olmaları sebebiyle Tip I tanklara göre tercih edilebilirler. Metal astar alüminyumdan yapılmış olup mekanik direnci % 5 artırmaktadır. Karbon fiber kompozit reçineye gömülü olup yük taşıyan bileşendir. Tip III silindirler, Tip I ve II silindirlere göre % 25-75 arasında kütle kazancı sağlamaktadır. Bu sebeple araç kullanımında tercih edilmekle birlikte maliyeti yüksektir (Okonkwo vd., 2003).

Tip III kaplar metal astarlı kompozit silindir yapıları ile geçirgenlik bariyerlerine sahiptirler. 450 Bar basınca kadar Tip III silindirlerin basıncının güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Tip I ve II depolama silindirleri hidrojen kırılabilirliği ve ağırlıklarına bağlı düşük depolama özellikleri ile araç uygulamalarında tercih edilmezler

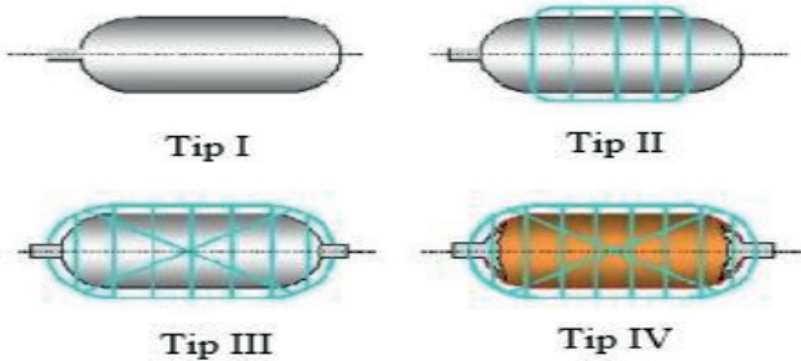
(Okonkwo vd., 2003). Depolamak amaçlı kullanılan tank çeşitlerine göre yoğunluk ve maliyet değerleri Tablo 1’de belirtilmiştir.

**Tablo 1.** Depolama Silindirleri Türlerine Göre Yoğunluk ve Maliyet Değerleri (Langmi vd., 2022)

Silindir Türü	Gravimetrik Yoğunluk (% ag.)	Maliyet(\$/kg)
Tip I	1,7	83
Tip II	2,1	86
Tip III	4,2	700
Tip IV	5,7	633

Tip IV kaplar, yüksek yoğunlukta polietilen plastik astarlı kompozite sahip sadece hidrojen geçirgenliği bariyeri sağlamaktadır. Dört basınçlı kap türleri hafif olmalarından dolayı araç uygulamalarında kullanılırlar. Karbon lifleri maliyeti yüksektir. Depolama kabı maliyelerinin %75’ini oluşturur.

Kompozit epoksi matrisinde karbon cam ya da karbon fiber kaplamasına sahip basınçlı kap türleri Şekil 3’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Dört Basınçlı Kap Türleri (Tzimas vd., 2003)

Basınçlandırılmış hidrojen, enerji üretimi ve taşıma uygulamalarında yer almaktadır. Yüksek miktarda hidrojen depolanan tesislerde yakıt pili “Fuelcell” tabanlı güç üretimi ve araçlar için yakıt ikmal tesisleri kullanılmaktadır. Hidrojen içeriğindeki kimyasal enerjinin elektrokimyasal tepkime yolu ile elektrik enerjisine dönüştürülmesinde yakıt pilleri kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin depolama kapasiteleri uygulamanın türüne göre farklılıklar göstermekle birlikte üretimde 10-1.000, dağıtım ve ikmal istasyonları için 50-100 ton, mertebesinde olabileceği tahmin edilmektedir (Tzimas vd., 2003).

Hidrojeninde düşük seviyede kayıpları, hızlı dolum sağlamak için yereli seviyede dolum tankları gerekmektedir. Bu dolum tankları hidrojenin yerel depolama alanında daha verimli depolanmasını ve dağıtılmasını sağlar. Düşük maliyete sahip ve depolama kapasitesi fazla olan yüksek basınçlı kaplar tercih edilmektedir (Koşar, 2021).

### 1.1.1. Sıkıştırılmış Gaz Halinde Depolama

Hidrojenin atmosferik basınçta hacmi gr/11 litre ve kütlesi 0,089 gram olduğundan, gaz halinde depolanması çok fazla basınç ve hacim gerektirir. 50 litrelik silindirik tanklarda 200-250 bar basınçta depolanır. 50 litrelik kaplarda depolandığında kütlesinin düşük olması enerji yoğunluğunun düşük olmasına neden olur. Bu da hidrojenin depolanması için gereken alanın artması ve depolama tanklarının boyutlarının büyük olmasını gerektirir (Koşar, 2021).

Gerekli durumlarda bu basınç 600-700 bar seviyesine kadar çıkabilmektedir. Hacimsel enerji yoğunluğunun düşük olmasının yanı sıra, yüksek basınçları nedeniyle silindirler oldukça ağırdır. Bu sadece hidrojenin verimliliğini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda maliyetini de artırır ve nakliyesini zorlaştırabilir (Sabaz, 2018).

Hacimsel olarak yoğunluk 11-12 kg/m<sup>3</sup>, gravimetrik yoğunluk %1,5 civarındadır. Kompozit tanklarda Tablo 2' deki seviyeler dikkate alınmaktadır. Hidrojeni yakıt olarak kullanan araçlar dizel ya da benzinli araçlarda olduğu gibi 500 km menzile sahip olmalıdır. Silindir içinde 4-7 kg hidrojen depolanması ile bu menzil gerçekleşmektedir. Araç modeli, tasarımı ve verimliliği, hidrojenin depolanma şekli ve tank teknolojisi gibi unsurlar, bir aracın menzilin ve genel performansını etkileyebilir. Otomotiv sektöründe sıkıştırılmış gaz yöntemi ticari amaçla kullanılmıştır (Hamilton, Baker, Staubitz ve Manners, 2009). Basıncı gaz yöntemi ile depolanan hidrojenin enerji yoğunluğu ve miktarlarına göre depolama yöntemleri Tablo 2'de verilmiştir (Koşar, 2021).

**Tablo 2. Hidrojenin Enerji Yoğunluğu ve Miktarlarına Göre Depolama Yöntemleri (Koşar, 2021)**

Depolama Türü	Depolama Biçimi	Gravimetrik Kapasite <sup>1</sup> (wt.%)	Volumetrik Kapasite (g/L)
Kimyasal	Kompleks Hidrit	1,9-2,5	16-28
	Kimyasal Hidrit	2,6-3,5	22-29
	Karbon (Poroz)	2,9-3,1	13-15
Fiziksel	Sıvı	4,8-6,8	31-39
	Sıkıştırılmış (700 Bar)	2,6-4,4	19-25
	Sıkıştırılmış (350 Bar)	2,8-3,8	16-18
Hibrit	Kriyojenik Sıkıştırılmış	5,0-5,8	28-38

1 Kütlesindeki değişiklikleri ölçerek bir maddenin konsantrasyonunu veya kütlesini belirlemeye yönelik laboratuvar yöntemi (Khalil, 2018).

Basıncı gaz tekniği ile hidrojen depolama en iyi bilinen yöntemdir. Oda sıcaklığı ve yüksek basınca dayalı tanklarda depolanır (Rivard vd., 2019). Tank ağırlığı ve tipi dikkate alınarak %7'ye kadar ağırlığınca hidrojen depolanabilir (Rivard vd., 2019). Hidrojen yapısı gereği basınç altında olduğu takdirde oda sıcaklığında depolanabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (150 K'nin altında) kriyojenik ve "kriyojenik" depolamaya yönelik araştırmalar devam etmektedir. Makinelerin ve depolama odalarının kullanımı, hidrojeni basınç altında depolamanın ana yoludur. Bu yöntem, yer üstü ve yer altı tanklarında depolamaya olanak sağlar. 10-12 kg/m<sup>3</sup> olan çelik bir tankın hacmi ve yoğunluğu yaklaşık %1,5'tir (Elberry vd., 2021). Hidrojen gazının sızdırmazlık önlemi için yüksek maliyet ve üstün kalite içeren conta kullanımı, kompozit maddeler ile teması ve atmosferik basıncın 200 katı gibi yüksek basınçta muhafaza edilmesi maliyeti artıracığı için dezavantajlar içinde yer almaktadır. Hidrojenin hacimsel depolama verimliliği Tablo 3' te karşılaştırılmıştır (Rivard vd., 2019).

**Tablo 3.** Hidrojenin hacimsel depolama verimliliği  
(Rivard vd., 2019)

Depolama Yöntemi	Depolama özellikleri	Hacimsel Depolama verimi
Basıncı H <sub>2</sub>	10000 psi	~ 39 g H <sub>2</sub> /L
	5000 psi	~ 23 g H <sub>2</sub> /L
Sodyum Borohidrit	Ağırlıkça % 30'luk çözelti	~63 g H <sub>2</sub> /L
Sıvı H <sub>2</sub>	Kriyojenik	~ 71g H <sub>2</sub> /L

Hidrojen gaz halinde depolandığında çok fazla enerji kullanılır. Hidrojenin %12'si 35 MPa hidrojeni depolamak için kullanılır. 70 MPa basınca sahip bir silindirde hidrojenin %15'i tüketilmektedir. Sıkıştırma işlemi, hidrojen tankının soğutulması ve basınç ve sıcaklığın güvenli seviyelerde tutulmasıyla gerçekleştirilir. Isıtma işlemi elektrik maliyetini artırır. Her bir sıkıştırma ve soğutma işleminin maliyeti dikkate alındığında sıvılaştırma maliyetinden daha pahalı olduğu söylenmektedir (Zhou, 2005).

### 1.1.2. Sıvılaştırılmış Halde Depolama

Hidrojenin büyük kapasitede depolanması gerektiğinde hidrojenin sıvılaştırılması gerekmektedir. Çok yüksek hidrojen depolama yoğunlukları atmosferik basınçta elde edilebilir. Hidrojen gazının sıcaklık değerlerinin düşmesi kriyojenik forma dönüşmesini sağlamaktadır. (Dicks & Rand, 2018). Sıkıştırılmış hidrojen depolama işleminde hacimsel ve basınç yönünden yüksek değerlere ihtiyaç vardır. Kriyojenik depolama da kaynamadan dolayı kayıplar oluşabilmektedir. Kriyo-sıkıştırılmış depolama yöntemlerinde bu zorluklar azalmaktadır. Hidrojenin sıvı formunda depolanması yoğun enerji gerektirmektedir. Hidrojenin düşük kaynama noktası (1 bar basınç -253 °C)'na

sahip olması ve yaklaşık  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde sıcaklıklarda kısma işlemleri esnasında hidrojen gazının soğumaması ve sıvılaştırma işlemi sıvı nitrojenin buharlaşması ile ön soğutma işleminin yapılması gerekliliğidir (Valenti, 2015). Sıvılaştırılmış hidrojeni depolamak için izole edilmiş kaplar kullanılmaktadır. Bu kaplar yüksek basınç ve kriyojenik sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Bu özel kaplar sayesinde güvenlik sorunları ve depolama kapasitelerine yönelik sorunlar azalmaktadır. Bu kaplar ile sıvılaştırılmış hidrojen 20 K sıcaklıkta sıkıştırıldıktan sonra depolanan kapsama gücü atmosferik basınç altında  $70\text{ gL}^{-1}$  hacimsel ağırlıktan 240 bar basınç ile  $87\text{ gL}^{-1}$  hacimsel ağırlığa yükseltilebilir (Godula vd., 2012).

Yalıtılmış kabın yüksek basınçları tutma özelliği ile tank içindeki basıncın kriyojenik depolama durumundan daha fazla artmasına imkân sağlar. Dinlenme süresini uzatır ve depolama yoğunluğunu artırır kaynama kayıplarını azaltır. Sıkıştırılmış hidrojen depolama 700 bar basınçta yapılırken kriyo-sıkıştırılmış depolama yönteminde basınç değeri  $<300$  bar altında gerçekleşmektedir. Kullanılan alt yapı ve maliyet bakımından sınırlamalar vardır. Kullanılan depo kabı, karbon fiber kompozit (Tip III) ile sarılmış bir alüminyum (AL) astardan oluşmaktadır. Çevreden ısı transferini engellemek amacıyla, metal ve plastik levhadan oluşan bir katman ile dışı paslanmaz çelikten yapılmış bir dış kaplama bulunmaktadır. (Tzimas vd., 2003).

Sıvı hidrojen içeren tanklar, basınç tahliye vanaları, patlama diskleri, tahliye vanaları ve araç koruma cihazları gibi güvenlik cihazlarıyla donatılmıştır. Tank valfi, tanktaki hidrojen su basıncını güvenli bir noktaya tahliye eder. Tankta aşırı miktarda sıvı hidrojen depolanması, basınç tahliye vanasının arızalanmasına veya hidrojenin kaçmasına neden olabilir. Bu nedenle tahliye valfi hattına bir fren diski takılabilir. Tanktaki basınç tahliye vanası tarafından kontrol edilir. Basınç tahliye vanasında ayarlanan basıncı aşarsa vana arızalanabilir (Aziz, 2021).

Yapılan çalışmalar hacimsel performansı artırmayı amaçlamaktadır. 1 bar basınç ve 20 K ( $-253,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sıvı hidrojen elde etmenin iki koşuludur. 1 bar basınçta  $71\text{ kg/m}^3$  sıvı hidrojen depolanabilmektedir. Bu koşullar altında hidrojeni sıvı halde tutmak zor olmaktadır. Hidrojenin çözünmesi sırasında meydana gelen enerji kaybının %40'ı çözünme kabında, %10'u ise depolama sürecinde gerçekleşir. (Kaviani vd., 2018). Buharlaşma sırasında bir miktar hidrojenin kaybolduğu varsayıldığında, sıvı halde depolanan hidrojenin yoğunluğu, depolama sistemine bağlı olarak değişen artan basınçla birlikte azalabilir. Hidrojen içeren tank malzemeleri düşük sıcaklıklarda kırılma eğilimiyle araçlara verilen hasar riskini artırabilir. Bu teknoloji, satış ve toplu depolama uygulamalarının yanı sıra eyaletler arası nakliye ve kamyon taşımacılığında da kullanılmaktadır. Örneğin, kriyojenik tanklarla 5.000 kg hidrojen taşınabilir; bu, sıkıştırılmış hidrojen tankı taşıyan bir römorka göre beş kat daha yüksek bir kapasite sunar.(Kasım, 2023).

### 1.1.3. Kriyojenik Gaz Yöntemi ile Sıkıştırma

Kriyojenik gaz ile sıkıştırma, hidrojenin yüksek basınçta ve  $-140^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda depolanmasına yönelik bir işlemdir. Hidrojenin gaz haline sıkıştırılması  $-233^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşir. Kriyojenik tanklar, hidrojenin aktif olmama süresini uzatan yüksek basınç kapasitesine sahiptir. (Aceves, 2010). Vakum koruması sayesinde kriyojenik depolama, yüksek güvenlik standartlarını karşılamaktadır. Kriyojenik depolamanın avantajları arasında hızlı ve verimli yakıt dağıtımı ile yüksek depolama yoğunluğu bulunmaktadır. Kriyojenik sıkıştırılmış hidrojen depolama yöntemi, yüksek gravimetrik yoğunluk ve kütle yoğunluğu sunarak kaynama kayıplarını azaltır (Tablo 1). Ancak, altyapı gereksinimlerinin ve maliyetlerin yüksek olması, bu teknolojinin geliştirilmesi için çalışmaların devam etmesini gerektirmektedir (Demirocak, 2017). Farklı hidrojen depolama yöntemlerinin içerdiği özelliklerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir (Kasım, 2023).

**Tablo 4.** Farklı Özellikteki Hidrojen Depolama Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajlarının Kıyaslanması (Kasım, 2023)

Hidrojen Depolama Yöntemleri	Hacimsel Özgül İçerik	Maliyet	İşlem Kolaylığı	Güvenlik	Taşıma Elverişliliği	Teknik Seviye
Yüksek basınç gaz	Küçük	Düşük	Kolay	Tehlikeli	Uygun	İyi
Kriyojenik sıvı	Büyük	Çok yüksek	Zor	Tehlikeli	Daha Uygun	Çok iyi değil
Malzeme bazlı hidrojen depolama	Büyük	Düşük	Kolay	Tehlikeli değil	Çok uygun	Daha iyi

Tablo 4' te yüksek basınçlı gaz depolama borularının hidrolik basınç sınırı 70 MPa, enerji yoğunluğu ise 4,4 MJ/L'dir. Sıvı hidrojen depolamanın toplam enerjisi 8,4 MJ/L'dir ve bu gaz hidrojen depolamanın yaklaşık iki katını oluşturmaktadır. Sıvılaştırma işlemi enerji tüketir ve maliyetleri artırır. Bu nedenle hidrojen depolama yöntemleri arasında hidrojen bazlı depolama, hidrojenin büyük miktarda toplanması, güvenli kullanımı, pratik depolama ve taşıma yöntemi, düşük çalışma sıcaklığı ve düşük işletme basıncı nedeniyle ilgi görmekte ve araştırılmaktadır. (Kasım, 2023).

### 1.2. Kimyasal Hidrojen Depolama Yöntemleri (Kasım, 2023)

Hidrojen ile depolama malzemesi arasında güçlü etkileşimden kaynaklanan (Tersinir Hidritler) ve zayıf etkileşimden kaynaklanan adsorpsiyon malzemelerine bağlı olarak katı formda hidrojen depolama yöntemleri iki

grupta incelenir. Tersinir Hidritler kendi içinde kompleks ve metal hidritler olmak üzere iki bölümde incelenir (Kasım, 2023).

### 1.2.1. Katı Halde Kimyasal Yöntemler Kullanılarak Yapılan Depolama

#### 1.2.1.1 Fiziksel Adsorpsiyon

Bazı kaynaklar, karbon tüplerinde hidrojen depolamanın fiziksel emilim olduğunu öne sürmektedir. Bunlar amorf (aktif karbon), gözenekli malzemeler ve zeolitler (organize yapılar) dahil olmak üzere organik ve inorganik malzemelerdir. Fiziksel adsorpsiyon depolaması, hidrojenin Van Der Waals kuvvetlerine dayalı adsorpsiyon yoluyla gözenekli bir malzemenin yüzeyi ile temas etmesi durumunda meydana gelir. Gözeneklerin boyutu, hacmi ve yüzey alanı sayesinde toplam enerji içeri depolanır Fiziksel adsorpsiyon, karbon fiber, aktif karbon ve karbon tüpler kullanılarak yapılmaktadır (Kasım, 2023).

Karbon fiberler, 5 ila 500 nm çapında ve 5 ila 100 µm uzunluğunda, tek yönde düzenlenmiş grafit parçacıklarıdır. Aktif karbon gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu yapılarda hidrojenin depolanması için yüksek basınca ihtiyaç vardır. Karbon fiber; küçük boyutu ve pürüzsüz yüzeyi kullanıma uygun hale getirir. Karbon tüplerin sağlamlığı nedeniyle içindeki gözeneklerde hidrojen sıvı ve gaz formda depolanabilmektedir (Şenyer, 2013).

#### 1.2.1.2. Tersinir Hidritler

##### A. Metal Hidritler

Hidrojen depolama yöntemlerinden biri de metal hidritler kullanmaktır. Bu yöntem, hidrojen atomlarının metal atomlarıyla birleşerek metal hidritler oluşturması prensibine dayanır. MgH<sub>2</sub> çalışma sıcaklıkları Tablo 5'te belirtilmiştir (Koşar, 2021).

**Tablo 5.** En Çok Çalışılan Metal Hidritlerin Bazı Özellikleri (Koşar, 2021)

Hidritler	Metaller	Kapasite (wt.%)	1bar H <sub>2</sub> için sıcaklık(°C)
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	LaNi <sub>5</sub>	1,37	12
FeTiH <sub>2</sub>	FeTi	1,89	-8
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	Mg <sub>2</sub> Ni	3,59	255
ZrMn <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ZrMn <sub>2</sub>	1,77	440
MgH <sub>2</sub>	Mg	7,60	279

Metal hidritler, hidrojenin yüksek yoğunlukta ve güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar, ancak bazı dezavantajları da vardır (Koşar, 2021).

Metal Hidritlerin Çalışma Prensipleri: Hidrojen gazı, öncelikle metalin yüzeyine adsorbe olur ve ardından hidrojen atomları metal yüzeyinden kristal kafese doğru göç eder. Bu süreç, metal atomlarıyla birleşerek metal hidritler (örneğin,  $MgH_2$ ) oluşumuna yol açar. Hidrojen atomlarının metalin kristal yapısına dahil olmasıyla metal hidritler meydana gelir. Bu süreç, metalin yapısına ve hidrojenle etkileşim mekanizmalarına bağlı olarak farklılık gösterebilir.

$MgH_2$  (Magnezyum Hidrit) Depolama Kapasitesi: Ağırlıkça %7,6 hidrojen depolayabilen  $MgH_2$ , metal hidritler arasında en yüksek hidrojen kapasitesine sahip olanlardan biridir (Koşar, 2021).

Kimyasal Bağlar:  $MgH_2$ , hem iyonik hem de kovalent bağlar içerir, bu da onun kimyasal stabilitesini ve hidrojen depolama kapasitesini etkiler (Koşar, 2021).

### **Avantajlar ve Dezavantajlar**

**Avantajlar:** Metal hidritler, özellikle  $MgH_2$  gibi bazı bileşikler, yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Bu yapılar, hidrojenin güvenli ve kararlı bir şekilde depolanmasını mümkün kılar.(Şenyer, 2013).

**Dezavantajlar:** Hidrojenin metal hidritten serbest bırakılması genellikle yüksek sıcaklık gerektirir, bu da enerji maliyetlerini artırır (Şenyer, 2013). Metal hidritlerin gravimetrik enerji yoğunluğu, diğer hidrojen depolama yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Bu, taşınabilir enerji depolama sistemlerinde dezavantaj oluşturabilir (Şenyer, 2013).Metal hidritler, hidrojen depolama için güvenli ve etkili bir yöntem sunar.  $MgH_2$  gibi bazı metal hidritler, yüksek hidrojen kapasitesine sahiptir, ancak yüksek çalışma sıcaklıkları ve düşük gravimetrik yoğunlukları gibi dezavantajları da bulunur. Bu nedenle, metal hidritlerin pratik uygulamalarda kullanımı, bu dezavantajların minimize edilmesi ve avantajlarının optimize edilmesi üzerine odaklanmaktadır (Koşar, 2021).

### **B. Kompleks Hidritler**

Kompleks hidritler, hidrojen depolama teknolojilerinde önemli bir alanı temsil eder. Bu tür hidritler, yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahip olmalarına rağmen geri dönüşüm süreçlerindeki zorluklar nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Ancak, araştırmalar ve geliştirilen yeni yöntemler bu dezavantajların üstesinden gelmeye çalışmaktadır (Öztürk, 2003).

Kompleks hidritler, genellikle geri dönüştürülemedikleri için pratik hidrojen depolama uygulamalarında kullanışlı değildir. Depolama ve serbest bırakma süreçlerindeki kararlılık sorunları, bu tür hidritlerin sınırlamalarını oluşturur.

NaAlH<sub>4</sub> ve Katalizör Kullanımı:1997'de Schwickardi ve Bogdanovic, NaAlH<sub>4</sub>'nin (sodyum alüminyum hidrit) bir çapraz metal katalizör ilavesiyle daha verimli bir şekilde dekompoze edilebileceğini keşfetmişlerdir. Bu keşif,

hidrojenin daha düşük sıcaklıklarda ve daha kontrollü bir şekilde serbest bırakılmasını ortaya çıkarmıştır.

**Li-N ve Magnezyum Bazlı Borohidratlar:** Li-N (Lityum-Nitrojen) ve magnezyum bazlı borohidrat bileşikleri üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir. Bu bileşikler, yüksek hidrojen kapasitesi ve potansiyel olarak daha iyi geri dönüşüm özellikleri sunar

**Na<sub>2</sub>LiAlH<sub>6</sub> Üzerine Çalışmalar:** Na<sub>2</sub>LiAlH<sub>6</sub> (sodyum lityum alüminyum hidrit) ve sodyum ile alüminyum hidrit konsantrasyonları üzerinde yapılan çalışmalar da bu alandaki araştırmaların bir parçasıdır. Bu çalışmalar, bu kompleks hidritlerin depolama kapasitelerini ve pratik uygulamalarını geliştirmeyi amaçlamaktadır (Öztürk, 2003).

### **Avantajlar ve Dezavantajlar**

**Avantajlar:** Kompleks hidritler, yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir, bu özellik kompleks hidritleri potansiyel enerji depolama çözümleri için cazip duruma getirir. Katalizörlerin kullanımı, hidrojen serbest bırakma süreçlerinin verimliliğini artırabilir.

**Dezavantajlar:** Kompleks hidritlerin geri dönüşümü, pratik uygulamalarda önemli bir engeldir. Hidritlerin hidrojen serbest bırakma süreçleri genellikle yüksek sıcaklık gerektirir, bu durum enerji maliyetlerini artırabilmektedir.

Kompleks hidritler, hidrojen depolama teknolojilerinde büyük potansiyele sahiptir. NaAlH<sub>4</sub> gibi bileşiklerin katalizörler kullanılarak daha verimli bir şekilde ayrıştırılması, bu alandaki önemli ilerlemelerden biridir. Li-N ve magnezyum bazlı borohidratlar gibi yeni bileşikler üzerine yapılan araştırmalar, daha iyi geri dönüşüm özellikleri ve yüksek hidrojen depolama kapasiteleri sunarak bu teknolojinin gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak, geri dönüşüm zorlukları ve yüksek çalışma sıcaklıkları gibi dezavantajlar, bu teknolojinin pratik uygulamalara entegrasyonu için aşılması gereken önemli engeller arasında yer alır.

### **1.2.2 Kimyasal Depolama**

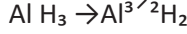
Kimyasal depolama yöntemleri tersinir değildir. Alüminyum Hidrit, Amonyak Boran, Sodyum Bor Hidrit ve sıvı organiklerin kullanımı ile depolanabilmektedir.

#### **A. Alüminyum Hidrit ( AlH<sub>3</sub>)**

Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı araçlarda alüminyum alaşımlarının kullanımı, özellikle alüminyum hidrit (AlH<sub>3</sub>) içermesi nedeniyle oldukça tartışmalı bir konudur. Alüminyum hidrit, yüksek hidrojen içeriği ve belirli avantajlarına rağmen, bazı teknik ve pratik zorluklar nedeniyle kullanımında dikkat gerektirir (Graetz, 2009).

## **Alüminyum Hidrit (AlH<sub>3</sub>) Özellikleri ve Kullanımı**

Hidrojen İçeriği: Alüminyum hidrit (AlH<sub>3</sub>), ağırlıkça %10'a kadar hidrojen içerebilir. Bu oran, yaklaşık olarak 148 gr/L'lik bir yoğunluğa denk gelir, bu da AlH<sub>3</sub>'ün hidrojen depolama kapasitesini oldukça yüksek yapabilir.



Al H<sub>3</sub> kendini düzenlemesi gerekmektedir. Doğrudan kendini düzenleyebilmesi için oda sıcaklığında (~ 700MPa) basınca ihtiyaç duyabilmektedir (Graetz, 2009).

Enerji Gereksinimi ve Reaksiyon: AlH<sub>3</sub>, hidrojen vermek üzere ısı girişi ile reaksiyona girer ve bu süreçte hidrojen gazı serbest bırakılır. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan enerji miktarı (~7 kJ/mol), belirli bir miktarda ısı girişini gerektirir. Bu özellik, AlH<sub>3</sub>'ün hidrojen depolama ve serbest bırakma süreçlerinde enerji verimliliği açısından dikkat edilmesi gereken bir faktördür (Graetz, 2009).

### **Avantajlar ve Dezavantajlar**

**Avantajlar:** AlH<sub>3</sub>'ün yüksek hidrojen yoğunluğu, onu hidrojen depolama için cazip bir seçenek haline getirir. AlH<sub>3</sub>, uygun koşullarda kararlı bir bileşiktir ve depolama sırasında hidrojen sızıntısı gibi sorunlar yaşanmayabilir (Graetz, 2009).

**Dezavantajlar:** Hidrojen serbest bırakılması için gerekli olan ısı enerjisi (~7 kJ/mol), enerji verimliliği açısından dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Hidrojenin serbest bırakılması sırasında gerekli olan yüksek sıcaklık ve enerji maliyetleri, pratik uygulamalarda zorluklar yaratabilir.

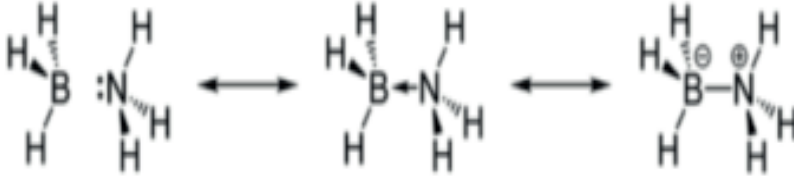
### **Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı**

Hidrojen yakıtlı araçlarda alüminyum alaşımlarının kullanımı, özellikle hafiflik ve mukavemet gibi mekanik avantajlar sağlar. Ancak, alüminyum hidrit içeren alaşımların kullanımı, yukarıda belirtilen enerji gereksinimleri ve pratik zorluklar nedeniyle dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Hidrojen yakıtlı araçlarda alüminyum alaşımlarının kullanımı, alüminyum hidrit (AlH<sub>3</sub>) içermesi nedeniyle çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunabilmektedir. Yüksek hidrojen yoğunluğu ve kararlılığı, AlH<sub>3</sub>'ü cazip kılarken, enerji gereksinimleri ve pratik uygulama zorlukları bu bileşiğin kullanımını sınırlayabilir. Bu nedenle, hidrojen yakıtlı araçlarda alüminyum alaşımlarının kullanımı, dikkatli bir mühendislik değerlendirmesi ve optimizasyon gerektirmektedir.

## **B. Amonyak Boran**

Amonyak Boran patlayıcı, yanıcı olmayan beyaz bir kristal özelliğindedir. Kütlesinin %19,6'sını hidrojen oluşturmaktadır. Düşük molekül ağırlığına (30,87 g/mol) sahiptir ve toksik değildir, bu nedenle depolama malzemesi olarak kullanılır. Suda çok çözünür fakat sulu çözeltilerde stabildir. Uygun

katalizör kullanılarak oda sıcaklığında 1 mol amonyum borandan 3 mol H<sub>2</sub> (g) elde edilmektedir (Yıldız, 2019).



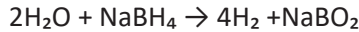
Şekil 4- Amonyum Boran Kompleksi Molekül Yapısı (Yıldız, 2019).

Amonyum boran (NH<sub>3</sub>BH<sub>3</sub>), çeşitli yollarla elde edilebilecek potansiyel bir hidrojen depolama ve hidrojen üretimi kaynağıdır. Bu yöntemler arasında solvoliz (hidroliz ve metanoliz), piroliz ve dehidrojenasyon gibi kimyasal yöntemler yer almaktadır.

1. Solviz (hidroliz ve metanoliz): Solvioliz, amonyak borandan hidrojen uzaklaştırma proseslerinden biridir. Hidrojenasyon, amonyum boranın suyla reaksiyona girerek hidrojen ve borik asit oluşturduğu kimyasal bir işlemdir. Metanoliz, amonyak boranın metanol ile reaksiyona girerek hidrojen, boran ve metil borat gibi ürünler oluşturduğu bir işlemdir.
2. Piroliz: Amonyakın ısıtılarak hidrojen ve boran gibi ürünler oluşturulduğu işlemdir. Bu işlem genellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve bu da verimli hidrojen ekstraksiyonu için önemlidir.
3. Eliminasyon: Amonyum boranın eliminasyonu, hidrojeni uzaklaştırmanın başka bir yöntemidir. Bu işlem, amonyak boranın bir katalizör yardımıyla ısıtılarak hidrojen ve boran gibi ürünlerin oluşturulmasıyla gerçekleşmektedir.

### C. Sodyum Borohidrit

Sodyum borohidür (NaBH<sub>4</sub>) bir hidrojen depolama bileşimidir. NaBH<sub>4</sub> hidrojenasyon reaksiyonuyla hidrojen açığa çıkarabilir. Doyma reaksiyonunda NaBH<sub>4</sub> su ile reaksiyona girerek hidrojen gazı (H<sub>2</sub>) ve sodyum hidrojen (NaOH) üretir. Şu şekilde ifade edilebilir.



Bureaksiyonhidrojenimuhafazaetmekvetransferi için kullanılabilir. Özellikle suyun bulunduğu sistemlerde hidrojeni depolamak için kullanılabileceği gibi, su ilave edilerek de elde edilebilir. Sodyum borohidürün (NaBH<sub>4</sub>) kimyasal özellikleri, hacim ve ağırlığa göre yüksek düzeyde hidrojen tutmasına olanak tanır. NaBH<sub>4</sub> su ile reaksiyona girerek hidrojen gazı (H<sub>2</sub>) ve sodyum hidrojen (NaOH) üretir. Bu reaksiyonda bor atomları ve hidrojen atomları kullanılarak hidrojeni depolayacak NaBH<sub>4</sub> molekülleri oluşturulabilir. Bu nedenle NaBH<sub>4</sub>, hidrojen depolama için yararlı bir seçim olarak kullanılmaktadır. Tablo 6' da sıkıştırılmış H<sub>2</sub>, sıvı H<sub>2</sub>, NaBH<sub>4</sub> depolama özellikleri, yöntemleri ve hacimsel depolama verimi bakımından karşılaştırılmıştır.

**Tablo 6. Sıvı, Sıkıştırılmış Hidrojen, Sodyum Borohidrit'e Ait Depolama Bilgileri**

Depolama Özellikleri	Depolama Yöntemi	Hacimsel Depolama Verimi
Kriyojenik	Sıvı H <sub>2</sub>	~71g H <sub>2</sub> /L
Ağırlıkça % 30'luk Çözelti	NaBH <sub>4</sub>	~63g H <sub>2</sub> /L
5000 psi	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub>	~23g H <sub>2</sub> /L
10000 psi		~39g H <sub>2</sub> /L

NaBH<sub>4</sub> ağırlıkça %2,9-7,5 arasında ağırlığa, %10.8 hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. H<sub>2</sub>O ve NaBH<sub>4</sub> reaksiyonları esnasında iki temel sorun gelişmektedir. İlki, Yavaş reaksiyon hızına sahip olmaları, ikincisi NaBO<sub>2</sub> ve NaBH<sub>4</sub> sudaki düşük çözünürlüğü olmasıdır (Netskina vd., 2021). NaBH<sub>4</sub> diğer uygulamalara göre avantajlı olduğu görülmektedir.

#### D. Sıvı Organikler

Sıvı organik hidrojen (LOCH) taşıyıcıları, hidrojeni moleküler formda depolamaya yönelik yöntemlerdir. Hidrojen su olarak kolaylıkla taşınabilir. Gerekli miktarı ısıtılıp reaksiyon bölmesine gönderilmektedir. LOCH ağırlıkça %6-8 oranında hidrojen depolayabilmektedir. LOCH'de hidrojen depolaması, karbon çift bağlarının tersinirliğine ve hidrojenasyonuna bağlıdır. Harici bir reaksiyon oluşturan hidrojen çift sınırı tamamlar. Bu olay yüksek basınç ve sıcaklıklarda meydana gelir

Sıvı organik hidrojen taşıyıcıları (LOHC'ler), hidrojeni kimyasal olarak bağlayarak depolama ve taşımayı sağlayan bir teknolojiye dayanmaktadır. Bu taşıyıcılar, hidrojen moleküllerini kimyasal olarak bağlayan sıvı organik bileşiklerdir. LOHC'ler, genellikle hidrojenasyon ve dehidrojenasyon süreçleri ile çalışır. LOHC'lerin özellikleri ve çalışma prensibi aşağıda belirtilmiştir.

1. Hidrojen Depolama: LOHC'ler ağırlıkça %6-8 oranında hidrojen depolayabilir. Bu durum LOHC'leri yoğun enerji depolama çözümleri arasında cazip duruma getirebilir.
2. Kimyasal Yapı: LOHC'lerin depolama kapasitesi, karbon çift bağlarının tersinir hidrojenasyonu ve dehidrojenasyonuna bağlıdır. Yani, hidrojen atomları organik bileşiklere eklenebilir (hidrojenasyon) ve tekrar serbest bırakılabilir (dehidrojenasyon) .
3. Hidrojenasyon işlemi genellikle yüksek basınç ve sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Dehidrojenasyon benzer şekilde yüksek sıcaklık ve bazen yüksek basınç gerektirebilmektedir.
4. Taşıma ve Kullanım: Hidrojen taşıma sürecinde, LOHC'ler sıvı formda oldukları için mevcut sıvı yakıt altyapısı kullanılarak taşınabilir.

Bu, hidrojenin taşınması ve depolanması sırasında güvenlik ve lojistik avantaj sağlar. Kullanım noktasında, LOHC'ler ısıtılarak veya katalitik bir reaksiyonla hidrojen serbest bırakılır ve istenen reaksiyon bölgesine gönderilebilir (Graetz, 2009).

### **Avantajlar ve Dezavantajlar**

**Avantajlar:** LOHC'ler, sıvı halde olduklarından ve hidrojen kimyasal olarak bağlandığından, hidrojenin gaz formunda taşınmasından daha güvenlidir. Mevcut sıvı yakıt depolama ve taşıma altyapısı kullanılabilir, bu durum ek yatırım maliyetlerini azaltabilmektedir.

**Dezavantajlar:** Hidrojenasyon ve dehidrojenasyon süreçleri yüksek enerji gerektirebilir. Kimyasal bağlama ve serbest bırakma işlemleri sırasında enerji kayıpları meydana gelebilir. LOHC'ler, hidrojen ekonomisi için önemli bir bileşen olarak kabul edilir, çünkü güvenli, verimli ve mevcut altyapı ile uyumlu bir şekilde hidrojen depolama ve taşıma çözümü sunabilmektedirler. (Yıldız, 2019).

### **1.3. Hibrit Yöntemler**

#### **1.3.1. Kriyojenik Adsorpsiyon**

Kriyojenik adsorpsiyon hidrojeni muhafaza etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, hidrojenin yüksek basınç ve düşük sıcaklıkta (kriyojenik sıcaklık) gözenekli bir malzemeye (adsorban olarak bilinir) dahil edilmesinden oluşur. Bu işlem, hidrojenin sıvı halde depolanmasına yönelik bir yöntemdir ve genel olarak gözenekli malzemelerin emme kapasitesi ile ilgilidir. Gözenekli malzemelerin emme kapasitesi, depolama kapasitesini belirlemek için yeterli bir özelliktir. Bu direnç malzemenin gözenek boyutu ve yüzey alanı gibi faktörlere bağlıdır. Tesis sıcaklığı depolama kapasitesini etkileyen diğer bir faktördür. Kriyojenik adsorpsiyon sistemleri, hidrojeni düşük sıcaklıklarda sıvı formda depolayarak hidrojenin hacimce depolanmasına olanak tanır. Bu nedenle kriyojenik adsorpsiyon, hidrojen depolama teknolojileri arasında önemli bir alanı oluşturabilmektedir.

## **SONUÇ VE ÖNERİLER**

Hidrojen, enerji depolama ve taşıma amacıyla kullanılan bir yakıt olduğundan, hidrojenin basit, güvenilir ve verimli bir şekilde depolanması önemlidir. Hidrojenin depolanması pahalı olduğundan hidrojenin üretilmesi ve depolanması günümüz ortamlarında büyük bir sorundur.

Hidrojenin sıkıştırılmış gaz olarak depolanması, uygun bir yöntem olmakla birlikte çeşitli zorluklar içermektedir. Yüksek basınçlı tankların üretimi ve bakımı maliyetli olup, hidrojeni sıkıştırmak için gereken enerji, performansı sınırlamaktadır. Ayrıca, sıkıştırılmış hidrojenin taşınması ve dağıtımı özel ekipman ve güvenlik protokolleri gerektirmektedir. Bununla birlikte, hidrojen

depolama teknolojisi sürekli gelişmekte ve sıkıştırma tekniklerinin yanı sıra hafif ekipman tanklarının ve güvenlik sistemlerinin iyileştirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Bu ilerlemeler sayesinde, hidrojen enerji sistemlerinin gelecekte daha uygun maliyetli ve yaygın bir hale gelmesi beklenmektedir.

Hidrojen geleceğin yakıtı ve özellikle ulaştırma sektöründe büyük potansiyele sahip bir enerji aracı olarak değerlendirilmektedir. Hidrojen depolama bu potansiyelden faydalanmak için önemli bir teknolojidir. Hidrojenin sıkıştırılmış gaz yöntemi ile muhafaza edilmesi sık kullanılan bir yöntem olup avantajları bulunmaktadır. Bu yöntemde sıkıştırılan hidrojen 350 ile 700 bar basınç arasında muhafaza edilir. Sıkıştırma işlemi hidrojenin enerji yoğunluğunu artırarak daha küçük bir hacimde daha fazla enerjinin depolanmasına olanak tanır. Araçlarda kullanılan depolama tanklarının boyutu ve ağırlığı küçük olduğundan bu durum özellikle mobil uygulamalar için önemlidir.

Sıkıştırılmış hidrojen gazını muhafaza eden silindirler yüksek basınçlara dayanıklı malzemelerden yapılmıştır. Karbon fiber gibi kompozit malzemelerin kullanılması bu tankları hafif ve güçlü kılmaktadır. Ayrıca bu tankların güvenliğini sağlamak için çeşitli güvenlik önlemleri bulunmaktadır. Örneğin basıncın yüksek olduğu durumlarda gazın düzgün bir şekilde salınmasını sağlayan vanalar ve sensörler kullanılmaktadır.

Hidrojen, teknolojinin kullanımı sayesinde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ile üretilebilir. Bu durumda enerji hidrojen formunda depolandıktan sonra elektrik yakıtı olarak kullanılabilir. Depolama teknolojisi seçimi maliyet, dayanıklılık gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Sıkıştırılmış hidrojen, sıvı hidrojen, metal hidrit ve kimyasal depolama dahil olmak üzere birçok farklı depolama teknolojisi mevcuttur. Bu teknolojilerin seçimi depolama maliyetlerini etkileyecek ve kapasite gereksinimlerini karşılayacaktır. Bu nedenle ekonomik ve verimli hidrojen depolamayı sağlamak için farklı teknoloji ve yöntemlerin kullanılması önemlidir.

Hidrojen ekonomisine başarılı bir geçiş için sadece teknolojik ilerlemenin değil, hükümet politikalarının, ekonomik teşviklerin ve toplumsal farkındalığın da önemli rol oynayacağını unutmamalıyız. Hükümetler hidrojen altyapısına yatırım yaparak ve araştırma ve geliştirmeyi destekleyerek bu geçişi hızlandırabilir. Ayrıca emisyon düzenlemeleri ve karbon vergileri gibi politika araçları, hidrojenin fosil yakıtlara kıyasla rekabet gücünü artırabilir. Yeni hidrojen teknolojilerinin ticarileştirilmesi sırasında ekonomik teşvikler önemlidir. Bu teşvikler özel sektörün bu alana yatırım yapmasını ve yeni su bazlı ürünlerin piyasaya sürülmesini teşvik edebilir. Bu şekilde hidrojen teknolojisinin maliyetini düşürmek ve geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmak mümkündür. Tüketicilerin yakıtlı elektrikli araçlar ve diğer hidrojen teknolojileri

hakkında eğitilmesi bu teknolojilere olan talebi artıracaktır. Ayrıca çevre üzerindeki olumlu etkilerinin farkındalığı tüketici tercihlerini değiştirebilir ve daha sürdürülebilir seçeneklere geçişi kolaylaştırabilir.

Son olarak hidrojen enerji sistemlerinin yükselişi uluslararası iş birliği ile yapılmalıdır. Ülkeler arasındaki enerji politikalarının yakınlaşması, hidrojenin küresel bir enerji taşıyıcısı olmasını sağlayacaktır. Bu iş birliği aynı zamanda hidrojen üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi de sağlayabilir ve hidrojenin dünya çapında adil bir şekilde dağıtılmasını destekleyebilir. Hidrojen ekonomisine geçiş karmaşık bir süreçtir. Ancak bu süreç yeni teknolojiler, siyasi destek, ekonomik teşvikler ve daha fazla sosyal farkındalık ile var olabilir. Hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak potansiyeli, gelecekteki enerji ortamının şekillenmesinde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Abbas, H. F., & Daud, W. M. (2010). Hydrogen production by methane decomposition: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1160–1190, 2010, doi:10.1016/j.ijhydene.2009.11.036 (Erişim Tarihi: 18.04.2024).
- Aceves, S.M. (2010). High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(3):1219-1226.
- Altınsoy, Y. (2024). Hidrojen Depolama ve Taşıma. Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler. Chapter 1. (pp.429-441) Publisher: Serüven Yayınevi.
- Aziz, M. (2021). Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. *Energies* 14(18):5917 DOI:10.3390/en14185917.
- Comaklı, K. v. (2011). Sıcak su üretimim için baca gazı atık enerjinin kullanımı. 10.2339/politeknik.418849. 124, 43-51. ( <https://doi.org>. Tesisat Mühendisliği Dergisi
- Demirocak. (2017). Hydrogen Storage Technologie. “Hydrogen Storage Technologies,” *Nanostructured Mater. Next-Generation Energy Storage Convers. Hydrog. Prod. Storage, Util.*, pp. 117–142. doi: 10.1007/9783-662-53514-1.Util., pp. 117–142.
- Dicks, A. & Rand, D. A. (2018). Fuel cell systems explained. Hoboken, NJ, Wiley. Wiley, USA.(Erişim Tarihi 04.10.2024).
- Durbin, D. M.-J. (2013). Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *Int. J. H. Hydrogen Energy* 38 (34), 14595–14617( Erişim Tarihi: 13.03.2024).

- Elberry, A.M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio A, & Larmi. M., (2021) Large scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 15671-15690.
- etimolojiturkce. (2024). <https://www.etimolojiturkce.com/kelime/hidrojen> (Erişim Tarihi: 10.03.2024) adresinden alındı
- Godula-Jopek, A., Jehle, W., & Wellnitz, J. (2012). *Hydrogen storage technologies: new materials, transport, and infrastructure*. John Wiley & Sons.
- Graetz, J. (2009). "2009 Renewable Energy issue energy research New approaches to hydrogen storage," no. 1, 2009, . doi: 10.1039/b718842k.
- Hamilton, Baker, Staubitz, & Manners. (2009). "B–N compounds for chemical hydrogen storage," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 279–293, 2009, doi: 10.1039/b800312m. (Erişim Tarihi:02.04.2024).
- Kasım, A. K. (2023). *Element Modifiye Edilmiş CNC, BNNC ve ALNC Yapılarının Hidrojen Depolama ve Sensör Özelliklerinin Yoğunluk Fonk. Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi*, (Erişim Adresi: Yöktez)
- Razmi. J., Babazadeh. R., & Kaviani. M.A. (2018). Optimisation of dynamic hydrogen supply chain network. A mathematical programming approach. *International Journal of Applied Management Science* 10(3):192. DOI:10.1504/IJAMS.2018.093801(
- Khalil, Y. (2018). Science-based framework for ensuring safe use of hydrogen as an energy carrier and an emission-free transportation fuel. *Process Saf. Environ. Protect.* 117, 326–340.
- Khandan, R., Ünver, Ü., Adıgüzel, Enes., & Çivi, S, (2020). Türkiye'deki iklim bölgelerine göre binalarda ısı yalıtım uygulamaları. *İstanbul. Cilt: 1 Sayı: 2, 171 - 187.*, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/imctd/issue/59372/805008>.
- Koşar, C. (2021). *Hydrogen Storage Methods*. *Open Journal of Nano* (2021) 6–1 Hydrogen Storage Methods.
- Langmi, H.W., Engelbrecht, N., Modisha, P.M. & Bessarabov D (2022). *Hydrogen storage. Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications.* Elsevier, 455-486. (Erişim Tarihi:11.04.2024).
- Netskina, Tihon, Filippov, Oksana, Komova, Valentina, & Simagina. (2021). Hydrogen generation by both acidic and catalytic hydrolysis of sodium borohydride. Short communication. From the journal *Catalysis for Sustainable Energy*.
- Okonkwo, P.C., Barhoumi, E.M., Ben Belgacem, I., Radwan, A.B. & Shakoob, R.A. (2023) A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process. *International Journal of Hydrogen Energy* (Article in press) (Erişim Tarihi: 22.03.2024).

- Öztürk, M. G. (2003). - Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama. 9f3cd308f1455b3\_ek.pdf. (Erişim Tarihi: 22.04.2024).
- Rivard E., Trudeau M., & Zaghbi K. (2019). Hydrogen storage for mobility: A review, *Materials*, A review, *Materials*, , 12, 1 – 22.
- Roes, A., & Patel, M.K. (2011). Ex-ante environmental assessments of novel technologies–Improved caprolactam catalysis and hydrogen storage. *Prod.* 19 (14), 1659–1667.
- Sabaz. (2018). “Hidrojen depolama için mandalina kabuğundan aktif karbon üretimi,” Yüksek Lisans Tezi . Erişim Adresi: Yöktez)
- Şenyer, (2013). Metal Katkılı Karbon Nanotüplerde Hidrojen Adsorpsiyonu. Enerji Bilim ve Teknoloji Programı. İstanbul Teknik Üniversitesi ↔ Enerji Enstitüsü (Erişim Tarihi: 03.04.2024).
- Tzimas, E., Filiou, C., Peteves, S.D. & Veyret. (2003). Hydrogen Storage: State-Of-The-Art and Future Perspective. EU Commission,. JRC Petten, EUR 20995EN.
- Valenti. (2015). Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. *Compendium of hydrogen energy*, Elsevier, 27-51. Elsevier, 27-51.
- Yıldız, F. (2019). Amonyak Boran Hidrolizinden Hidrojen Eldesi İçin Uygun Katalizörlerin Sentezi Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. (Erişim Adresi: Yöktez)
- Zeľňák. (2021). Factors Affecting Hydrogen Adsorption in Metal–Organic Frameworks: A Short Review. *Nanomaterials* 2021, 11(7), 1638;. <https://doi.org/10.3390/nano11071638>.
- Zhou. (2005). “Progress and problems in hydrogen storage methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 395–408, 2005, doi: 10.1016/j.rser.2004.05.005. (Erişim Tarihi: 04.03.2024).

# HİDROJEN EKONOMİSİ

**Elif ŞENGEL**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-0926-1568

## GİRİŞ

Hidrojen ekonomisi, geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayabilecek bir sürdürülebilir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Bu bölümde, hidrojen ekonomisinin temelleri, potansiyeli, diğer ülkelerin ve Türkiye'nin bu alandaki durumu ele alınacaktır. Hidrojen, evrenin en hafif ve en bol bulunan elementidir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve yanma sonucu sadece su üretmesi nedeniyle temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Hidrojen ekonomisi, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasını ve enerji sistemlerinde fosil yakıtların yerini almasını ifade eder. Hidrojen ekonomisi, karbon salınımını azaltma hedefi doğrultusunda giderek daha fazla ilgi görmekte ve çeşitli araştırmalar bu alandaki teknolojilerin geliştirilmesi için sürdürülmektedir. Bu alandaki ilerlemeler, gelecekte temiz enerji sistemlerinin bir parçası olarak hidrojenin önemli bir rol oynayabileceğini gösteriyor.

Hidrojen ekonomisi, taşıtların ve elektrik dağıtım şebekesinin dengelenmesi için gerekli olan enerjinin, hidrojen olarak depolandığı varsayılan bir gelecek ekonomisidir ("Hidrojen Ekonomisi", 2024).

Hidrojen ekonomisi, hidrojen ve elektriğe dayalı gelecekteki bir enerji sistemidir (Crabtree vd., 2004).

Hidrojen ekonomisi kavramını daha iyi anlayabilmek için neyi amaçladığına bakmak gerekirse, hidrojen ekonomisinin vizyonu iki beklentiye dayanmaktadır: hidrojenin yerli enerji kaynaklarından uygun maliyetli ve çevreye zarar vermeyecek şekilde üretilebilmesi ve hidrojen kullanan uygulamaların alternatiflerle rekabette pazar payı kazanabilmesi (Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, 2004). Bu beklentiler karşılanabildiği ölçüde dünya, enerji kesintilerine karşı duyarlılığın azalmasından ve özellikle daha düşük karbon emisyonları yoluyla çevre kalitesinin iyileştirilmesinden faydalanacaktır. Ancak, bu vizyonun gerçeğe dönüşebilmesi için birçok teknik, sosyal ve politik zorluğun aşılması gerekmektedir.

Hidrojen ekonomisi kavramı yeni bir kavram değildir. Fakat anlamı zamanla değişime uğramıştır. İlk olarak 1874 yılında yayınlanan Jules Verne'nin 'Esrarlı Ada' adlı romanında "su geleceğin kömürü olacaktır" ifadesi yer almaktadır (Gençer, 2024). Zaman içinde Hidrojen Ekonomisi kavramının kullanımına baktığımız zaman 1970'lerde petrol yerine ulaşım için kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. 1999'da "ulaşım ve elektrik için hidrojen kullanılabilir mi?" sorusu tartışılmıştır ve bu hidrojenin kaynak olarak birden fazla sektörde kullanılabileceğinin ilk işareti olmuştur (Gençer, 2024). Hidrojen sadece bir yakıt değil aynı zamanda enerji taşıyıcısı ve birçok sektörde kullanılma imkânı vardır. Enerji güvenliğini arttırmak için 2004'de yayınlanan raporla hidrojen ekonomisi yeniden gündeme gelmiştir (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2004). Günümüze kadar birçok çalışma ve yayın yapılmıştır. Özellikle sürdürülebilirliğin önemli alt başlıklarından olan, hava kalitesini iyileştirerek insan sağlığını korumayı amaçlamak anlamına gelen dekarbonizasyon (karbonsuzlaştırma) kavramı ile birlikte hidrojen ekonomisi önem kazanmaya devam etmektedir.

## 1. HİDROJEN ÇEŞİTLERİ

Her hidrojen eşit değildir. Üretim tiplerine göre dört çeşit hidrojen vardır; yeşil hidrojen, mavi hidrojen, gri hidrojen ve kahverengi hidrojen (Şekil 1). Hidrojenin nasıl üretildiği dekarbonizasyona katkısını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 1. Hidrojen Çeşitleri (Gençer, 2024)

Hidrojenin dünyada saf halde bulunmadığı ve günümüzde fosil yakıtlardan veya yenilenebilir kaynaklardan başlayarak enerji gerektiren işlemlerle elde edilmesi gerektiği iyi bilinmektedir. Bu görüşe göre, enerji sektörünün karbondan arındırılması için, düşük karbonlu hidrojen giderek daha fazla ilgi görmektedir. Üretim sürecine ve birincil güç kaynağına bağlı olarak hidrojen genellikle renklere göre sınıflandırılır. Şu anda üretilen hidrojenin en büyük miktarı “gri”dir, yani fosil yakıtlardan metanın buharla reformasyonu veya kömürün gazlaştırılması yoluyla elde edilir (Ajanovic, Sayer ve Haas, 2022). Gri hidrojen üretim süreçleri sırasında sera gazları (GHG) açığa çıkar, sera gazı emisyonlarını azaltmak için de bu süreçlere bir karbon yakalama sistemi (CCS) uygulanırsa, üretilen hidrojen “mavi” olarak sınıflandırılabilir (Ajanovic, Sayer ve Haas, 2022). Alternatif olarak hidrojen, sudan elektroliz yoluyla üretilir: su, elektrik akımı yoluyla oksijen ve hidrojene bölünür, bu elektrokimyasal süreç yenilenebilir kaynaklardan gelen elektrikle çalıştırılıyorsa hidrojen “yeşil” olarak sınıflandırılabilir (Ajanovic, Sayer ve Haas, 2022).

Bazı kaynaklarda hidrojen sınıflandırılırken kahverengi ve gri hidrojen ayrımı yapılmadan gri olarak adlandırılmıştır. Kahverengi hidrojenin gri hidrojenden farkı; kahverengi hidrojen linyit kömüründen elde edilen hidrojen enerjisini, gri hidrojen ise doğalgazdan üretilen hidrojen enerjisini ifade etmektedir (Howarth ve Jacobson, 2021).

Toplumumuzun karbonsuzlaştırılmasına yönelik enerji geçişi bağlamında hidrojen, en umut verici enerji depolama teknolojileri arasındadır. Rüzgâr, güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları (RES), enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasında önemli bir rol oynayacaktır. Bu teknolojilerin ana dezavantajı, güneş ışınımının ve rüzgârın doğası gereği değişken doğasından kaynaklanan aralıklı üretimleridir (Superchi vd., 2023).

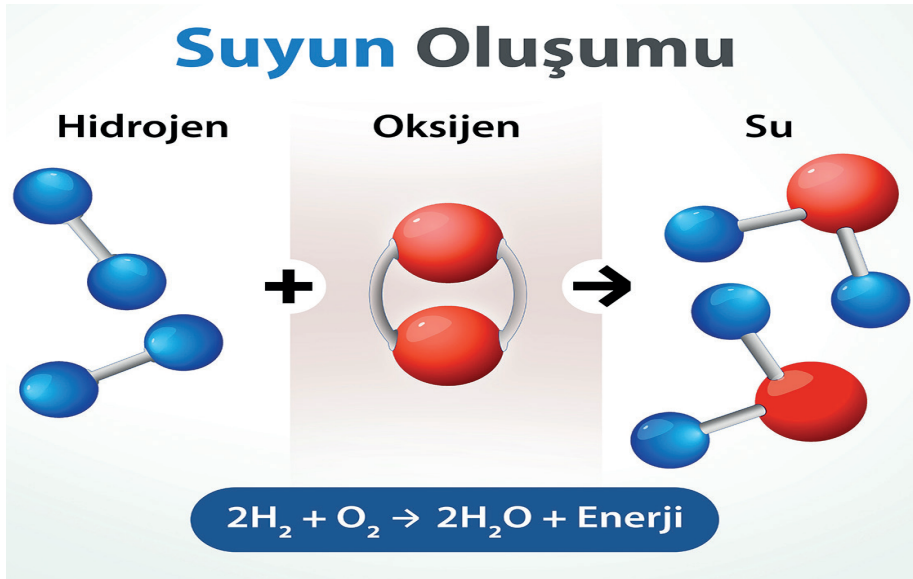
## 2. HİDROJEN ÜRETİMİ

18. yüzyılda sanayi devriminin başlamasından bu yana kömür, petrol ve doğal gaz formundaki fosil yakıtlar, toplumu yönlendiren teknoloji ve ulaşım ağlarına güç sağladı. Ancak, dünyaya fosil yakıtlardan enerji sağlamaya devam etmek, enerji arzımızı tehdit ediyor ve çevre üzerinde çok büyük baskılar yaratıyor. Nüfus artışına ve gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesine bağlı olarak dünyanın enerji talebinin 2050 yılına kadar iki katna çıkması öngörülmüyor (Hoffert vd., 1998; Energy Information Administration, 2004). Fosil yakıtların arzı sınırlıdır ve yaşamımız boyunca sınırlı miktarda petrol ve doğalgaz kıtlığının yaşanacağı öngörülmektedir (Weisz, 2004).

Küresel petrol ve gaz rezervleri dünyanın birkaç bölgesinde yoğunlaşırken, talep her yerde artıyor; sonuç olarak, güvenli bir arzın sağlanması giderek zorlaşmaktadır. Üstelik fosil yakıtların kullanımı, yarattığı kimyasal ve partikül kirliliği nedeniyle insan sağlığını da riske atmakta ve küresel ısınma

sonucu karbondioksit ve diğere sera gazı emisyonları, iklim değişikliğine neden olmaktadır. Fosil yakıtların alternatiflerinin bulunması hızlı ve kolay olmayacaktır. Alternatif kaynakların, fosil yakıtlarla rekabet edebilecek miktarlarda ve maliyetlerde enerji sağlayabilmesi için kapsamlı Ar-Ge gereklidir ve bu alternatif kaynakların ticari olarak kullanılabilir hale getirilmesi, uygun ekonomik altyapının geliştirilmesini de gerektirecektir. Bu adımların her biri zaman almakta ancak Ar-Ge'ye daha fazla küresel yatırım yapılması büyük olasılıkla ekonomik değişimin hızını artıracaktır. Fosil yakıt arzının ne zaman talebi karşılayamayacağını veya küresel ısınmanın ne zaman şiddetli hale geleceğini tahmin etmek imkânsız olsa da, fosil yakıt kullanımındaki mevcut yıllık artış eğilimi, alternatif enerji kaynaklarına kontrollü geçiş için fırsat penceremizi kısaltmaktadır (Crabtree vd., 2004).

Fosil yakıtlara ümit verici bir alternatif hidrojendir (Ogden, 2002). Hidrojen, oksijenle reaksiyonu yoluyla ısı motorlarında veya yakıt hücrelerinde sessizce enerji açığa çıkararak tek yan ürünü olan suyu üretir (Şekil 2).

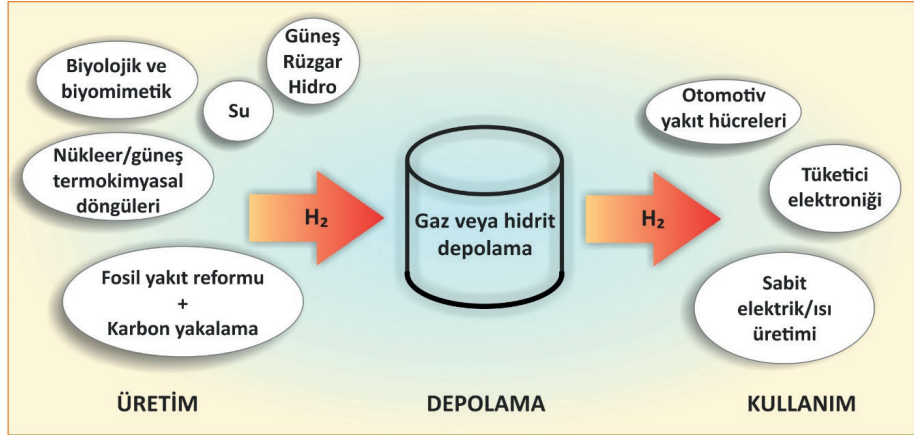


*Şekil 2. Hidrojen-Oksijen Tepkimesi (Okatan, 2021)*

Hidrojen tüm dünyada bol miktarda bulunur. Bir hidrojen ekonomisi yaratmak için yalnızca teknoloji gerekmektedir. Her ne kadar hidrojen birçok açıdan fosil yakıtların yerini alacak çekici bir alternatif olsa da, doğadaki hidrojen direkt olarak kullanılabilir yakıt halinde bulunmamaktadır (Crabtree vd., 2004). Daha ziyade, kimyasal olarak dönüştürülmesi gereken su veya hidrokarbonlar gibi kimyasal bileşiklerde hidrojen bulunur, Hidrojen de elektrik gibi bir enerji taşıyıcısıdır ve elektrik gibi doğal bir kaynaktan üretilmesi gerekmektedir (Crabtree vd., 2004).

Şekil 3.'te hidrojen ekonomisini üç işlevsel adımdan oluşan bir ağ olarak göstermektedir: üretim, depolama ve kullanım. Bu adımların her birine ulaşmak için temel teknik araçlar mevcut ancak bunların hiçbiri henüz maliyet, performans veya güvenilirlik açısından fosil yakıtlarla rekabet edememektedir. En ucuz üretim yöntemi olan metanın buharla dönüştürülmesi kullanıldığında bile hidrojen, eşdeğer miktarda enerji için benzinin maliyetinden dört kat daha fazladır ve metandan üretim, fosil yakıt kullanımını veya CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmamaktadır. Hidrojen, basınçlı gaz kaplarında veya kriyojenik kaplarda sıvı olarak depolanabilir, ancak pratik uygulamalara (örneğin, bir arabayı tek bir depoyla 500 kilometreye kadar sürmek) izin verecek yoğunluklarda depolanamaz. Hidrojen, yakıt hücrelerinde elektrığe dönüştürülebilir, ancak prototip yakıt hücrelerinin üretim maliyeti hala yüksektir.

Hidrojen üretiminin yaklaşık %96'sı fosil yakıtlardan gelmektedir. En büyük payı da %48 ile doğalgaz oluşturmaktadır.



Şekil 3. Hidrojen Ekonomisi; Üretim, Depolama ve Kullanım

## 2.1. Hidrojen Üretimi İçin Su Elektrolizi

Su elektrolizi yaklaşık 200 yıllık bir teknolojiye sahip olmaktadır. MS. 1800 civarında Almanya'da J. W. Ritter tarafından yapılan deneyle ortaya konan prensip, aynı yıl İngiltere'de William Nicholson ve Anthony Carlise suyu hidrojen ve oksijene ayırdılar (Rashid, Al Mesfer, Naseem, ve Danish, 2015). Bu teknolojinin uygulanması onlarca yıl sonra kullanılmaya başlandı, MS. 1890'da Fransız ordusu, Charles Renard tarafından hava gemilerinde kullanılmak üzere hidrojen üretmek için bir su ünitesi inşa etti ve MS. 1900 civarında dünya çapında 400'den fazla endüstriyel elektrolizör çalışmaktaydı. MS. 1930 civarında farklı türde alkalın elektrolizör geliştirildi (Rashid, Al Mesfer, Naseem, ve Danish, 2015). MS. 1970'lerde Polymer Electrolyte Membrane (PEM) elektrolizörünün geliştirilmesi, pahalı malzemeler ve sınırlı ömür nedeniyle küçük hidrojen ve oksijen üretim kapasitelerinde sınırlı kullanıma sahip alkalın elektrolizörlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır (Rashid, Al Mesfer, Naseem, ve Danish, 2015).

**Tablo 1.** Farklı Su Elektrolizi Türleri İçin Temel Kimyasal Reaksiyonlar ve Çalışma Sıcaklığı Aralığı (Rashid, Al Mesfer, Naseem ve Danish, 2015)

Elektroliz Teknolojisi	Alkali Elektroliz	Membran Elektrolizi	Yüksek Sıcaklık Elektrolizi
Anot Reaksiyonu Oksijen Evrim Reaksiyonu (OER)	$2OH^- \Rightarrow 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$	$H_2O \Rightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	$O^{2-} \Rightarrow 1/2O_2 + 2e^-$
Katot Reaksiyonu Hidrojen Evrim Reaksiyonu (HER)	$H_2O + 2e^- \Rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \Rightarrow H_2 + O^{2-}$
Yük Taşıyıcısı	$OH^-$	$H^+$	$O^{2-}$
Çalışma Sıcaklık Aralığı	40-90 °C	20-100 °C	700-1000 °C

Alkalın: Alkali elektrolizör katottaki suyu  $HO^-$  ve hidrojene ayırıştırılmaktadır. İkincisi, elektrolit ve ayırıcı bir diyafram/membran içinden geçerek anotta boşaltılarak  $O_2$ 'ni serbest bırakılmaktadır (Şener, 2023). Elektrolit, tipik konsantrasyonu %20-40 olan, NaOH veya KOH içeren sulu bir çözeltilidir ve çalışma sıcaklıkları 343 ile 363 K arasındadır ve çalışma basıncı 3MPa'a kadardır (Rashid, Al Mesfer, Naseem ve Danish, 2015). Alkali su elektrolizi eski bir teknoloji olmasına rağmen hidrojen üretimi için en kolay, en basit ve uygun yöntemlerden birisi olmaktadır. Ancak, alkali su elektrolizi nispeten yüksek enerji tüketimi, kurulum maliyeti, bakım maliyeti, dayanıklılık ve güvenlik kriziyle karşı karşıyadır.

Polymer electrolyte membrane (PEM): Sıvı elektrolit yerine elektrolit olarak asidik bir katı polimer kullanıldığında buna polimer elektrolit membran elektrolizi veya proton değişim membranı elektrolizi denmektedir. Hücreye yalnızca herhangi bir elektrolitik katkı maddesi içermeyen ve iyonize olmayan su eklenir, membran hem gaz ayırıştırıcı hem de elektrolit olarak işlev görür (Rashid, Al Mesfer, Naseem, ve Danish, 2015). Yarı hücre reaksiyonları (HER ve OER), Tablo 1'deki denklemlerle ifade edilmektedir (Rashid, Al Mesfer, Naseem ve Danish, 2015).

Avantajlarını sıralayacak olursak; temiz ekoloji, küçük kütle ve boyut, yüksek hidrojen gazı saflığı, düşük gaz geçişi, yüksek proton iletkenliği, daha düşük güç tüketimi, elektrik gücü değişimleri üzerinde kontrol, yüksek basınçlı çalışma, daha yüksek güvenlik seviyesi, kolay kullanım ve bakım (Grigoriev, Porembsky ve Fateev, 2006).

### **3. YAKIT OLARAK HİDROJEN KULLANIMI**

Elektrikli araçların dezavantajlarından biri sarj süresinin uzun olması fakat yakıt olarak hidrojen kullanıldığında benzinli araçlardaki gibi hızlı bir şekilde yakıt alınabiliyor olmasıdır (Hidrojenli Araçlar, 2024).

Düşük karbonlu bir gelecekte, sıfır karbonlu kara taşımacılığı teknolojilerine yönelik evrimin, hızlı yakıt doldurma gerektiren uzun mesafe ve yüksek kilometreli uygulamalarda hidrojen (ağır ve hafif hizmet araçları için) içermesi muhtemeldir ve kısa mesafeli ve düşük kilometreli uygulamalara yönelik pazarın büyük olasılıkla şarjlı elektrikli araçlar tarafından ele geçirilmesi beklenmektedir (MIT Energy Initiative, 2019).

### **4. TÜRKİYE’NİN HİDROJEN EKONOMİSİ**

Türkiye, enerji ihtiyacının büyük bir kısmını ithal eden bir ülke olarak hidrojen ekonomisine geçiş yaparak enerji bağımsızlığını artırır. Hidrojen, özellikle ulaşım ve sanayide fosil yakıtların yerini al Türkiye’nin hidrojen ekonomisine geçiş yapması hem ekonomik hem de çevresel açıdan faydalı olacaktır. Ayrıca, Avrupa’da önemli düzeyde yeşil hidrojen ihtiyacı bulunmakta ve Türkiye’nin de yenilenebilir enerji kapasitesi bulunmaktadır. Bu ihtiyacın bir kısmı Türkiye’den sağlanabilir.

Türkiye’nin hidrojen ekonomisi hedefleri arasında;

- Hidrojenin doğrudan veya karıştırılmasıyla doğal gaz ihtiyacını ve emisyonunu azaltmak,
- Yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş hidrojene öncelik vermek,
- Üretilen düşük karbonlu hidrojenin ihracatını yapmak,
- Enerji depolama amaçlı kullanmak,
- Ulaşım da yakıt olarak hidrojeni kullanmak: taşımacılık, toplu taşıma, ağır vasıta yer almaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Özellikle Almanya ve diğer sanayisi gelişmiş ülkelerin dekarbonizasyon için yeşil hidrojene ihtiyacı vardır ve bu şekilde bir üretim kapasiteleri bulunmamaktadır. Kuzey Afrika’dan sıvılaştırılmış hidrojen getirilmesi

düşünülmektedir, aynı zamanda Norveç'ten 8000 km'lik bir hidrojen boru hattı yapılması gündemdedir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda Türkiye'den hidrojen ihraç etmek imkânsız değildir.

Türkiye hem jeopolitik konumu hem de yenilenebilir enerji zenginliği sayesinde gerekli eğitim, araştırma ve sanayi yatırımları yaparak küresel boyutta önemli bir hidrojen üreticisi konumuna gelebilecektir.

Hidrojen ekonomisi, fosil yakıtların yerini alabilir ve çevre kirliliğini azaltabilir. Türkiye'nin bu alanda atacağı adımlar hem ulusal enerji güvenliğini artıracak hem de küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayacaktır. Hidrojen ekonomisine geçiş, kapsamlı bir strateji ve yatırım gerektirmektedir. Ancak, uzun vadede önemli faydalar sunacaktır.

## 5. DÜNYA'DA HİDROJEN EKONOMİSİ

Hidrojen ekonomisi konusunda en ileri ülkeler arasında Japonya, Almanya, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin öne çıkmaktadır (Dünya Enerji Konseyi, 2021). Bu ülkeler, hidrojen üretimi ve kullanımı için kapsamlı stratejiler geliştirmiş ve büyük yatırımlar yapmaktadır. Özellikle Japonya, hidrojen teknolojilerinde öncü bir rol oynamaktadır ve bu alanda önemli projelere imza atmaktadır (Dünya Enerji Konseyi, 2021).

## SONUÇ

Hidrojenin SWOT analizi sonucunda edinilen bilgilere göre; hidrojen ekonomisinin güçlü yönleri, temiz bir enerji olması ve şu anda sıkıştırılmış gazların taşınması için hali hazırda mevcut altyapılarının var olması sebebiyle, ulaşımı için yeni bir altyapı inşa etmeye gerek kalmayacaktır. Zayıf yönleri ise maliyetlerinin yüksek ve verimliliğin düşük olmasıdır. Fırsatlar; yeni iş kolları yaratarak, istihdam açısından işsizlik oranının düşmesine yardımcı olacaktır. Tehditler ise toplumun bu konuda bilinçsiz olması ve henüz yasal çerçevenin olmamasıdır (Tutar ve Eren, 2015).

Dünyanın her yerinde, iklim değişikliğini yavaşlatma çabaları yalnızca enerji sektörünün değil tüm sektörlerin hedefi olmalıdır. Geleneksel olarak elektrik kullanımının zor olduğu alanlarda, çok yönlülüğü sayesinde hidrojen çekici bir enerji taşıyıcısı haline gelmektedir.

Hafif yük taşımacılığında hidrojen yakıt pillerinin kullanımı mümkündür (şu anda piyasada kullanılmakta) fakat hidrojenin sera gazı salınımı, nasıl ve ne kadar üretildiği ile doğrudan ilişkilidir. Yenilenebilir enerjinin gelişimde ve büyümesinde hidrojenin özellikle uzun vadeli ve mevsimlik enerji depolama ihtiyacı açısından çok önemli yeri ve etkisi bulunmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Ajanovic, A., Sayer, M., Haas, R. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International journal of hydrogen energy* 2031; 38: 4901- 934.
- Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use. (2004). *The hydrogen economy: Opportunities, costs, barriers, and RveD needs*. United States. <https://doi.org/10.2172/882095>.
- Crabtree, G. W., Dresselhaus, M. S., Buchanan, M.V. (2004). The Hydrogen Economy. *Physics Today*, 57(12), 39-44. <https://doi.org/10.1063/1.1878333>.
- Dünya Enerji Konseyi. (2021). *Küresel hidrojen raporu özeti* [PDF]. Erişim adresi: <https://dunyaenerji.org.tr/2021-Kuresel-Hidrojen-Raporu-Ozeti.pdf>.
- Energy Information Administration. (2004). *International energy outlook 2004* (Rep. No. DOE/EIA-0484). U.S. Department of Energy. Erişim adresi: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Hidrojen stratejik planı (2023)*. Erişim adresi: [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal\\_Politikalar/HSP/ETKB\\_Hidrojen\\_Stratejik\\_Plan2023.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf).
- Gençer, E. (2024). IICEC webinarı: 'Türkiye hidrojen ekonomisi', hidrojen ekonomisi? Enerji dönüşümü ve dekarbonizasyon [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=DSvwuJgdt4velist=PL23\\_Ba00m1xOWpFsNAdvO3G3epHGyrvRMveindex=4](https://www.youtube.com/watch?v=DSvwuJgdt4velist=PL23_Ba00m1xOWpFsNAdvO3G3epHGyrvRMveindex=4). Erişim tarihi: 24.05.2024.
- Grigoriev, S. A., Porembsky, V. I., Fateev, V. N. (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(2), 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.038>.
- Hidrojen ekonomisi, (2024). *Vikipedia*. Erişim adresi: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen\\_ekonomisi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_ekonomisi). Erişim Adresi: 27.09.2024.
- Hidrojenli Araçlar, (2024). *Hidrojenli vs bataryalı elektrikli araçlar-Bölüm 2* [Video]. Erişim adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=n582VJBdxa4>. Erişim tarihi: 15.10.2024.
- Hoffert, M. I., et al. (1998). Energy implications of future stabilization of atmospheric CO2 content. *Nature*, 395(6705), 891.

- Howarth, R. W., Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science ve Engineering*, 9(12), 1676–1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>.
- Manabe, M. Kashiwase, T. Hashimoto, T. Hayashida, A. Kato, K. Hirao, Shimomura, I. Nagashima, I. (2013). Basic study of alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 100: 249– 256.
- MIT Energy Initiative. (2019). *Insights into future mobility*. MIT Energy Initiative. Cambridge, MA.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2004). *The hydrogen economy: Opportunities, costs, barriers, and R&D needs*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10922>.
- Ogden, J. M. (2002). Hydrogen: The fuel of the future? *Physics Today*, 55(4), 69–75. <https://doi.org/10.1063/1.1480785>.
- Okatan, A. (2021). Su yanabilir mi? *TÜBİTAK Bilim Genç*. Erişim adresi: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/su-yanabilir-mi>. Erişim tarihi: 22.06.2024.
- Rashid, M., Al Mesfer, M., Naseem, H., ve Danish. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: A review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(3), 80–93. <https://doi.org/10.1109/10.1109/IEAT.2015.273125977>.
- Superchi, F., Papi, F., Mannelli, A., Balduzzi, F., Ferro, F. M., Bianchini, A. (2023). Development of a reliable simulation framework for techno-economic analyses on green hydrogen production from wind farms using alkaline electrolyzers. *Renewable Energy*, 207, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.077>.
- Şener, O. (2023). *Yeşil hidrojen üretiminde elektroliz yöntemleri*. Erişim adresi: <https://yesserenerji.com/yesil-hidrojen-uretiminde-elektroliz-yontemleri/> Erişim tarihi: 26.07.2024.
- Tutar, F., Eren, M. (2015). Geleceğin enerjisi: Hidrojen ekonomisi ve Türkiye. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 6. <https://doi.org/10.18092/ijeas.38647>.
- Weisz, P. B. (2004). Basic choices and constraints on long-term energy supplies. *Physics Today*, 57(7), 47–52. <https://doi.org/10.1063/1.1784302>.

# ÇALIŞAN SAĞLIĞI AÇISINDAN HİDROJEN

**Ayhan ÖZŞAHİN**

Dr. Öğr. Üyesi, Üsküdar Üniversitesi, Tıp Fakültesi, İstanbul, Türkiye,  
Orcid ID: 0000-0001-6079-674X

**Kaan ÖZŞAHİN**

Elk. Elo. Müh., Orcid ID: 0009-0004-4894-7487

## 1. ÇALIŞAN SAĞLIĞI- TOPLUM SAĞLIĞI

Ülkemizde “İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’nun 4.ç. Maddesi’nde işveren yükümlülüğü kapsamında: “Çalışana görev verirken, çalışanın sağlık ve güvenlik yönünden işe uygunluğunu göz önüne alır.” ifadesi yer almıştır.

Çalışanın sağlığının yaptığı işe uygunluğunu değerlendirmenin iki boyutu vardır:

- Yapılan iş ve çalışılan ortam, çalışanın sağlığını etkileyebilmektedir.
- Çalışanın sağlık durumu, çalışılan ortam veya yapılan işi etkileyebilmektedir.

Dolayısıyla iş sağlığı kavramı-toplum sağlığı kavramıyla karşılıklı etkileşim içerisinde (Bilir ve Yıldız 2015). Daha doğru bir ifadeyle, iş sağlığı toplum sağlığının bir bileşenidir.

Yapılan işin ve çalışılan ortamın çevreye verebileceği zarar, doğrudan veya dolaylı olarak çalışan sağlığına da zarar verebilmektedir. Bu durumda işyeri hekiminin, çalışanların sağlığını korumak için önereceği önlemler aynı zamanda işyeri çevresindeki toplumun sağlığına da fayda sağlayacaktır.

Dolayısıyla işyeri hekimi yapılan işin toplum sağlığına etkisini de dikkate almak durumundadır. Sonuçta çalışanlar o toplumun bireyleridir.

## 2. TOPLUM SAĞLIĞINA YÖNELİK GÜNCEL TEHDİTLER

Doğanın kaotik bir düzen içerisinde oluşturduğu kusursuz bir dengesi vardır. Bu dengeyi bozan-bozabilen tek unsur aslında kendisi de doğaya ait olan insandır.

Özellikle son yüzyılda insan nüfusunun artışı büyük bir ivme yakalamıştır ve halen dünya nüfusu bu ivmeyle artmaktadır. Bu artış, temel gereksinimlerde de kontrolsüz bir artışa yol açmaktadır. Teknolojide hızlanan gelişme ve hızla büyüyen nüfusun artan talebi, üretim tesislerinde hızlı büyümeye yol açmıştır. Böylece artan ısınma, ulaşım, üretim gibi gereksinimler, enerji tüketimini de hızla artırmıştır.

Günümüzde maliyet/verim oranı en uygun olan enerji üretimi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Ancak bu tercih çevre kirliliğini hızla artırmaktadır. Fosil yakıtlar üretimi, taşınması, dağıtımı ve kullanımı aşamalarında, çevre kirliliği, büyük kazalar gibi farklı ve ciddi riskler üretmektedir. Bu olumsuzlukların yanında iklim değişikliğinin de önemli nedenleri arasında kabul edilmektedir.

Dünyamızdaki bu hızla büyüyen endüstrileşme ve fosil yakıt kullanımı, bir yandan doğal kaynakları hızla tüketirken, diğer yandan da çevreyi ve atmosferi de hızla kirletmektedir (Koç ve Şenel, 2013). Bu kirlenmenin sağlığa olumsuz etkilerinin yanında aynı zamanda temel yaşam kaynakları kısıtlılığı sorununu arttırarak dolaylı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Yine iklim değişikliği de aynı zamanda doğal kaynakları azaltan etkiye sahiptir. Bu gelişmelerin sonucunda günümüzde dünya sonu karanlık olan bir kısırdöngüye girmiş durumdadır.

Fosil yakıtların zararlarına karşı günümüzde dünya bir arayış içerisinde. Bu çaba içerisinde fosil yakıtlara alternatif yollarla üretilen elektrik enerjisi öne çıkmaktadır. Ancak bu yöntemlerin çeşitli olumsuzlukları nedeniyle henüz fosil yakıtlara güçlü bir alternatif oluşmamıştır. Başlıca olumsuzluklar (Akova, 2019):

**Hidroelektrik Kaynaklar:** Doğal doku ve kültürel varlıklara verdikleri zararlar dışında iklime bağımlılıkları ve zamanla kullanım dışı kalmaları gibi çeşitli sakıncalar içermektedir. Fosil yakıtlardan sonra en çok kullanılan kaynaklar arasındadır.

**Güneş Enerjisi:** Üretim sürekliliğinin olmaması ve kullanılan panellerin çevreye zararı açılarından gerçek bir alternatif olamamıştır.

**Rüzgar Enerjisi:** Üretim sürekliliği, kurulum güçlüğü ve yine çevreye zararı açılarından gerçek bir alternatif olamamıştır.

**Nükleer Enerji:** Alternatifler arasında öne çıkmıştır. Ancak nükleer atık sorunu ve yaşanan büyük kazalar nedeniyle gerçek bir alternatif olamamaktadır.

**Elektrik Enerjisi:** Bu sayılanlar ve halen denenmeye devam eden diğer yöntemler fosil yakıt kullanımını azaltıcı etkileri nedeniyle desteklenmektedir. Bu yöntemlerin ortak özellikleri elektrik enerjisi üretebilmeleridir. Bu arada günümüzde üretilen elektrik enerjisinin önemli kısmında fosil yakıtlar kaynak olarak kullanılmakta olduğu da unutulmamalıdır. Elektrik enerjisinin de çevreye çeşitli zararları bulunmaktadır. Enerjinin taşınması, dağıtımı, kullanımı yanında özellikle depolanma sorunu günümüzde hızla büyümektedir.

İklim değişikliği kaygısının etkisiyle dünyada elektrik enerjisine hızlı bir yönelim oluşmuştur. Özellikle, ulaştırma sektöründe tüm ulaşım araçlarında elektrik enerjisine geçiş kuvvetle desteklenmektedir. Bu gelişme elektrik enerjisinin depolanması sorununu gündemde öne çekmiştir. Günümüz pil teknolojisi, hacim ve ağırlık olarak oluşturduğu sorunun yanında kırılabilirliği ve oluşturduğu ciddi yangın riski nedeniyle yeterince güven verememektedir. Ayrıca uzun şarj süresi gibi kullanım kolaylığını olumsuz etkileyen yeni sorunları gündemimize getirmiştir.

Pillerde kullanılan elementlerin emadencilik hizmetlerini gerektirmektedir. Bu hammaddeyi işlenmesi, taşınması, pil üretim süreci ve en önemlisi atık yönetimi, çalışan sağlığına, çevreye ve dolaylı etkileri nedeniyle toplum sağlığına çeşitli ve ciddi riskler oluşturmaktadır (Akova, 2019).

Pillerin kullanımına bağlı yeni riskler de sırasını beklemektedir. Mobil telefon örneğinde görüldüğü gibi hasar gören ve/veya yetkisiz birimlerde onarım gören piller yüksek yangın riski oluşturabilmektedir. Pilde kullanılan elementlerin yanması halinde ortaya çıkan söndürme güçlüğü de oluşan zararı önemli ölçüde büyütmektedir. Bu tür yangınlar, pilin aldığı darbe sonrasında, şarj sırasında veya durduk yerde de çıkabilmektedir.

Elektrikli araçların karışacağı büyük kazalar, araç içindeki pillere de ciddi darbe etkisi oluşturabilecektir. Hasar görecektir bu pillerin yüksek yenileme maliyetleri giderek yetkisiz ellerde tamir ve üretim hizmetlerini gündeme getirebilecektir. Mobil telefonlarda zaman zaman görülen bu tür nedenlerden kaynaklanan yangın sorunu çok ilgi çekmemektedir. Ancak elektrikli araçlarda oluşabilecek benzeri yangın durumunda, özellikle yangının zincirleme kazalar, kapalı otopark koşulları gibi ortamlarda gerçekleşmesi halinde çok büyük zararlar oluşabilecektir. Nitekim elektrikli araçların şarjı ve kullanımı sırasındaki yangın riski ilk işaretlerini vermektedir.

Günümüzde kapalı otoparklara yangın güvenliği nedeniyle tüplü araçlar alınmamaktadır. Hızla artan elektrikli araçlar da zamanla böyle bir uygulamayla karşılaşabilecektir. Özellikle, kapalı otoparklarda giderek artan şarj istasyonları da bu risk kapsamında henüz yeterince değerlendirilmemiştir.

Akaryakıt ve otogaz dağıtımına yönelik istasyonlarda yangın ile ilgili senaryolar araçların hizmeti birkaç dakikada alabileceği duruma göre kurgulanmıştır. Araçların en az yarım saat kalacağı durumda tüm bu dağıtım altyapısının yeniden kurgulanması gerekecektir. Geçiş dönemindeki araçların

konut ve işyerlerinde, kapalı otoparklarda, akaryakıt istasyonlarında şarj edilmesi gibi uygulamalar gerek teknik altyapı gerekse yangın riski nedeniyle sürdürülebilir görünmemektedir. Bu teknoloji kullanımının toplumda yaygınlaşmasıyla yine çalışan ve toplum sağlığını, güvenliğini ilgilendiren yeni riskler gündeme gelebilecektir.

Pil ve şarj teknolojilerindeki gelişmeyle bu sorunların çözüleceği beklentisi bulunmaktadır (Karadağ 2021). Ancak, elektrik üretimindeki fosil yakıtlara bağımlılığın da önüne geçilmesine özen gösterilmesi gerekmektedir.

Jeotermal, dalga (deniz) gibi farklı enerji kaynakları da halen üzerinde çalışılan konulardır (Akova 2019). Ancak, buraya kadar anlatılanlarda görüldüğü gibi halen fosil yakıtlara karşı güçlü bir alternatif üretilmemiştir. Günümüzde alternatif enerji kaynakları, fosil yakıt kullanımını azaltabilmek amacıyla desteklenmektedir. İklim değişikliği kaygısı nedeniyle artan baskının, acele kararlara yol açmasıyla da süreçte ciddi hatalar yapılması söz konusu olabilecektir. Dolayısıyla tüm süreçte özenli ve kapsamlı risk değerlendirme işlemi ihmal edilmemelidir.

### **3. FOSİL YAKITLARIN SAĞLIĞA ETKİLERİ**

Fosil yakıtlar, bitki ve hayvanların toprak altında kalarak oksijensiz ortamda çözümleri sonucu ortaya çıkan hidrokarbon bileşimleridir. Bu maddeler yüksek enerji içeriği nedeniyle günümüzde yakıt olarak kullanılmaktadır. Başlıcaları kömür, petrol ve doğalgazdır (Enerji Kaynakları ve Dönüşüm Sistemleri).

Kömür, sanayi devriminin itici gücü olmuştur. Günümüzde de en yaygın kullanılan enerji kaynakları arasında yer almaktadır (Koç 2013). Ancak, aynı zamanda çevreye ve insan sağlığına en tehlikeli enerji kaynaklarından biridir. Kömür çıkarılması, taşınması, dağıtımı, kullanımı ve atıklarının yönetimi konularında çok çeşitli ve ciddi riskler oluşturmaktadır.

Madencilikten kaynaklanan meslek hastalıkları çok uzun zamandır bilinmektedir. Modern tıbbın öncüsü Hipokrat'ın da hastalara mesleğini sorarak, hastalığıyla örneğin madenciliğin bağlantısını sorguladığı bilinmektedir. Kömür madenciliği yıpratıcı, ağır bir meslek olmasının yanında ciddi kaza ve hastalık riski taşımaktadır. Günümüzde halen kömür tozuna bağlı bir akciğer hastalığı olan kömür işçisi pnömokonyozu ciddi bir halk sağlığı sorunudur. Bu, kömür tozunun akciğerlerde birikmesi yanında akciğer dokusunda neden olduğu fibrozis (işlevsel dokuların bağ dokusuna dönüşmesi) süreciyle de zamanla akciğer yetmezliğine neden olan ölümcül bir hastalıktır (Köksal 2015).

Ana kaynağı taş/kum olan silisyum elementi bilgisayar teknolojisinin ana maddesidir ve Silikon Vadisi'ne adını vermiştir (Silisyumun İngilizce karşılığı silicundur). Bu madde camın da ana kaynağıdır. Bugünkü yaşamımız

açısından vazgeçilmez özellikteki bu element aynı zamanda insan sağlığına da büyük zarar verebilmektedir. Kömür madeninde, kaya kaynaklı toz halindeki silikozun da yüksek inhalasyon riski, kömür tozunun akciğerlere verdiği zararı artırmaktadır. Ayrıca sigara tüketimi de bu hastalığı hızlandıran etkenler arasındadır. Tedavisi olmayan, geri dönüşsüz ölümcül bir hastalıktır (Bilir ve Yıldız 2015).

Kömür madenciliğinin ayrıca ciddi bir kaza riski de bulunmaktadır. Karanlık ve nemli bir ortamda çalışmanın kaza riskini artırmasının yanında taş kömürüne bağlı grizu patlaması ve linyit kömürüne bağlı yangın diğer ciddi kaza riskleri arasındadır. Grizu patlaması belirli oranda metan ve oksijen karışımının ısıyla buluşması sonucunda oluşmaktadır. Taş kömürü tabakalarının arasında metan birikimine sıklıkla rastlanmaktadır. Bu nedenle kontrolü çok güçtür. Linyit kömürü de kendiliğinden tutuşma özelliğine sahiptir. Bu nedenle yangın riskinin de kontrolü zordur (Delibalta 2020).

Petrol en çok kullanılan fosil yakıt türüdür. Petrol hammaddesinden benzin, mazot, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi yakıtlar yanında plastik, boya, parafin, katran gibi başka maddeler de üretilmektedir. Bu nedenle endüstri açısından vazgeçilmesi zordur. Ancak üretimi, taşınması, ayrıştırılması, dağıtımı ve tüm türevlerinin kullanımında insan sağlığına ve çevreye ciddi zararları bulunmaktadır. Ayrıca patlama, yangın vb. yüksek riskler de söz konusudur.

Petrolün çıkarılması sırasında yol açılan zararların başlıcaları doğal dokuya verilen zarar, yol açılan çevre kirliliği ve insana maruziyetiyle oluşan sağlık sorunlarıdır. Petrol ve türevleri, yoğun hidrokarbon bileşiklerini de içermektedir (Er 2020).

Doğalgaz da sık kullanılan fosil yakıtlar arasında yer almaktadır. Ana bileşeni, metan, etan gibi hidrokarbonlar olan bir yanıcı gaz karışımıdır. Yanınca duman, kül, is ve kükürt bileşikleri oluşturmaması avantajları arasındadır. Ancak yangın, patlama gibi kaza riski çok yüksektir (Köse 2023).

Hidrokarbonlar karbon ve hidrojen içeren bileşiklerdir. Maruziyeti halinde akciğer, karaciğer, böbrek gibi organlarda, ayrıca sinir sistemi, kemik iliği, göz ve deride hasara yol açabilmektedir. Kanserojen ve mutajen etkileri de ciddi risk oluşturmaktadır (Bilir ve Yıldız 2015).

### **3.1. Hava Kirliliği**

Hava Kirliliği, havada canlılara, doğal çevreye ve eşyalara zarar veren maddelerin bulunması halini tarif etmektedir. Doğal kaynakları da olmakla birlikte esas zarar insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Günümüzde hava kirliliği dendiğinde ilk aklı gelen fosil yakıt kullanımından kaynaklanan kirliliktir. Yanmaya bağlı oluşan karbondioksit ve karbonmonoksit yanında azot, kükürt bileşimleri ve partiküller öncelikle çocukluk yaşlarından başlayarak solunum yolu hastalıklarının artışına yol açmaktadır. Bunun yanında kirliliği

oluşturan kükürt, azot, kurşun bileşimleri de kan, bağışıklık sistemi ve deride çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Hava kirliliğinin kanserojen etkisi de öne çıkan riskleri arasındadır.

Hidrokarbonlar yanarken serbest radikaller ortaya çıkmaktadır. Sigara tüketiminde de benzer sonuç oluşmaktadır. Serbest radikaller, insan hücrelerinde çeşitli zararlar verirler. Kansere yol açmaları bu zararların başlıcalarındandır.

Hava kirliliği sağlık riskleri arasında 4. sırada yer almaktadır. Bu sağlık sorunları, insan ömrünü kısaltmasının yanında, işyeri hekiminin, çalışanın sağlığının yaptığı işe uygunluğunu değerlendirmesini etkileyecek düzeylere varabilmektedir (Türk Toraks Derneği 2018).

Atmosferde biriken karbondioksitin sera etkisiyle iklim değişikliğindeki önemli rolü dolaylı olarak gıda güvenliğine yönelik önemli risk oluşturmaktadır. Ek olarak asit yağmurları riski de oluşturmaktadır.

### **3.2. Hava Kirliliğine Karşı Önlemler**

Fosil yakıt kullanımı günümüzde, dünya üzerinde milyarlarca yıldan beri devam eden canlı hayata yönelik çok ciddi bir tehdit oluşturmuştur. Özellikle iklim değişikliği üzerindeki etkisi nedeniyle yakın takibe alınmış, ciddi önlemler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bunlar arasında topluma yansıyan önlemlerden birisi Avrupa'da dizel yakıtlı araçların yasaklanmaya başlanmış olmasıdır. Bir yandan alternatif enerji kullanımına yönelik ciddi teşvikler sağlanırken, diğer yandan fosil yakıt kullanımını engellemeye yönelik farklı önlemler de geliştirilmektedir. Sürdürülebilirlik çerçevesinde günümüzde dünyada bir karbon pazarı oluşturulmuş; karbon ayak izi, karbon sertifikası, karbon kredisi, CO<sub>2</sub> belgesi, yenilenebilir enerji sertifikası gibi terimler bu kapsamda gündeme gelmiştir. Bunların başlıcaları şöyledir:

**Yeşil Mutabakat:** Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar Avrupa'yı iklim nötr bir kıta haline getirmeyi hedefleyen çalışma planıdır.

**Paris Anlaşması:** Birleşmiş Milletler üye ülkeleri tarafından imzalanan, sıcaklık artışını sınırlamaya yönelik bir iklim değişikliği anlaşmasıdır.

**Karbon Emisyonları:** Ağırlıklı fosil yakıt kullanımı sonucunda atmosfere salınan karbon bileşenleridir. Sera etkisiyle küresel ısınmaya yol açtığı düşünülmektedir.

**Karbon Ayak İzi:** Kişi veya kurumların sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri cinsinden ölçüldüğü bir değerdir.

**Karbon Sertifikası:** Sera gazı emisyonlarını azaltan veya dengeleyen etkinliklerin başarısını belgelemek amacıyla geliştirilmiştir.

**Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sertifikası:** Yenilenebilir enerji üretimi ve kullanımını belgelemek amaçlı geliştirilmiştir.

Karbon Kredisi: Sera gazları emisyonunun CO<sub>2</sub> eşdeğerindeki miktarını dengelemeyi hedefleyen bir finansal araçtır.

Bu geliştirilen araçların nihai amacı, ülkelerin ek vergiler ve yasaklar yoluyla iklim değişikliğine kalıcı önlem alabilmelerini ekonomik açıdan desteklemektir.

## 4. HİDROJEN

Yaşamın en temel gereksinimleri Oksijen ve Hidrojen elementleridir. Ancak bu elementler aynı zamanda kuvvetli yanıcı özellikleri ve bazı bileşikleriyle yaşama ve sağlığa ciddi bir tehdit de oluşturabilmektedir.

### 4.1. Çalışan Sağlığı Açısından Hidrojen

Enerji kaynağı olarak hidrojen kullanımı seçeneği, daha önce de denenmiş ancak güvenlik riski nedeniyle vazgeçilmiş olmasına karşın, günümüzde tekrar tartışılmaya başlamıştır. Fosil yakıtların dünyaya yönelik oluşturduğu ciddi tehdide karşı kalıcı çözüme hidrojen kullanımıyla ulaşılabileceğine yönelik görüşler giderek güçlenmektedir. Endüstrideki girişimler de bu konuda harekete geçmiş bulunmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2023).

Enerji kaynağı olarak hidrojen kullanımı çevre kirliliği, iklim değişikliği gibi tehditleri önemli ölçüde azaltabilecek bir olanaktır ve bu yolla hem toplum sağlığına hem de çalışan sağlığına önemli ölçüde fayda sağlayabilecektir (Ankara Sanayi Odası 2023). Hidrojen kullanımı, insan sağlığına zarar vermeyerek doğrudan fayda sağladığı gibi, fosil yakıt kullanımını azaltarak dolaylı fayda da sağlayacaktır. Bu nedenle hidrojenin çalışan sağlığı ile ilişkisini bu geniş açıdan ele almak uygun olacaktır.

### 4.2. Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen

Evrenin en temel enerji kaynaklarından biri hidrojendir. Güneş enerjisi, füzyon sürecinde hidrojenin helyuma dönüşmesiyle ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemle çalışan reaktör teknolojisi geliştirilerek, enerji gereksinimini sağlıklı ve ekonomik yolla karşılamaya yönelik çalışmalar dünya genelinde oldukça ilerlemiştir. Ancak bu yöntemin yaygın kullanıma girmesi için daha uzunca bir zaman gerekmektedir (Özdoğan 2018).

İlk adım olarak fosil yakıt kullanımını, hidrojen kaynaklı yöntemlerle destekleyerek azaltma hedefine yönelik çalışmalar ilerlemektedir. Bu nedenle üretimin bütününe, bu mümkün değilse de uygun proseslerinin enerji gereksiniminin hidrojen kullanımıyla karşılanmasına çalışılmaktadır. Ayrıca ürünün taşınması, depolanması, dağıtımı vb. aşamalarında da enerji kaynağı olarak hidrojenin kullanılabilirdiği seçenekler araştırılmaktadır. Örneğin, çelik fırınlarında gerekli ısı artışını sağlamak için püskürtülen kömür tozu yerine hidrojen kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

Alternatif enerji kaynakları arasında hidrojen büyük ilgi çekmektedir. Ancak, halen üretilmekte olan hidrojenin önemli bölümünde kaynak yine fosil yakıtlardır. Hidrojen üretimi elektrik enerjisiyle de sağlanabilir. Bu kez de kullanılan elektriğin nasıl üretildiğine bakmak gerekecektir. Amaç hidrojen üretiminin tüm aşamalarının sürdürülebilir enerji kaynaklarıyla sağlanmasıdır. Bu konuda renk kodlarıyla açıklanan bir sınıflandırma geliştirilmiştir.

Günümüzde alternatif enerji kaynaklarının en önemli sorunları üretim düzensizliği ve depolama güçlüğüdür. Dolayısıyla üretim, taşınma, depolama, dağıtım ve kullanım süreçlerinde hidrojen kullanımı, bu alternatif yöntemlerin etkinliğini önemli ölçüde artıracaktır. Bu yaklaşımla, hava ve çevre kirliliği, dolayısıyla toplum sağlığı ve aynı zamanda çalışan sağlığı risklerinin, tamamen ortadan kaldırılamasa da hızlıca azaltılması mümkün olabilecektir. Bu nedenle tüm faaliyetlerde ayrı ayrı hidrojen kullanımı seçeneğinin araştırılması, iş sağlığı ve güvenliği hizmetlerinin rehberlik görevi içinde önemli yer tutması kaçınılmazdır.

### **4.3. Hidrojenin İnsan Sağlığına Zararları**

Hidrojen kullanımı önemli risklere sahiptir. Öncelikle hidrojen, yüksek yanıcı, parlayıcı özelliğiyle yangınlara, yanık yaralanmalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle hidrojenin kullanımı, depolanması ciddi önlemler gerektirmektedir. Hidrojenin kokusuz olması ve alevinin neredeyse rensiz olması, çalışan güvenliği açısından ilave olarak tehlikeden kaçınamama riski oluşturmaktadır.

Hidrojen rensiz, kokusuz, toksik olmayan bir gazdır. İnsan sağlığına doğrudan zararı, havadaki oranının artması halinde yeterli oksijenin alınamamasına bağlı boğulma (asfiksi) yoluyla oluşabilmektedir. Bu durumun erken belirtileri baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı şeklinde görülmektedir. Bu belirtiler ilk anda boğulma sürecini akla getirmeyebilmektedir. Tablonun ileri aşamasında bilinç kaybı gelişmekte ve tüm bu süreç kazazedenin tehlikeyi fark ederek kendini kurtarma olanağına engel olmaktadır.

Sıvı haldeki hidrojen çok soğuktur ve temas halinde donuk yaralanmasına yol açmaktadır. Çok yüksek basınçta depolanması da buna bağlı kaza riskleri oluşturabilmektedir. Bu riskler arasında, gözlerde hasar oluşması da yer almaktadır.

Dolayısıyla çalışma ve depolama ortamında bu riskleri kontrol edebilecek hassas teknik güvenlik önlemlerine ve uygun kişisel koruyucu kullanımına gereksinim bulunmaktadır. Günümüz teknolojisi, hidrojen kullanımında etkin güvenlik önlemleri sağlayabilecek düzeye gelmiştir.

### **4.4. Hidrojenin İnsan Sağlığına Faydaları**

Hidrojenin temiz enerji alternatifi olarak insan sağlığına dolaylı faydaları yanında, doğrudan faydaları da bulunmaktadır.

İnsan vücudunda, hücre düzeyindeki biyokimyasal süreçler, serbest radikaller de üretmektedir. Kararsız kimyasal maddeler olan serbest radikaller, DNA yapısını bozarak, kansere kadar varan zararlara yol açmaktadır. Ancak, insan hücreleri aynı zamanda antioksidan özellikli kimyasal maddeler de üreterek bu kararsız yapının etkisizleşmesini sağlamaktadır. Serbest radikaller başka hava kirliliği olmak üzere çeşitli dış nedenlerle de ortaya çıkmakta ve insan vücuduna alınarak vücudun ürettiği antioksidanlarla oluşturduğu savunma kapasitesini aşabilmektedir. Bu nedenle günümüzde dışarıdan antioksidan gıda takviyeleri önemle önerilmektedir (Alwazeer ve Çiçek 2022).

Hidrojen molekülleri, insan vücuduna zarar vermeden hızla yayılabilmekte ve güçlü bir antioksidan etki göstermektedir. Bu durum moleküler hidrojenin önleyici ve tedavi edici uygulamalarda kullanılma potansiyelini artırmaktadır. Hidrojen gazı solunması, hidrojenle zenginleştirilmiş su içmek, hidrojenli su banyosu yapmak sağlık alanında moleküler hidrojen uygulamasının önerilen yöntemlerindedir. Vücuttaki olumlu etkileri olması ve yan etkisinin bulunmaması nedeniyle, moleküler hidrojen birçok hastalığa karşı umut verici bir potansiyele sahiptir. Ancak, bu yöntem araştırılmaya devam edilmekte olup, henüz güncel tıp pratiğinde yaygın kullanıma girmemiştir (Alwazeer ve Çiçek 2022).

Gıdalarda özellikle meyve ve sebzelerde kimyasal (pestisit) artıklarının temizlenmesi açısından da hidrojenli su çok etkili ve sağlıklı bir yöntemdir (Aksoy 2020).

Bu etkileri nedeniyle endüstriye ve son tüketicilere yönelik çok çeşitli hidrojenli su üretici cihazlar geliştirilmiş ve kolay erişilebilir hale gelmiştir (Suyun En Faydalı Hali).

## KAYNAKÇA

- Akova, İ. (2019). Türkiye'nin enerji sorunu ve tercihler. 1. İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi Bildiri Kitabı (s. 571-580). İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları. Doi: 10.26650/PB/PS12.2019.002.056
- Aksoy, A. (2020). Gıda endüstrisinde elektrolize su kullanımı. Avrupa bilim ve teknoloji dergisi, (19), 254-262. Doi: 10.31590/ejosat.725282
- Alwazeer, D., Çiçek, S. (2022). Moleküler hidrojenin sağlık alanında kullanımı. Karya journal of health science, 3(1), 30-34. Doi: 10.52831/kjhs.899237
- Ankara Sanayi Odası. (2023). Avrupa yeşil mutabakatı. <https://www.aso.org.tr/tekil/yesil-mutabakat-5237>
- Ankara Üniversitesi. (2013). Enerji kaynakları ve dönüşüm sistemleri. <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=69634>

- Bilir, N ve Yıldız, A, N. (2015). İş sağlığı ve güvenliği. Ç. Güler ve L. Akın (Ed), Halk sağlığı temel bilgiler (3. baskı) içinde (s. 1070-1096). Ankara: Hacettepe Üniversitesi Yayınları.
- Cankurt, O.A. (2019). Hidrojen (basıncılı gaz halinde). HABAŞ güvenlik bilgi formu. <https://www.habas.com.tr/uploads/files/MSDS/Hidrojen%20Gaz%20GBF10.pdf>
- Delibalta, M. S., Gündoğar, M. (2020). Ilgın Linyit İşletmesi'nde kömürün kendiliğinden yanması ve risk analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi mühendislik bilimleri dergisi, 9(2), 1017-1025. Doi: 10.28948/ngmuh.609072
- Er, A., Bozdağ, O. (2020). Petrol ve petrol ürünlerinin güvenli depolanması. Kocaeli Üniversitesi fen bilimleri dergisi, 3(2), 170-179
- Hidrojenli Yakıtlar (t.y.). Alternatif Yakıt Sistemleri. <https://gazi.edu.tr/posts/download?id=116880>
- Kahraman, N., Akansu, S.O., Albayrak, B. (2007). İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojen kullanılması. Mühendis ve makina, 48(569), 9-15.
- Karabulut, H., Gülay, M. Ş. (2016). Serbest radikaller. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi sağlık bilimleri enstitüsü dergisi, 4(1), 50-59.
- Koç, E., Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu genel değerlendirme. Mühendis ve makina, 54(639), 32-44.
- Köksal, D. (2015). Toksik inhalasyonlar. Sözlü Sunum, İş ve Meslek Hastalıkları Seminer Programı, Ankara. [https://halksagligi.hacettepe.edu.tr/sunumlar\\_ve\\_seminerler/toksik\\_inhalasyonlar.pdf](https://halksagligi.hacettepe.edu.tr/sunumlar_ve_seminerler/toksik_inhalasyonlar.pdf)
- Köse, R., Erturhan, Ü. (2023). Doğal gazın güvenli kullanımında periyodik kontrollerin etkisinin araştırılması. Kırklareli University journal of engineering and science 9-1: 166-178. Doi: 10.34186/klujes.1313536
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T. ve Altuğ, M.. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. Gazi University journal of science, Part A, 8(2), 276-298
- Özdoğan, H., Şekerci, M., Kaplan, A. (2018). Füzyon reaktörü yapısal malzemelerinde kullanılan bazı elementler için proton girişli reaksiyonlarda <sup>3</sup>He yayınlanma spektrumlarının incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi fen dergisi. 13(1). 12-18
- Suyun en faydalı hali: Hidrojenli su nedir. (2023). <https://www.fakir.com.tr/suyun-en-faydalı-hali-hidrojenli-su-nedirT.C.> Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Temel Kavramlar. <https://iklim.gov.tr/sss/temel-kavramlar#>

- T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Paris Anlaşması. <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal\\_Politikalar/HSP/ETKB\\_Hidrojen\\_Stratejik\\_Plan2023.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf)
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2023). Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası. <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-celik-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>
- Türk Toraks Derneği. (2018). Kirli Havanın İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi Nedir. <https://toraks.org.tr/site/news/4774>

# HİDROJEN ÖZELLİKLERİ VE HİDROJEN ÜRETİM SÜREÇLERİ İLE HİDROJEN KAZALARININ TARİHSEL İNCELEMESİ

**Ece SINMAZ**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Orcid ID: 0000-0003-2170-2944

## GİRİŞ

Hidrojen kelimesi Yunanca kökenlidir. “Hydro” kelimesi “su” anlamına gelirken, “genes” kelimesi “oluşturan” veya “üreten” anlamına gelir. Dolayısıyla, “hidrojen” kelimesi aslında “su oluşturan” veya “su yaratan” anlamına gelir. Bu isim, hidrojen elementinin özelliklerinden biri olan su oluşturmada kaynaklanmaktadır. Hidrojen, bir hidroksil grubu ile birleşerek su molekülünü oluşturan temel elementlerden biridir. Bu nedenle, hidrojenin adı, elementin özelliklerine ve su oluşumundaki rolüne atıfta bulunur.

Hidrojen evrenin kütlelerinin büyük bir kısmını oluşturur. Evrenin kütlelerinin %75'ten fazlasını oluşturduğu tahmin edilmektedir ancak, yüksek reaktivitesi nedeniyle doğada serbest olarak bulunması nadirdir. (Çelik, 2022) Bununla birlikte, hidrojen, gezegenimizin büyük bir kısmını kaplayan suyun temel bileşenidir ve hayvanlarda, bitkilerde, insanlarda ve hatta fosil yakıtlarda farklı form ve bileşiklerde bulunur. Hidrojen ayrıca bir yakıt olarak kullanılabilir. Bu fikir, 18. yüzyılın ortalarında Henry Cavendish tarafından hidrojenin keşfiyle başladı ve 19. yüzyılın inmiştir. (Contreras vd., 1999:1042)

## 1. HİDROJEN ÖZELLİKLERİ

Hidrojen, periyodik tablonun en başında bulunmaktadır. Hidrojen gazı ( $H_2$ ), normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksizdir. Oksijenle birleştiğinde

su elde edilir ve yaşam için hayati öneme sahiptir. Bu gaz hafif bir gazdır; havaya göre 1/14 yoğunluğa sahiptir. Sıvı hale gelebilmesi için atmosfer basıncında -253°C'ye soğutulması gerekmektedir. Bu durumda ise yoğunluğu benzine oranla 1/10 kadar olur. Hidrojen sıvı halde bulunduğu durumlarda ısı değeri yaklaşık olarak kg başına 12 milyon jule metreküp başına ise ortalama 8400 milyon juldür. (Şen vd. 2002). Hidrojen elementi evrende bolca bulunması ve çevreye uygunluğuyla bilinmektedir. Doğada genellikle birleşik halde bulunur. Hidrojen, suyun %11.2 'sini oluşturmakta ve oksijen ile bileşik halde bulunmaktadır. Bu doğada bileşik halde bulunmasının bir örneğidir. Hidrojen insan vücudunda ortalama olarak %10 kadar bulunur bununla birlikte ham petrol ve kömür gibi kaynaklarda karbonla birleşik haldedir.

Standart bir hidrojen atomu, tek bir proton ve etrafında bir elektron içerir. (Aydemir,1998). Ancak, döteryum (veya ağır hidrojen), normal hidrojen atomunun bir izotopudur. Döteryum, hidrojenin bir izotopu olarak bilinir ve çekirdeğinde bir proton ve bir nötron bulundurur. Bu ekstra nötron, hidrojen atomunu normalden biraz daha ağırlaştırır. Bu özellik, hidrojenin izotopları arasında bulunan farklılıklardan sadece bir tanesidir. Döteryum genellikle hidrojenin doğal olarak bulunan bir izotopudur ve bulunuşu su moleküllerinde, hidrojen gazı ve suyun içinde bulunur (Midilli vd, 2005:261). Hidrojenin başka hidrojen izotopu ise trityumdur. Trityumun çekirdeğinde iki nötron bulunur ve radyoaktif bir yapıya sahiptir. Bu özelliği nedeniyle hidrojen bombası yapımında kullanılır. (Aktaş,2022). Hidrojenin gelişimi Tablo 1'de sunulmuştur.

Hidrojen 2015 yılı aralık ayında düzenlenen Fransa Paris şehrinde COP21 Birleşmiş milletler iklim değişikliği konferansında önemli konulardan biri olmuştur. Müzakereler iki hafta boyunca sürmüş ve 12 Aralık tarihinde kabul edilmiştir. Bu konferansa katılan ülkeler küresel emisyonların %99,8'ini oluşturan 195 ülke tarafından imzalanmıştır (CA,2017). Türkiye ise bu antlaşmayı 22 Nisan 2016 tarihinde imzalamıştır (Batır,2017). Paris Antlaşması, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Küresel ortalama sıcaklık artışı sebebiyle 2°C'nin altında tutulması ve mümkün olduğunca 1,5°C ile sınırlandırılması için çaba gösterilmesi amaçlamıştır (Çakmak, Doğan ve Hilmioğlu, 2018)

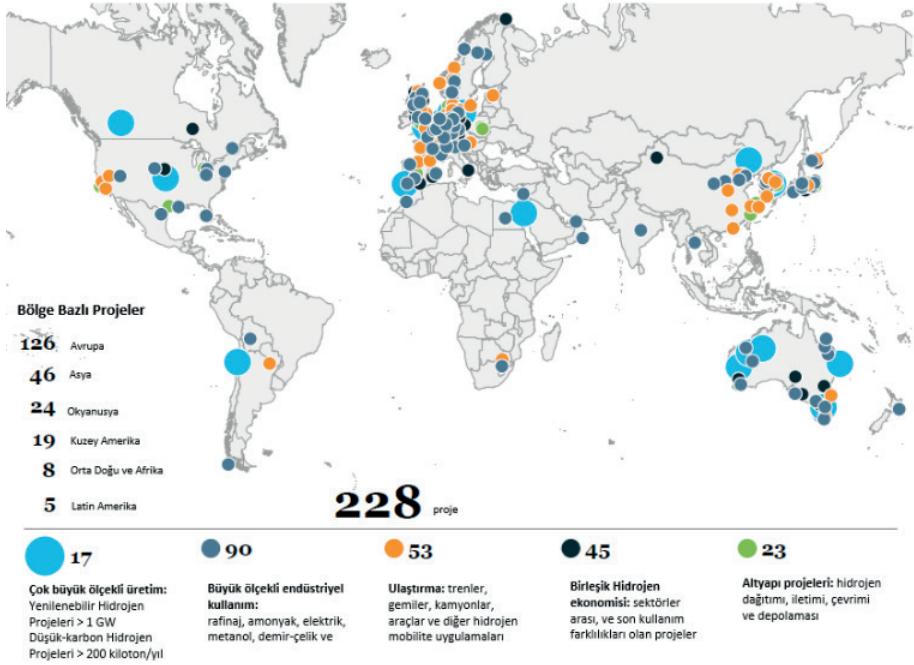
Paris anlaşması, küresel sıcaklık artışını kontrol altına almak ve uzun vadede sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için yenilebilir enerji kaynaklarına önem verilmiş, özellikle de hidrojenin kullanımıyla birlikte fosil yakıtların çokça kullanıldığı taşımacılık sanayi/ ağır sanayi gibi sektörlerde emisyonların azaltılmasında önemli bir rol oynadığı üzerinde durulmuştur (Karakaya, 2016).

Paris anlaşmasının ardından 2019 yılı ve sonrası, hidrojen teknolojilerinin çıkış yaptığı bir yıl olmuştur (IEA, 2020). Bu dönemlerde özel sektör firmaları ve hükümetler, düşük karbonlu enerji üretimine odaklanması ve bu bağlamda elektrolizörlerin kullanımı büyük önem kazanmıştır. Japonya, Güney Kore,

**Tablo 1. Hidrojen Tarihsel Gelişimi** \*(Şen, Karaosmanoğlu), \*\*(Şahin, 2002)

<b>Dönem/Tarih</b>	<b>Bilim insanı/ Kuruluşlar</b>	<b>Yapılan Çalışma</b>
16. yüzyıl	Paracelsus	Doğada keşfedilmiştir.*
16. yüzyıl	Van Helmot	Gaz olarak özel bir şekilde tanımlamıştır.*
1671	Robert Boyle	Seyreltik asit reaksiyonları ile demir tozunda bulunduğu keşfedilmiştir*
1766	Henry Cavandish	Tanımı, özellik ve içeriği ile yapılmıştır**
1783	Lavoisier	Bulunan gaza hidrojen adı verilmiştir.*
1820	Anonim	Hidrojenin yenilebilir enerji olarak kullanılabilceği fikri ortaya atılmıştır*
1911	Carl Bosh	Gübre yapında kullanılmıştır**
1970	Enstitüler	Dönemin enstitüleri enerji taşıyıcısı kullanılması fikrini ortaya atmışlardır.**
1974	T. Nejat Veziroglu	Global çapta kullanılmaya başlanmış ve bilimsel olarak konuşulmaya başlanmıştır.*
1992	AB komisyonu ve Quebec Hükümeti	Devlet özel sektör ile iş birlikleri gerçekleştirilerek hidrojen enerjisinin gelişimine ilişkin projeler üzerinde çalışıldı.**
2003	ABD	“Ekonomide Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Uluslararası Ortaklık” programı başlatıldı.  Yeşil Hidrojenin Popülaritesi ve Politikalar**

Çin gibi gelişmiş ülkeler bu dönemlerde yakıt ile hidrojen kullanımı ile ilgili büyük gelişmeler göstermiştir (Tezer,2019). Elektrolizörler, su ve temiz enerji kullanarak hidrojen üretme konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu, enerji sektöründeki tedarik zincirinin çeşitli alanlarında uygulanmaktadır. Bunlar arasında araçlar için yakıt sağlama, doğal gaz sistemlerine hidrojen enjekte etme ve elektrik depolama gibi önemli uygulamalarla ilgili çalışmalarda devam etmektedir. Ayrıca, hidrojenin demir-çelik endüstrisinde de test edilmesi önemli gelişmeler arasında yer almaktadır. Bu gelişmeler, hidrojenin enerji dönüşümünde giderek daha önemli bir rol oynadığını ve çeşitli sektörlerde benimsendiğini göstermektedir (TSKB, 2021).



**Şekil 1. Büyük Hidrojen Projeleri (Aydın, 2023)**

Dünya genelinde hidrojen stratejileri açıklayan ülkelerin sayısının arttığını ve hidrojen talebinin ve üretiminin hızla artıyor ancak elektroliz kapasitesinin ve hidrojen üretim projelerinin artmasına rağmen 2030 yılında hedeflenen temiz hidrojen arzının yeterli olmayacağı düşünülmektedir. Örneğin, 2021 yılı şubat ayında dünya genelinde 30 ülkede açıklanan hidrojen yol haritasında 228 adet hidrojen projesi bulunmaktadır (Şekil 1) (Hidrojen Konseyi, 2021).

Son yıllarda yapılan araştırmalar hidrojenin üretiminde ve kullanımında sürdürülebilir ve çevre dostu çözümlere odaklanmanın önemini vurgulamaktadır. Araştırmacılar, mevcut hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkilerini azaltarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeni üretim teknolojileri geliştirerek bu hedefe ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte hidrojenin daha geniş bir kullanım alanına sahip olabileceği ve temiz enerji dönüşümünde kilit bir rol oynayabileceği umudunu taşımaktadır (Al vd., 2022).

## 2. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hidrojenin üretimi ve kullanımı, sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Farklı kaynaklardan üretilebilmesi, hidrojeni çevre dostu bir enerji seçeneği haline getirmektedir (Al,2022). Bu özellikler hidrojenin gelecekte sürdürülebilir enerji sistemlerinde anahtar bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı

hidrojen üretimi, gelecekte enerji ihtiyacını karşılamanın önemli bir parçası olabilir. Bu nedenle, hidrojenin uluslararası enerji sahnesinde giderek daha fazla önem kazanması beklenmektedir (Midilli vd., 2005: 261).

## 2.1. Hidrojen üretim yöntemleri

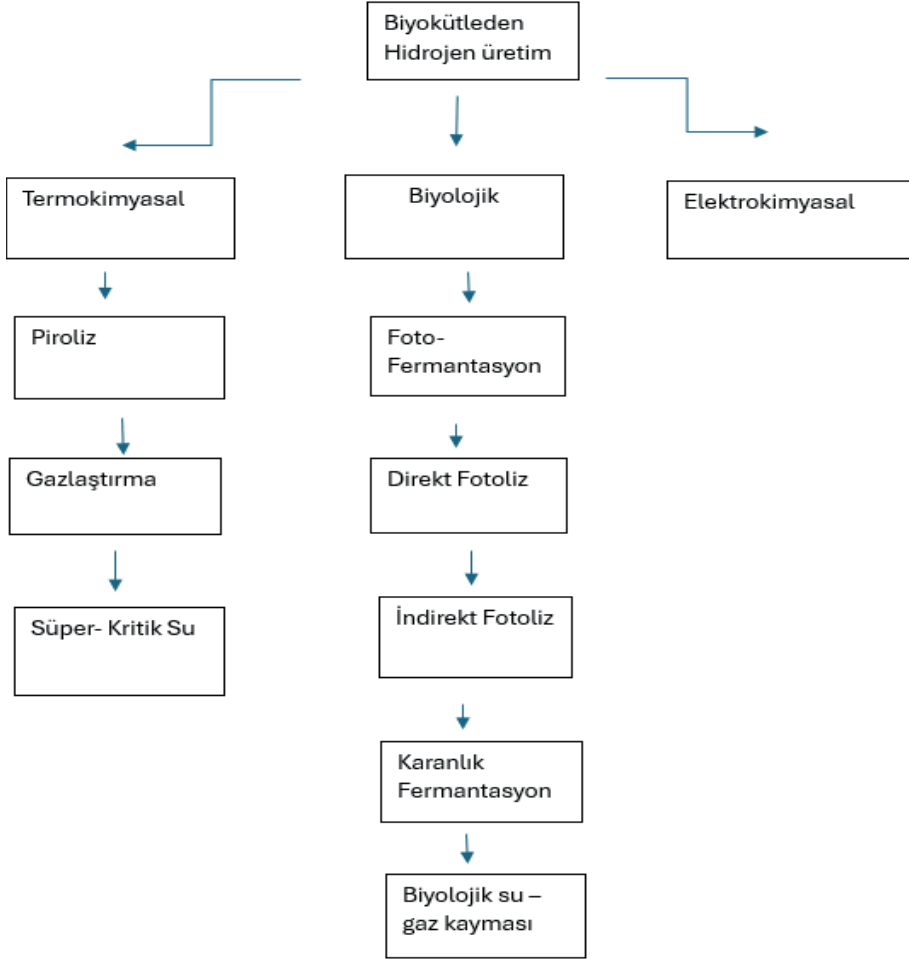
Hidrojen üretimi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Hidrojen üretimi için geçerli yöntemler demek daha doğru olabilir mi, kullanılan hammaddelere göre geleneksel ve yenilenebilir teknolojiler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Özdemir, Mutlubaş, 2019)

- *Geleneksel Teknolojiler (Fosil Yakıtlar):* Bu kategori, fosil yakıtların işlenmesini içerir. Bu süreçler, hidrokarbon reformasyonu ve piroliz yöntemlerini içermektedir. Hidrokarbon reformasyonu, buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon ve oto termal buhar reformasyonu gibi kimyasal tekniklerle gerçekleştirilmektedir (Uyar ve Beşikçi, 2017).
- *Yenilenebilir Teknolojiler (Biyokütle ve Su):* Bu kategori, biyokütle veya su gibi yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üreten yöntemleri içermektedir. Biyokütle tabanlı yöntemler, termokimyasal ve biyolojik işlemler olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Termokimyasal teknoloji, piroliz, gazlaştırma, yanma ve sıvılaştırmayı içerirken; biyolojik süreçler doğrudan ve dolaylı biyo-fotoliz, koyu fermantasyon, foto-fermantasyon ve sıralı karanlık ve foto-fermantasyonu içermektedir. Yenilenebilir teknolojilerin ikinci sınıfı, su ayrıştırma işlemleri yoluyla H<sub>2</sub> üretebilen yöntemleri içermektedir. Bu su ayrıştırma işlemleri, elektroliz, termoliz ve fotoelektroliz gibi yöntemleri içerir (Nikolaidis, Poullikkas,2017)

Termokimyasal gazlaştırma, biyokütlenin yüksek sıcaklık ve basınç altında gazlara dönüştürüldüğü bir süreçtir. Bu yöntem, biyokütlenin karbon, hidrojen ve diğer bileşenlerine ayrıştırılmasını sağlar. Piroliz ise yüksek sıcaklıkta oksijensiz bir ortamda biyokütlenin ısıtılmasıyla gerçekleşir ve gaz, katı ve sıvı ürünlere ayrışmaktadır (Şekil 2). Anaerobik parçalanma ise biyokütlenin mikroorganizmalar tarafından oksijensiz bir ortamda organik asitlere, metana ve karbondioksite dönüştürüldüğü bir süreçtir (Avcıoğlu,2012).

Depolanabilir ara maddelerin dönüştürülmesi ise biyokütleden elde edilen ürünlerin hidrojen üretimi için kullanıldığı bir yöntemdir. Bu süreç, biyo-yağın buharla yeniden şekillendirilmesini içerir, yani biyo-yağın buharla reforming işleminden geçirilerek hidrojen üretilmektedir (Dong vd., 2017).

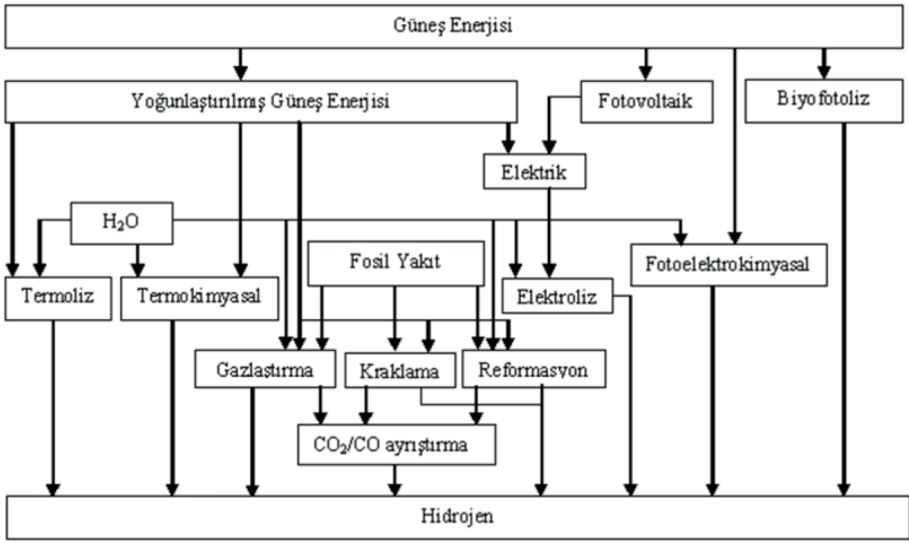
Sürdürülebilir hidrojen üretimi gazlaştırma ile piroliz süreçleri açısından uzun bir süredir kullanılmakta ve doğrultuda geliştirilmektedir. Bu yöntemler, biyokütlenin enerji dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. (Balat ve Kırtay, 2010; Setiabudi vd., 2020)



**Şekil 2.** *Biyokütleden Hidrojen Üretim Yöntemleri (Ateş, 2022)*

Bir diğer hidrojen elde etme yöntemi ise güneş enerjisidir, bu yöntem foto elektrokimyasal yöntem olarak adlandırılır ve elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen üretilmesi esasına dayanmaktadır (Çimen, 2006). Bu yöntemde, güneş pilleri suyun içine yerleştirilerek hidrojen üretimi sağlanır.

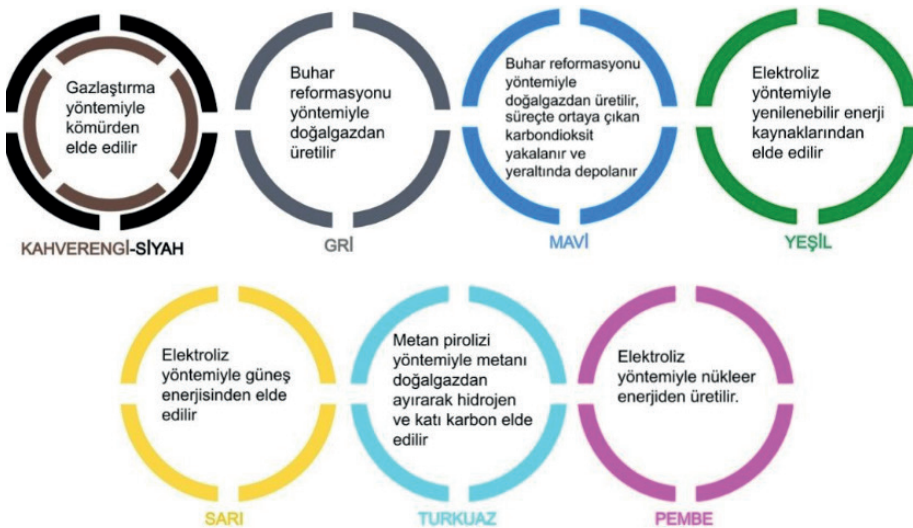
Güneş enerjisinin kullanımı hem düşük sıcaklıkta hem de yüksek sıcaklıkta çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Düşük sıcaklık uygulamaları arasında, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler; suyu hidrojen ve oksijene ayıran fotoelektrokimyasal yöntemler ve biyolojik organizmalar aracılığıyla hidrojen üreten fotobiyolojik sistemler bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamaları ise, güneş enerjisini kullanarak kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirerek hidrojen üreten termoliz ve termokimyasal çevrimler, hidrojen üretmek için organik materyalleri parçalayan gazifikasyon ve kramik gibi yöntemleri içermektedir (Şekil 3) (Touili vd., 2018).



Şekil 3. Güneş enerjili hidrojenin üretim basamakları (Öztürk vd., 2011).

## 2.2. Hidrojen Çeşitleri

Hidrojen, renklerle ifade edilen ve her biri farklı üretim yöntemlerine ve çevresel etkilere sahip olan çeşitli türlere ayrılmaktadır (Şekil 6). Bu renk kodları, hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkilerini ve enerji kaynaklarını anlamada yardımcı olur. En çevre dostu ve sürdürülebilir olanı yeşil hidrojen olarak kabul edilirken, gri ve kahverengi hidrojen en kirlenici türleri olarak bilinmektedir (Özcan, 2008).



Şekil 4. Hidrojen Renk Kodları (Özcan, 2008)

Hidrojenin üretim süreci, kullanılan yöntemle bağılı olarak çeşitli yan ürünlerin ve emisyonların oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Başlıca hidrojen üretim yöntemleri; buhar reformasyonu, elektroliz, biyokütle gazlaştırma ve termal süreçlerdir (Özdemir, Mutlubaş,2019) Buhar reformasyonu yöntemi, doğalgaz gibi fosil yakıtların su buharı ile yüksek sıcaklıklarda reaksiyona sokulmasıyla hidrojen üretir. Bu süreçte ana yan ürün olarak karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) ve karbon monoksit (CO) oluşmaktadır. Karbon emisyonları, çevresel etkiler nedeniyle önemli bir endişe kaynağıdır. *Elektroliz yöntemi*, suyun elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılmasıyla gerçekleştirilir (Koşar,2021). Elektroliz işlemi sırasında ana yan ürün olarak oksijen gazı (O<sub>2</sub>) üretilir. Bu yöntemin çevresel etkisi, kullanılan elektrik enerjisinin kaynağına bağlıdır. Eğer elektrik yenilenebilir kaynaklardan elde ediliyorsa, bu yöntem çok düşük karbon ayak izine sahiptir. *Biyokütle gazlaştırma yöntemi*, organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda ve kontrollü oksijen koşullarında gazlaştırılmasıyla hidrojen elde edilmesini sağlamaktadır (Koşar,2021). Bu süreçte karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) ve diğer hidrokarbonlar gibi çeşitli gazlar yan ürün olarak ortaya çıkar. Termal süreçler, suyun yüksek sıcaklıklarda parçalanmasıyla hidrojen üretir. Yan ürünler arasında oksijen gazı (O<sub>2</sub>) ve potansiyel olarak azot oksitler (NO<sub>x</sub>) bulunabilir. Bu yöntemlerin verimliliği ve çevresel etkileri hala araştırma aşamasındadır. Hidrojen üretim sürecinde oluşan yan ürünler ve emisyonlar, seçilen yöntemle ve süreç koşullarına bağılı olarak değişiklik göstermektedir. Karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı, hidrojen üretiminin çevresel etkilerini en aza indirmek için önemlidir. Bu nedenle, hidrojenin yeşil enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için yenilenebilir enerjiyle desteklenen üretim yöntemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir (Koşar, 2021).

### 3. TÜRKİYE'DE HİDROJEN POTANSİYELİ

Hidrojen dönemselsel olarak çalışmalar 1900'li yıllarda başlamış, 2000 yıllarında ise hız kazanmıştır. Hidrojen teknolojisi ile ilgili önemli gelişmeler 2020 yılı Enerji ve Tabii kaynaklar bakanlığının düzenlediği "Hidrojen Arama Konferansı" ile yaşanmıştır (Baltacıoğlu vd., 2019). Enerjinin depolanması ile ilgili yöntemler, doğal gaz hattında hidrojen enjeksiyonu gibi konular üzerinde durulmuştur. Bunun sonucunda yapılan çalışmalarda; Türkiye'de 2020 ve 2021 yıllarında yeşil hidrojenin doğal gaz sistemine karışımıyla ilgili çeşitli testler yapılmıştır. Bu testler laboratuvar ortamında ve İzmir sanayi bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Rzayeva ve Lambert, 2021: 1). Burada yapılan testler sonucunda mevcut doğal gaz hatlarına %5 'lik bir hidrojen karışımı eklenmesinde bile 2,5 milyar metreküp gaz ithalatını azaltılabildiği ve bununla birlikte cari açıkta ciddi düşüşler yaşanabileceğini sonucuna varılmıştır (Çolak vd.,2021: 44).

Türkiye' nin temiz hidrojen kullanım alanlarına bakılacak olursa oldukça fazla olduğu görülmektedir. Sektörel bazda kullanım alanları; enerji üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması ve dönüştürülmesinde, ulaşım sektöründe, hidrojen yakıt hücreli araçlar, otobüsler ve trenler gibi araçlarda karbon salınımını azaltması gibi sıralanabilmektedir (Karsan,2022). Sanayide, hidrojen çeşitli kimyasal işlemlerde ve ürünlerin üretiminde kullanılmasıyla karbon yoğunluğu azaltılabilir (Karsan, 2022). Isıtma ve soğutma sistemlerinde ise alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir, özellikle endüstriyel ve ticari binalarda, tarım ve gıda endüstrisinde gübre üretiminde ve tarım makinelerinin çalışmasında ve gıda endüstrisinde işleme ve paketleme gibi alanlarda kullanılabilir (Çağrı vd., 2012). Çelik üretimi, cam üretimi ve diğer endüstriyel süreçlerde hidrojen kullanımı da önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye, bu çeşitli kullanım alanlarını keşfederek ve geliştirerek karbon salınımını azaltabilir ve enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayabilir. (Saygın vd., 2021:13).

#### 4. HİDROJENİN DEPOLANMASI ve NAKLİYESİ

Hidrojeni gaz, yani saf haliyle depolamak teknolojik ve maliyet açısından zordur bunun için uygun altyapılar oluşturulmak gerekmektedir. Enerji sisteminde sıfır karbon emisyon hedeflerine doğru ilerlerken, yeşil hidrojen sistemin dönüşümünde kilit bir rol oynayabilir. Ancak, temiz hidrojenin her aşaması üretiminden son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar dikkatlice incelenmelidir. Bu süreçte, arz zincirinin her aşamasının uygun maliyetli ve istikrarlı olması gereklidir; bu da depolama ve taşımanın yanı sıra üretim sürecini de içermektedir (Tablo 2). Arz güvenliği göz önünde bulundurulduğunda, hidrojenin kesintisiz olarak sağlanması kritik önem taşır ancak mevcut hidrojen altyapısı henüz yeterince gelişmemiş olması bazı zorluklara neden olmaktadır. Hidrojenin saf haliyle depolamak, teknolojik ve maliyet açısından zordur. Bunun yapılabilmesi için altyapılar oluşturulmalıdır. (Ratnakar, vd., 2021: s. 24154)

**Şekil 2.** Hidrojen Üretim Taşıma ve Depolamada Oluşan Gereklilikler (Demirocak, 2017)

Üretim	Taşıma	Depolama
Enerji yoğunluğu ve maliyet	Dağıtım için kapsamlı ve güvenli altyapı	Hedeflenen ihtiyacı karşılayabilirlik
Yenilenebilir enerji tabanlılık		

Hidrojenin depolanması ise gaz ya da sıvı olarak yapılabilir. Boşalmış yeraltı tuz mağaraları sızıntı ihtimali yüksek olsa da gaz halinde depolamak için kullanılmaktadır. Tuz mağaralarının kullanımı riskli olsa da maliyet açısından avantaj sağlamaktadır (Güngörlü, 2022: 70). Sıvı olarak depolanmak için ise çift katmanlı olan iyi yalıtıma sahip depolar yapılmaktadır. Hidrojen molekülleri, katı halde saklamak için ise genellikle karbon tabanlı malzemelerle etkileşime girerek bu malzemelerin yüzeylerinde emilir ve depolanır. Daha sonra ihtiyaç duyulduğunda, bu malzemelerin yüzeylerinden serbest bırakılarak hidrojen serbest hale getirilir. Bu yöntem, hidrojenin güvenli ve etkin bir şekilde depolanmasını sağlayarak, taşınmasını ve kullanılmasını kolaylaştırmaktadır (Tutar ve Eren, 202: 8-9).

Hidrojen nakilleri ise genellikle boru hatları, tanklar veya taşıma araçları kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, hidrojen genellikle boru hatlarıyla taşınmaktadır (Koşar,2021) . Boru hatları, hidrojenin güvenli ve verimli bir şekilde uzak mesafelere taşınmasını sağlamaktadır. Büyük endüstriyel tesisler arasında veya üretim tesislerinden son kullanıcıya kadar boru hatları kullanılabilir. (Sahin,2016 :123)

Hidrojen nakilleri, hidrojenin güvenli bir şekilde taşınmasını ve depolanmasını sağlamak için titizlikle planlanmakta ve uygulanmaktadır. Güvenlik önlemleri, hidrojenin yanıcı özelliği göz önünde bulundurularak alınır ve endüstriyel standartlara uygun olarak gerçekleştirilir. (Koşar, 2012)

## **5. HİDROJEN KAZALARININ TARİHSEL İNCELEMESİ**

Günümüzde hidrojen teknolojisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer edinmiştir. Hidrojenin, fosil yakıtlar yerine kullanılarak karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli, temiz enerji arayışında büyük bir umut kaynağı olmuştur. Hidrojen yakıt hücreleri, elektrik üretiminde ve araçlarda kullanılabilir, bu da fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olabilir. Ancak, bu teknolojinin bazı riskleri de mevcuttur. Hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özelliğe sahiptir bu nedenle gerekli önlemler alınmadığında kazalar meydana gelmektedir. Bu kazalar genellikle hidrojenin kaçması, sızması veya yanlış depolanması sonucu ortaya çıkar.

Birçok hidrojen kazası, hidrojenin yüksek yanıcılığı ve patlayıcılığından kaynaklanmaktadır. Örneğin, Hindenburg zeplin kazası 1937'de New Jersey'de meydana gelmiş ve hidrojen dolu bir zeplinin yanması sonucu 36 kişinin ölümüne neden olmuştur (Atılhan,2021)). Bu tür kazalar, hidrojenin hafifliği ve havadan daha az yoğun olması nedeniyle havayla karıştığında patlama riskinin yüksek olmasıyla ilişkilidir.

Endüstriyel ve laboratuvar ortamlarında da hidrojen kazaları yaşanmıştır. Hidrojenin yanıcı doğası, sızıntıların veya yanlış depolamanın ciddi sonuçlara yol açabileceği anlamına gelmektedir (Kurmayer,2021). Bununla birlikte, güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte,

hidrojenin güvenli kullanımı için daha iyi uygulamalar geliştirilmeye devam etmektedir (Atilhan vd., 2021).

### 5.1. Hidrojenin Riskleri

Günümüzde hidrojenin enerji sektöründeki öneminin arttığını ve Avrupa Komisyonu'nun 2050 enerji öngörülerini değerlendirdiği bir rapora dayanarak bu trendin devam edeceği öngörülmektedir. Hidrojenin çevresel kirliliği azaltma potansiyeli ve altyapı gereksinimlerini minimize etme kapasitesi önemli bir faktördür fakat hidrojenin kullanımında bazı riskler mevcuttur. Metan gazı ile karşılaştırıldığında, hidrojenin parlama enerjisi düşük, yanma hızı yüksek ve geri tepme riski bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrojenin güvenli taşınması ve kullanılması için sıkı protokoller gerekmektedir (Kurmayer, 2021).

Hidrojen ile ilgili riskler soyut değildir ve Avrupa Parlamentosu gibi kurumlar, hidrojenin enerji sektöründeki önemini göz önünde bulundurarak güvenlik konusunu önemsemektedir. Hidrojen üretimi, taşınması ve kullanımıyla ilgili güvenlik standartlarının yüksek olması, hidrojenin temiz enerji geçişinde başarılı olabilmesi için kritik öneme sahiptir. (Yanze,2015) Avrupa Komisyonu, hidrojenin temiz enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayabileceğini vurgulamaktadır (Yanez vd., 2015). Ancak, güvenlik önlemlerinin de bu süreçte önemli olduğunu belirtmektedir. Avrupa Parlamentosu'nda hidrojen güvenliği konusunda farklı görüşler bulunsa da genel olarak güvenlik standartlarının yüksek olması gerektiği vurgulanmaktadır ve Avrupa Hidrojen Güvenliği Paneli 'nde hidrojenle ilgili kazaların incelenmesi ve öğrenilen derslerin paylaşılması için bir veri tabanı oluşturulmuştur (Karal vd,2021). Bu veri tabanı, hidrojenle ilgili güvenlik endişelerini daha iyi anlamak ve önlem almak için önemli bir araç niteliğindedir (Kart vd., 2021)

Hidrojenle ilgili riskler gazı kullanan veya üreten birçok faaliyeti etkilemektedir. Örneğin, kimyasal, ilaç, petrol rafinasyonu, nükleer veya ulaşım endüstrileri, ayrıca metalurji, metal işleme ve geri dönüşüm veya hidrojenin sıklıkla kazara üretildiği sanitasyon gibi alanlar, risklerin daha da zararlı olduğu yerler olarak sıralanabilir (Davood,2020). İncelenen kazaların neredeyse %20'si, su ile erimiş metal arasındaki temas sonucu kazara H<sub>2</sub> üretiminden, su gazı oluşumundan, bazı reaksiyonlardan veya çeliklerin korozyonundan kaynaklanmaktadır. Son durum, özellikle konsantre asitler kullanan tesisleri etkileyebilir. İşletmecilerin ve kurtarma personelinin bu tür tehlikeli reaksiyonları daha iyi anlamasıyla ilgili riskler azaltılabilir. Hidrojenin küçük boyutu nedeniyle kaçma eğilimi, geniş yanabilirlik aralığı, düşük tutuşma enerjisi ve patlamaya yatkınlığı gibi özellikleri, sınırlı veya yarı sınırlı alanlarda (yüksek noktalar, tankların girintileri, çatılar vb.) özellikle tehlikeli kılmaktadır. Bu nedenle, hidrojen içeren kazaların %84'ü ciddi insan sonuçlarıyla yangın ve/veya patlamalardır (Davood, 2020). Pil, şarj veya elektroliz atölyelerinde benimsenmesi gereken en iyi strateji; sınırlı, kalabalık olmayan açık ortamları veya iyi havalandırılmış atölyeleri tercih etmektir. Hidrojen içeren kazaların kökeniyle ilgili olarak, analizlerin gösterdiği gibi vakaların %70'inden fazlasında

“organizasyonel ve insan faktörleri” kazaların kök nedenlerini oluşturmaktadır (Tunca,2016). Hidrojen, yapısı gereği her zaman ateşleme riskine sahiptir. Bu sebeple hidrojen kullanılan tesislerde tüm çalışanların hidrojen gazı ile ilgili bilgi sahibi olması sağlanmalıdır.

## 5.2. Yaygın Hidrojen Kazaları ve Bunların Nedenleri

- Zeplin Kazaları: Geçmişte zeplinlerde hidrojenin kullanılması, bazı büyük kazalara yol açmıştır. En ünlüsü 1937’de Hindenburg zeplininin yanmasıdır. Hidrojen dolu zeplin, statik elektrik nedeniyle yanmış ve felakete yol açmıştır.
- Sanayi Kazaları: Endüstriyel tesislerde hidrojen kullanımı birçok kazaya sebep olmaktadır. Bu kazaların en sebebi hidrojen sızması sonucu yanıcı atmosferin oluşmasıdır. Yanıcı atmosfer patlama riskini artırır, düzenli ekipman bakımı gibi önlemlerle bu kazalar azaltılabilir. (Dagdougu vd., 2018)
- Taşıma Kazaları: Hidrojenin depolanması ve taşınması sırasında kazalar meydana gelebilir. Bunun en önemli sebebi, taşıma araçlarında sızıntılar meydana gelmesidir. Araçla ilgili uygun bakımlar yapılarak güvenli taşıma sağlanabilir.

Hidrojen kazaları genellikle ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Bu sebeple bu gazın güvenli kullanımı ve taşınmasıyla çalışmalar bulunmaktadır. (Özyağcı,2008)

### Tarihte yaşanmış en büyük hidrojen kazaları:

Heindenburg Felaketi (1937): Alman yapımı bir zeplin olan Hindenburg, 6 Mayıs 1937’de ABD’nin New Jersey eyaletindeki Lakehurst Havaalanı’na iniş yaparken ani bir şekilde alev aldı ve infilak etti. Zeplinde bulunan hidrojen gazı nedeniyle yangın meydana gelmiştir. Bu yangın 36 kişinin ölümüne ve birçok kişinin yaralanmasına neden olmuştur. Bu kaza sonucunda hidrojenin yakıt olarak hava taşımacılığında kullanılmamaya başlanmıştır (Öztürk, 2021)

Space Shuttle Challenger Faciası (1986): 28 Ocak 1986’da NASA’nın uzay mekiği Challenger, Kennedy Uzay Merkezi’nden fırlatılmıştır. Ancak fırlatılmasından 73 saniye sonra infilak etmiştir. Kazanın nedeni, roketlerin alt kısmındaki hidrojen tankının sızıntısı ve patlamasıydı. Bu olay sonucunda astronotların hepsi hayatını kaybetmiştir.

Space Shuttle Columbia Faciası (2003): 1 Şubat 2003’te Columbia uzay mekiği, atmosfere giriş yaparken parçalandı ve infilak etmiştir. Kazanın nedeni, uzay mekiğinin sol kanadındaki ısının neden olduğu hasar ve bu hasara neden olan sıvı hidrojenin tankında bulunan sızıntı sebep olmuştur. Bu felakette de tüm mürettebat öldü. (Schwartz, 1987)

Bu felaketler, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı doğasının ciddi sonuçlara yol açabileceğini göstermektedir. Bu tür kazaların önlenmesi ve risklerin

azaltılması için güvenlik önlemleri ve teknolojik iyileştirmelerin sürekli olarak gözden geçirilmesi önemlidir.

## SONUÇ

Hidrojen, son yıllarda alternatif yakıt kaynakları arasında artan ilgi görmektedir. 16.yüzyıldan itibaren hidrojenle ilgili birçok çalışmalar yapılmıştır. 2015'te görüşmeleri başlanan 2016 yılında Türkiye'nin de katıldığı Paris anlaşmasıyla birlikte hidrojen önem kazanmıştır. Ancak, hidrojenin kullanımıyla ilgili bazı riskler de mevcuttur. Hidrojenin yanıcılığı ve patlayıcı özellikleri nedeniyle güvenlik endişelerini artırmış olsa da Hidrojen, gelecekte temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir rol oynayacağını düşünülmektedir. Hidrojen, yakıldığında sadece su buharı ve enerji üretmektedir. Bu nedenle, fosil yakıtların aksine atmosfere zararlı emisyonlar salmaz. Bu özelliği nedeniyle, hidrojenin kullanımı iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayabilir bu da hidrojen kullanımını çekici bir hale getirmektedir. Hidrojen, enerji depolama ve taşımacılık gibi birçok farklı alanda kullanılabilir. Yakıt hücresi araçlar, hidrojeni yakarak elektrik üretir ve sadece su buharı çıkar. Ayrıca endüstriyel süreçlerde, enerji depolama sistemlerinde ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Bunun yanı sıra hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilerek kullanılabilir. Örneğin, fazla güneş enerjisi veya rüzgâr enerjisi hidroliz yardımıyla hidrojene dönüştürülebilir ve depolanabilir. Bu, enerji sisteminin daha istikrarlı ve esnek hale gelmesine yardımcı olabilir.

Tüm bu olumlu yanlarının yanında hidrojenin geleceği için bazı zorluklar da vardır. Üretim, depolama ve taşıma maliyetleri halen yüksektir. Ayrıca, hidrojenin büyük ölçekli kullanımı için altyapı ve teknoloji geliştirme gerekliliği vardır. Bu zorluklara rağmen, hidrojenin potansiyeli büyüktür ve ilerleyen yıllarda teknolojik gelişmelerle birlikte daha yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelebileceğini düşünmekteyim.

## KAYNAKÇA

- Aktaş, M.** (2022). *PEM yakıt hücresinin mesken besleme sisteminde kullanılması üzerine bir araştırma*. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K., Tanç, B., & Sürer, M. G.** (2019). A perspective on hydrogen energy research, development and innovation activities in Turkey. *Energy Research*, 588-593.
- Ateş, K., & Bayrakdar, E.** (2022). *Enerji, sürdürülebilir hidrojen üretim teknolojileri biyokütle temelli yaklaşımlar*. Yalova Üniversitesi.
- Atılhan, S., et al.** (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>

- Avcioğlu, A. O., & Türker, U.** (2012). Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1557-1563.
- Aydemir, S.** (1998). *Enerji kaynağı olarak hidrojen üretim yöntemlerinin incelenmesi*.
- Ayşe Şehnaz Kart & İskender Gökalp.** (2021). Decarbonizing with Hydrogen and Precautionary Regulating: What Energy Sciences and Policy & Law Studies Have To Say in Common. *10th European Combustion Meeting*, Naples (Virtual), Italy.
- Batır, K.** (2017). Avrupa Birliği'nin geri kabul anlaşmaları: Türkiye ile AB arasında imzalanan geri kabul anlaşması çerçevesinde hukuki bir değerlendirme. *Yönetim Bilimleri Dergisi/Journal of Administrative Sciences*, 15(30), 585-604.
- Bektaş, B., Hakyemez, C., Yanık, D. Ö., & Yıldızca, O.** (2021). *Hidrojen enerjisi bilgilendirme notu*. İstanbul: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş.
- Colak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B.** (2021). Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi. *Shura Enerji Dönüşüm Merkezi, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi Enerji Politikaları Araştırma Merkezi*.
- Contreras, A., Carpioa, J., Moleroa, M., & Veziroğlu, T. N.** (1999). Solar hydrogen: An energy system for sustainable development in Spain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24.
- Dang, C., Liu, L., Yang, G., Cai, W., Long, J., & Yu, H.** (2020). Mg-promoted Ni-CaO microspheres as bi-functional catalyst for hydrogen production from sorption-enhanced steam reforming of glycerol. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123204.
- Demirocak, D. E.** (2017). Hydrogen Storage Technologies. In *Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion: Hydrogen Production, Storage, and Utilization* (pp. 117–142). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53514-1>
- Dagdougui, H., & Ouammi, A.** (2018). *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications: Hydrogen Logistics, Safety and Risks Issues*.
- IEA.** (2020). *Hidrojen*. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- Hidrojen Konseyi.** (2021). *2021 Hidrojen Anlayışı*. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
- Karsan.** (2022, Eylül 20). *Karsan hidrojen çağını başlatıyor*. Karsan Basın Odası. <https://www.karsan.com/tr/basin-odasi/guncel-haberler/karsanhidrojen-cagini-baslatiyor>
- Koşar, C.** (2021). Hidrojen depolama yöntemleri. *Open Journal of Nano*, 1-6.
- Kurmayer, N. J.** (2021). The lesser-known hydrogen roadblock: Safety concerns. *EURACTIV*. <https://www.euractiv.com/section/energy/news/the-lesser-known-hydrogen-roadblock-safety-concerns/>

- Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., & Rosen, M. A.** (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: Current status and needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 255-271.
- Özcan, B.** (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *Humanities Sciences*, 3(2), 152-160.
- Özdemir, M.** (2019). *Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri*.
- Karakaya, E.** (2016). *Paris Anlaşması ve Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme. Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-12.
- Rzayeva, G., & Lambert, M.** (2021, Kasım). What Role for Hydrogen in Turkey's Energy Future? *The Oxford Institute for Energy Studies*, 1-20.
- Saygın, D., Gencer, E., & Sanlı, B.** (2021). Türkiye'nin ulusal hidrojen stratejisi için öncelik alanları. *Shura Enerji Dönüşüm Merkezi*.
- Schwartz, H. S.** (1987). On the psychodynamics of organizational disaster: The case of the Space Shuttle Challenger. *Columbia Journal of World Business*.
- Şahin, S.** (2006). Nükleer hidrojen üretimi. In B. Görgün & S. Alagöz (Eds.), *III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Bildiri Kitabı*.
- Tezer, Ö.** (2019). Güney Kore'nin ekonomik elitleri ve siyasi sistem içerisindeki konumları. *Fiscaoeconomia*, 3(3), 80-97.
- Uyar, T. S., & Beşikçi, D.** (2017). Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2453-2456.

# PAPYON (BOW TIE) ANALİZİ İLE HİDROJEN GÜVENLİĞİ: TEHLİKELERİ ÖNLEME VE SONUÇLARI AZALTMA YAKLAŞIMI

**Melek TÜRK**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Orcid ID: 0000-0003-1304-7505

Günümüzde dünya nüfusundaki hızlı artış ve teknolojik gelişmeler küresel enerji ihtiyacının sürekli artış göstermesine neden olmaktadır. Artan enerji talebine karşın, yaygın olarak kullanılan petrol ve doğalgaz kaynakları hızla tükenmektedir (Ural ve Karaca 2016; Koşar, 2021; Mutlubaş ve Özdemir 2023). Bu doğrultuda; enerji arz güvenliğini sağlamak ve sınırlı doğal kaynakların tükenmesini geciktirmek amacıyla yenilikçi enerji çözümleri üzerine bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır (Koşar, 2021; Mutlubaş ve Özdemir 2023).

Güvenlik olgusu ulusal, uluslararası ve bireysel bir tehdide karşı alınabilecek tedbirler veya tehdidin tamamen son bulması anlamına gelmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Enerji Güvenliği olgusu, enerji krizleri ve küresel ısınmanın ele alındığı her koşulda yer almaktadır. Enerji güvenliği kavramı kurum, kuruluş ve kişilerin görüşlerine göre tanımı değişebilmekle birlikte genel anlamda, enerji kaynaklarına sorunsuz erişim, kısıtlı sayıdaki kaynaklardan bağımsız hareket edebilmeyi ve kısıtlı coğrafi bölgelerde yer alan enerji kaynaklarına bağımlı/bağlı olmadan temin edebilmeyi ifade etmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Enerji güvenliği olgusu ilk olarak I. Dünya Savaşı'nın hemen öncesinde su yüzüne çıkan bir görüştür. İngiliz donanmasının üst komutanı olan Winston Churchill'in gemilere enerji temini sağlayan kömürün petrole dönüşmesini talep etmesi üzerine, İngiliz Donanmasının Alman Donanmasına karşı dezavantaj oluşturmasıyla ortaya çıkmıştır (Kılıç ve Oral, 2023). 21. Yüzyılda enerji güvenliğindeki değişimler sadece tüketici ülkelerde değil ayrıca arz ülkelerinde ve enerji geçiş alanlarında da vazgeçilmez bir unsur olmuştur (Kılıç

ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024). Enerji bakımından kaynak ülkelere bağımlı hale gelen ülkeler kaynak sağlayıcıların manipülasyonlarına ve tehditlerine karşı savunmasız kalmışlardır (Kılıç ve Oral, 2023). Bu Kapsamda, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi üç temel nedene dayandırılmıştır. Birincisi fosil yakıtların çevreye olan zararı ve küresel ısınma, ikincisi doğalgaz ve petrole olan bağımlılığı azaltmak, üçüncüsü de teknolojik maliyet ve üretim-tüketim zinciri açısından sınırsız ve ucuz bir enerji kaynağı olmasını sağlamaktır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023).

Hidrojen enerjisine ilişkin alan yazın incelendiğinde, ağırlıklı olarak fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen üretimi, depolanması ve taşınması odaklı olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda bu kitap bölümünde fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen enerjisi ve papyon (Bow tie) risk analizi ele alınmıştır (Daş ve Teke Öner, 2025).

## 1. FOSİL YAKITLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

Genel anlamda fosil yakıtlar için kullanılan kavram kömür, doğalgaz ve petrol için kullanılmaktadır. Dünya temel enerji tüketiminin yaklaşık %82'sini fosil yakıtlardan karşılamaktadır (Kılıç ve Oral, 2023; Bilgiç Tüzemen, 2024; Kytömaa et al., 2024). Fosil yakıtların %24'ü doğalgazdan, %27'si kömürden ve %31'i petrolden temin etmektedir (Kılıç ve Oral, 2023; Bilgiç Tüzemen, 2024; Kytömaa et al., 2024).

### 1.1. Kömür

Kömürün ilk kez endüstriyel yakıt olarak kullanımına ilişkin kanıtlar, yaklaşık 3000 yıl öncesinde Çin'de ortaya çıkmıştır. Çinliler MÖ 200 yıllarında kömürü ticari bir ürün olarak ve ısınmak amacıyla kullanmaya başlamışlardır. Çin'de fırın ve demirhanelerde yoğun odun kullanımı ormansızlaşma tehlikesini beraberinde getirmiş ve zamanla enerji kaynağı olarak odundan kömüre geçişi zorunlu kılmıştır (Kılıç ve Oral, 2023).

Kömür, bitkisel kökenli maddelerin çürümesi sonucu oluşan inorganik ve organik bileşenleri içeren tortul bir kayadır. Bataklıklarda yer alan ağaç ve bitkisel kalıntıların birikmesi sonucu fiziksel ve kimyasal süreçlere milyonlarca yıl maruz kalınması sonucu oluşmaktadır. British Petroleum 'un (BP) 2022 yılı verilerine göre dünyada toplam 1.074,108 milyar ton kömür rezervi yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Bu rezervin yaklaşık 320.469 milyar tonu linyit rezervi, geriye kalan 753.639 milyar tonu taşkömüründen oluşmaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Dünyanın birçok ülkesinde kömür rezervi bulunmasına rağmen sadece dört ülke %65'lik bölümünü oluşturmaktadır. En fazla kömür rezervi bulunan ülke %23,2 ile ABD'dir. İkinci sırada %15,1 ile Rusya bulunmaktadır. Üçüncü sırada toplam rezervin %14 payı ile Avustralya ve dördüncü sırada %13,3'ünü kapsayan Çin yer almaktadır. Fakat Çin dünyada kömür üretimi ve tüketiminde birinci sırada yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). ABD Enerji

Ajansı (EIA) 2050 hedeflerine göre 2020 yılında birincil enerji talebinde kömür ikinci sırada bulunmaktadır. 2050 yılına gelindiğinde ilk sırada petrol, ikinci sırada yenilenebilir enerji, üçüncü sırada doğalgaz ve sonrasında kömür olacağı öngörüsü bulunmaktadır. Dünya ne kadar kömüre bağlılık/bağımlılıktan geri adım atmak istese de yaşanan ekonomik, siyasi, askeri ve sosyal olaylar nedeni ile vazgeçememektedir (Kılıç ve Oral, 2023).

## 1.2. Petrol

Petrol, milyonlarca jeolojik süreç sonucunda fiziksel ve kimyasal etmenlerin etkisi ile kayaçların içerisinde sıvı halde bulunan hidrokarbonlardır. Petrol, hidrojen ve karbon bileşimlerinden oluşmasının yanı sıra az da olsa oksijen, kükürt ve nitrojenden oluşmaktadır. Petrolün ilk üretimi 1860 yılında ABD Pensilvanya'da evlerin aydınlatılması amacı ile gazyağı kullanılması sonucu ortaya çıkmıştır. 1900 yıllarda içten yanmalı motorlar ve sonrasında 1910 yılında içten patlamalı motorların keşfi ile önemli bir yere sahip olmuştur. 19. yüzyılda en önemli enerji kaynağı kömür iken 20. yüzyılda petrol damgasını vurmuştur. Dünyada petrol tüketiminin en büyük payını %70 ile ulaşım sektöründe akaryakıt ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Ülkeler bazında petrol tüketimi değerlendirildiğinde; ilk sırada ABD ve ikinci sırada Çin yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023).

## 1.3. Doğalgaz

Doğalgaz, yer altında gözenekli kayaların içinde sıkışmış olarak veya petrol yataklarının bulunduğu alanlarda gaz halinde bulunan hidrokarbonlardır. Petrolle aynı sahada bulunduğu gibi bağımsız olarak da bulunabilmektedir. Doğalgazın %80-%95'i metandan meydana gelmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Doğalgazın oluşumu kömür ve petrolde olduğu gibi hayvan ve bitki gibi organik maddelerin yüksek basınç ve ısı altında kalması sonucu oluşmaktadır. Doğalgaz kömür ve petrole göre en temiz fosil yakıt olarak kabul edilmektedir. Bunun nedeni doğalgaz yakıldığında kömür ve petrole göre daha az CO<sub>2</sub> emisyonu yaymasından kaynaklanmaktadır. Doğalgaz bu açıdan bakıldığında; petrole göre %25, kömüre göre %60 oranında daha az kirletici salınım yaymaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Dünyada 1970 yılında yaşanan enerji krizleri enerji kullanım alanlarında değişikliklere neden olmuştur. Doğalgazın sıvılaştırılma (LNG) teknolojilerinin geliştirilmesi ve doğalgaz boru hatlarının inşa edilmesi sonucu doğalgaza olan talep artmıştır. Doğalgaz rezervinin coğrafi bölge dağılımı değerlendirildiğinde; %40 ile birinci sırada Orta Doğu, Avrasya bölgesi ikinci sırada ve Asya-Pasifik üçüncü sırada yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Küresel çapta doğalgazın talep edilmesinin iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi gelişmiş ülkelerin düşük karbonlu enerji politikasının bulunmasıdır. İkincisi de gelişmekte olan ülkelerin ekonomik açıdan büyümek için artan talep isteğidir (Kılıç ve Oral, 2023).

## 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

Yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji ve 21. Yüzyılın enerji kaynağı olan hidrojen enerjisidir. Yaşanan enerji krizlerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve teknolojilerin gelişmesinin katkısı büyük olmuştur. Ayrıca gelişmekte olan ülkelerin çevre bilincinin artmış olmasının da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki önemi daha da artmıştır. Sürdürülebilir, tükenmeyen, atmosferi, çevreyi ve insan sağlığını olumsuz etkilemeyen enerji kaynakları geleceğin belirleyici unsuru olacaktır (Kılıç ve Oral, 2023). Gelişmiş ülkeler için sıfır emisyon üreten yenilenebilir enerji kaynakları gelecek için stratejik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda; 2050 yılına kadar fosil yakıtlardan çevreye sıfır emisyon ile yayılması amaçlanmaktadır. Bu talebin karşılanabilmesi için maliyetin düşürülmesi, depolanma teknolojilerinin geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji teknolojilerin ilerlemesi gerekmektedir (Kılıç ve Oral, 2023; Ahad et al., 2023; Muthiah et al., 2024). Yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajları olduğu kadar dezavantajları da bulunmaktadır; kesintili üretim yapılması 7/24 erişimde sorunlar oluşturmaktadır. Depolama teknolojisindeki gelişmeler ile bu sorun tamamen olmasa da çözümlenmektedir (Kılıç ve Oral, 2023).

### 2.1. Hidrolik Enerji

Su, tüm canlılar ve modern dünya için vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Su, potansiyel enerjiden kinetik enerjiye dönüştürülerek, mekanik enerji sayesinde elektrik enerjisi elde edilmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Dolayısıyla sıfır karbonsuz, yenilenebilir enerji türüne sahip olunmaktadır (Muthiah et al., 2024). Beyaz kömür olarak isimlendirilen hidrolik enerji akarsu ve kanalların oluşturduğu hareketli su akışından üretilmektedir. Ayrıca barajlarda biriktirilen suyun belli yükseklikten aşağıya düşmesi sonucu elektrik enerjisi elde edilmektedir (Kılıç ve Oral, 2023).

### 2.2. Güneş ve Rüzgâr Enerjisi

Güneş enerjisinden hidrojen elde edilmesi fotoelektrokimyasal bir yöntemle üretilir (Ural ve Karaca 2016). Güneş enerjisinden faydalanmak için güneşlenme süresinin fazla olması gerekmektedir. Rüzgâr enerjisi, güneşin oluşturduğu yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş ışınlarının atmosfere farklı açılardan düşmesi, sıcaklık farkının meydana gelmesine neden olmaktadır. Sıcaklık farkından oluşan rüzgârın kinetik enerjisini kullanarak rüzgâr türbini vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir (Başol, 2021).

### 2.3. Jeotermal Enerji

Güvenilir ve temiz bir enerji kaynağı olan jeotermal enerji elektrik ve ısı üretiminde yenilebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. 2050 yılına kadar sıfır emisyon amaçlarına gerçekleştirmek için jeotermal enerji olmazsa olmazdır. Jeotermal kaynaklar özellikle deprem kuşaklarının olduğu sahalarda ve volkanik hareketlerin bulunduğu bölgelerde yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023; Ahad et al., 2023).

## 2.4. Biyokütle Enerjisi

Fosilleşmemiş hayvansal ve bitkisel organik atıklardan meydana gelmektedir. Enerji üretimi yapılırken katı, sıvı ve gaz halinde sınıflandırılmaktadır. Katı biyokütle enerji kaynakları, bitki atıkları, tezek ve odun olarak sınıflandırılmaktadır. Sıvı ve gaz biyokütle enerjisi son yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır (Kılıç ve Oral, 2023).

## 3. HİDROJEN ENERJİSİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

1973 yılında Arap-İsrail savaşıyla ortaya çıkan enerji krizi sonrasında, Ortadoğu petrolüne minimize etmek isteyen batılı ülkeler, yeni alternatif enerji kaynakları arayışı içerisine girmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan ilgi, söz konusu enerji kaynaklarının üretimindeki payını artırmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneşin kesintili olması nedeniyle sürdürülebilir enerji arzının sağlanması için çeşitli enerji depolama teknolojilerine artış göstermiştir. Bu enerji depolama yöntemlerinden biriside hidrojen enerjisidir. Hidrojen enerjisinin elde edilmesi çok eski zamanlara dayanmasına rağmen, enerji üretiminde ya da kullanımında alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmemiştir. Öte yandan 2022 yılında Rusya-Ukrayna savaşı patlak vermesi üzerine Avrupa ülkeleri arz güvenliğini sağlamak için alternatif arayışlar içine girmişlerdir. Bu doğrultuda hidrojen enerjisi tekrar gündeme gelmiştir ve hidrojen enerjisine yönelik yatırımlar ivme kazanmıştır (Tunçbilek, 2024).

Hidrojen evrende en yaygın bulunan renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirsiz ve havaya kıyasla 14 kat daha hafif olan bir elementtir (Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023; Tunçbilek, 2024; Muthiah et al., 2024; Qanbar et al., 2024; Daş ve Teke Öner, 2025). Hidrojen  $-252.77$  °C atmosfer basıncında soğutularak sıvılaştırılır ve bu formda depolanarak enerji kaynağı olarak kullanılır (Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023; Tunçbilek, 2024; Alssalebin et al., 2025). Hidrojen yakıldığı zaman su haricinde kirlenici bir salınımı yoktur, bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir (Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023; Tunçbilek, 2024; Alssalebin et al., 2025). Hidrojen evrenin %75'ini oluşturmasına rağmen doğada saf olarak yer almamaktadır (Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023). Genel olarak oksijen ile birleşerek su yapısında ve farklı karbon, hidrokarbonlarla beraber bulunmaktadır. Saf hidrojenin elde edilebilmesi için üretilmesi gerekmektedir. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi doğrudan çıkartılması mümkün değildir. Hidrojen; kömür, petrol, doğalgaz ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi doğal enerji kaynağı değildir, bir enerji taşıyıcısıdır (Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023; Bilgiç Tüzemen, 2024).

### 3.1. Hidrojenin üretimi, Depolanması ve Taşınması

Hidrojen fosil yakıtlarda olduğu gibi birincil enerji kaynağı değildir, farklı hammaddelerden elde edilen sentetik bir yakıt türüdür (Ural ve Karaca 2016; Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023; Gordon et al., 2023; Bilgiç Tüzemen, 2024; Muthiah et al., 2024). Hidrojen fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin elektrolizde kullanımıyla sağlanmaktadır (Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023). Elde edilen enerji kaynağına göre hidrojen renklere ayrılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanılarak elde edilen hidrojeni “Yeşil Hidrojen”, fosil yakıtlardan CO<sub>2</sub> yakalayarak elde edilen hidrojen “Mavi Hidrojen”, piroliz yöntem ile fosil yakıtlardan CO<sub>2</sub> içermeyen üretilen hidrojen “Turkuaz Hidrojen”, nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojen “Pembe Hidrojen”, nükleer enerji kaynaklarından yüksek sıcaklık elektrolizi ile üretilen hidrojen “Mor Hidrojen”, gazın yeniden düzenlenmesi sonucu hidrojen üretilirse “Gri Hidrojen”, kömürden gazlaştırma yöntemi ile CO<sub>2</sub> çıkarma ile hidrojen üretilirse “Kahverengi Hidrojen” olarak tanımlanır (Hassan et al., 2023; Bilgiç Tüzemen, 2024). Hidrojen enerjisinin önündeki en büyük sorun hidrojen depolanmasıdır. Mobil ve sabit taşıma ile hidrojen depolanabilir. Mobil taşıma ile deponun hafif olması gerekir. Hidrojenin güvenli ve kullanılabilir bir şekilde depolanması gerekmektedir. Hidrojen sıvı ve gaz formunda depolanabilmektedir. Elde edilen hidrojen tankerler veya boru hatları ile taşınabilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu gelecek zamanlarda doğalgaz boru hatlarının altyapısı değiştirilerek taşınması tahmin edilmektedir (Kılıç ve Oral, 2023; Schiaroli Et al., 2025).

#### 3.1.1. Hidrojen Üretimi

Fosil yakıtların emisyon salınımı, fosil yakıtların azalması ve petrol krizleri nedeni ile insanlık farklı kaynak arayışına yönelmiştir. Rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle gibi yenilenebilir enerjiler çevremiz için sürdürülebilir ve temiz bir kaynak sağlayabilmektedir (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Qanbar et al., 2024; Daş ve Teke Öner, 2025; Alssalebin et al., 2025; Min et al., 2025). Hidrojen ikincil bir enerji kaynağı olması nedeni ile birincil enerji kaynakları kullanılarak üretimi yapılmaktadır. Fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) azalması ve çevreye olan etkileri nedeni ile yenilenebilir enerji kaynaklarının elde edilmesi daha anlamlı olmaktadır. Hidrojenin elde edilmesindeki zorluk hidrojenin doğal olan bileşimlerinden ayrılması esnasında birçok yöntemin uygulanmasıdır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Qanbar et al., 2024; Daş ve Teke Öner, 2025; Alssalebin et al., 2025).

##### 3.1.1.1. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Kömür, insanlık tarihinde önemli bir enerji kaynağı olmuştur, diğer fosil yakıtlara göre çıkarma-taşıma işlemleri daha ekonomiktir ve rezervi bol olan bir hammaddedir. Kömür gazlaştırma sürecinde öğütülerek toz haline getirilir ve su eklenerek çamur kıvamına dönüştürülür. Yüksek basınç ve ısı altında 900°C kadar ısıtılır. Oksijen ve su buharı kullanılarak gazlaştırıcı ünitelerinde CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> elde edilir (Kılıç ve Oral, 2023).

Doğalgaz, hidrojen üretiminde en yaygın, en ucuz ve en verimli yöntemdir ve yıllık hidrojen elde edilme payında en yüksek orana sahiptir. Doğalgazın buhar dönüşümünün ilk aşamasında doğalgaz yüksek sıcaklıkta (320-450°C) buhara maruz bırakılarak CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> üretilir (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Kytömaa et al., 2024). İkinci adımda CO buhara maruz bırakılarak CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> elde edilir. Bu dönüşümler sonucu elde edilen hidrojen miktarı %70-%90 arasında olmaktadır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Kytömaa et al., 2024).

### 3.1.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi

Hidrojen enerjisinin birçok enerji kaynaklarından elde edilebiliyor olması ve sürdürülebilir olması önemli bir faktördür. Yenilenebilir kaynaklar ile hem endüstride hem de ulaşım sektöründe hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından %5 oranında hidrojen üretimi yapılabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin önündeki zorluklar; yüksek üretim maliyeti, altyapı eksikliği, enerji kaybına uğrama (elektroliz esnasında %30-%35 arasında hidrojen kaybı), görünürlük eksikliği ve sürdürülebilir bir yapının bulunmaması yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023).

Elektroliz işlemi, doğru akım kullanılarak suyun hidrojen ve oksijen elementlerine ayrışması işlemidir (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Kytömaa et al., 2024). Elektroliz işleminin yapıldığı cihaza elektrolizör adı verilmektedir. Elektroliz yöntemi emisyonuz ve basit yapılan bir uygulamadır (Kılıç ve Oral, 2023; Kytömaa et al., 2024). Elektroliz yöntemi ile hidrojen elde etmek için rüzgâr enerjisinden, güneş enerjisinden, jeotermal enerjiden ve nükleer enerjiden yeşil hidrojen üretilmektedir (Kılıç ve Oral, 2023; Mutlubaş ve Özdemir 2023). Rüzgâr hızının elektrik enerjisi elde etmeye uygun olduğu alanlarda santraller kurularak hidrojen enerjisi elde edilmektedir. Ancak güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarında kesintiler olabilmektedir. Teknolojik gelişmeler ile hem elektroliz maliyetlerin hem de yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetlerinin azalması beklenmektedir (Kılıç ve Oral, 2023).

Fotoelektroliz işlemi, fotoelektrokimyasal (PEC) hücre ismi verilen ışık toplama sistemi ile temiz bir enerji kaynağı olan güneşten hidrojen elde etmektir (Kılıç ve Oral, 2023; Alsalebin et al., 2025). Termoliz yöntemi, 1500°C ve üzeri sıcaklıklara kadar çıkılarak suyun parçalanması sonucu hidrojen üretilmesidir. Sıcaklık arttıkça buhar moleküllerinin ayrışması artmaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Biyokütle ile hidrojen enerjisi üretimi, fosil yakıtlardan enerji elde edilmesine benzer bir süreç göstermektedir. Gazlaştırma işlemi yapılarak hidrojen enerjisi üretilir. Bu yöntem ile üretilen hidrojenin önünde bazı sorunlar; bakterideki davranışların belirsizliği, maliyetin yüksek olması ve üretimdeki yavaşlık yer almaktadır (Kılıç ve Oral, 2023). Nükleer enerji ile hidrojen üretimi, nükleer reaktörler kullanılarak termoliz ve elektroliz

yöntemiyle elde edilir (Ural ve Karaca 2016). Bu yöntem ile, hem fosil yakıtlar ve biyokütle hammaddelerinin hızlı bir şekilde tükenmesi hem de emisyon salınımların bulunması nedeni ile nükleer santrallerde üretilen hidrojen sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir (Kılıç ve Oral, 2023).

### 3.1.2. Hidrojenin Depolanması

Sanayileşmenin başlaması ile kırsal bölgeden kentsel alanlara göçler hızla büyüme olmuştur. İşgücüne olan talebin artması nüfus artışını tetiklemiştir; bu da enerji gereksinimindeki artışı beraberinde getirmiştir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları dünya nüfusu açısından stratejik bir çözüm sunmaktadır. Fosil yakıtlardan hidrojen üretilmesi kadar depolanması da hayati bir değer taşımaktadır. Hidrojenin düşük yoğunlukta olması nedeni ile depolanmasında bazı engeller çıkmaktadır (Kılıç ve Oral, 2023; Gordon et al., 2023; Magliano et al., 2024; Schiaroli Et al., 2025).

Günümüzde hidrojenin güvenilir bir şekilde depolanabilmesi ve maliyetinin düşük olması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sıvılaştırılmış hidrojen, sıkıştırılmış hidrojen, metal hidritler, karbon nanotüpler, hidrokarbonlar ve doğalgazın tükendiği mağaralarda depolama şeklinde oluşturulabilir. Sıkıştırılmış hidrojen depolama yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024; Calabrese et al., 2024). Hidrojen gazı 50 litrelik basınçlı tanklarda 200-250 bar'lık basınç altında depolanmaktadır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023). Atmosferik basınç altında hidrojen gazının 1 gramı 11 litre hacim kaplamaktadır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023). Yüksek basınç altında depolanması nedeni ile tanklar çok ağır olmaktadır bu nedenle hidrojenin çok ağır olmasını ve hidrojenin verimini olumsuz yönde etkilemektedir (Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023). Sıvılaştırılmış hidrojen yöntemi ile depolamada -253°C kadar atmosferik basınç altında soğutulması yöntemidir (Ural ve Karaca 2016; Koşar, 2021; Kılıç ve Oral, 2023; Calabrese et al., 2024). Soğutma yönteminde harcanan enerji miktarı hidrojenden elde edilecek enerji miktarının 1/4'ü kadardır. Bu nedenle sıvılaştırılmış hidrojenin verimi düşmekte ve maliyeti artmaktadır. Sıvılaştırılmış hidrojen küçük tanklarda depolandığı zaman günlük %3'ü, büyük tanklarda depolandığı zaman %0,06'sı buharlaşmaktadır. Tankın yalıtımına bağlı olarak buharlaşma önlenmektedir. Ayrıca hidrojenin sıvı halde depolanması gaz halde depolanmasına göre daha yüksek enerji yoğunluğu gerektirmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Hidrokarbonlar birim basınç ve hacimde saf halde bulunan sıvı hidrojenden daha fazla hidrojen kapsamaktadır. Bu nedenle, maliyetli dolun alanları ve depolama ihtiyacını ortadan kaldırmasına rağmen araç kullanımında hidrojen dönüştürücüye ihtiyaç duyulmaktadır (Ural ve Karaca 2016). Karbon nanotüpler ile depolamada basınç altında hidrojen grafit yüzeyinde depolanır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral 2023; Tunçbilek, 2024). Hidrojen gözenekli olan grafit üzerine depolanırken bazen oda sıcaklığı bazen de soğuk olması gerekmektedir. Grafitler ek ağırlık meydan

getirmesine rağmen aynı basınç ve tank boyutunda daha fazla hidrojen taşınmasına olanak sağlar (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral 2023). Metalhidritler ile depolamada hidrojen granüler metallerin arasındaki boşluklara depolanır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024). Isıtma yöntemi ile hidrojen açığa çıkar. Metal hidrürler ile depolama işlemi az miktarda yer kaplayan ve güvenilir bir yöntemdir ancak yüksek sıcaklık gerektiren, pahalı ve kütlece ağır olan bir yöntemdir (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023).

### **3.1.3. Hidrojenin Taşınması**

Hidrojen üretildiği bölgeden tüketim yapılacak alana deniz-kara-demiryolu ve botu hatları ile taşınmaktadır (Ural ve Karaca 2016; Kılıç ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024; Alssalebin et al., 2025). Hidrojenin yoğunluğunun düşük olması nedeni ile hidrojenin depolanmasında olduğu gibi taşınmasında da maliyet sorunları oluşturmaktadır (Kılıç ve Oral, 2023; Gordon et al., 2023; Tunçbilek, 2024). Hidrojen, kısa mesafeleri için yüksek basınçlı silindirler ile taşınabilir (Ural ve Karaca 2016). Hidrojenin boru hatları ile taşınması uzak ve orta mesafeler için uygundur ancak yüksek hacimli hidrojen taşınması uygulanmaktadır. Boru hatlarında yüksek basınç altında hidrojenin taşınması boru hatlarının gevrekleşmesine (kırılmasına) neden olduğundan dolayı önlem alınmaması durumunda yüksek maliyet gerekmektedir. Doğalgaz boru hatları ile karşılaştırma yapıldığında aynı enerjiyi ulaştırmak için daha büyük çapta boru hattına ihtiyaç duyulmaktadır (Kılıç ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024; Calabrese et al., 2024). Ayrıca hidrojen çelik boru hatlarını çatlatması nedeni ile farklı alternatifler düşünülmektedir. Küresel çapta doğalgaza maksimum %20 oranında hidrojen enjekte etme çalışmaları yürütülmektedir. Bu sayede karbon salınım oranı daha az olacaktır. Deniz yolu ile yük taşımacılığı, uzun mesafeler ve ağırlık açısından ağır yük kamyonlarından %90, demiryollarından %30 oranında daha az enerji harcaması nedeni ile verimli bir yöntemdir. Sıvılaştırılmış hidrojen yöntemi ile uzak mesafelere taşınmasında izolasyonunun çok iyi yapılması gerekmektedir (Kılıç ve Oral, 2023). Hidrojenin deniz yolu ile taşınmasında hidrojeni amonyak gibi bir moleküle çevirmekten geçmektedir ancak amonyak zehirli bir kimyasal olması nedeni ile güvenlik sorununa neden olabilmektedir (Kılıç ve Oral, 2023; Tunçbilek, 2024).

### **3.1.4. Hidrojen Enerjisi Üretimi, Depolanması ve Taşınmasında Yaşanan Zorluklar**

Hidrojen, son derecede yanıcı, kolay tutuşabilen, toksik olmayan ve havadan çok hafif olan bir ametaldir (Gordon et al., 2023; Calabrese et al., 2024; Qanbar et al., 2024; Teke ve Öner, 2025). Bu nedenle salınım gösterdiğinde hızla havaya dağılır. Ancak temel güvenlik endişesi sızıntının fark edilememesi durumunda hidrojen gazının kapalı bir ortamda bir kıvılcım ile temas ettiğinde patlamaya sebebiyet vermesidir. Bu yüzden hidrojen gazının güvenli kullanımında risklerin minimize edilebilmesi için prosedürlere

ve özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda çalışacak personelin gerekli donanımına sahip olmaları güvenlik açısından önemlidir. Hidrojen havada %4-%75 oranında geniş bir yanıcılığa sahip olması nedeni ile benzinin ateşlenmesi için gereken enerjinin 1/10'u kadar düşük bir ateşleme ile alevlenmesi bu ortamdaki güvenlik önlemlerinin önemini belirtmektedir (Muthiah et al., 2024; Kytömaa et al., 2024; Calabrese et al., 2024; Qanbar et al., 2024; Teke ve Öner, 2025). Hidrojenin uzun mesafelere güvenli bir şekilde taşınmasında; hidrojenin düşük enerji yoğunluğunun olması, konteynerlere ve boru hatlarına gereksinim duyulması alternatif güvenlik önlemleri alınmasını gerektirmektedir. Hidrojenin metaller ile temasında gevrekleştirme özelliğine sahip olması altyapı bütünlüğünde ve ekipmanlarda sorunlara neden olabilmektedir. Bu olumsuzluklara yönelik tedbir alınmasında hidrojen ünitesinde çalışan personelin ve halkın ilgili konuya ilişkin eğitimlerin verilmesi önemlidir (Campari et al., 2023; Muthiah et al., 2024; Kytömaa et al., 2024; Calabrese et al., 2024; Teke ve Öner, 2025; Alssalebin et al., 2025; Yang et al., 2025).

Hidrojen çeşitli yöntemlerle elde edilebilen ve birçok farklı kullanım alanına sahip olan bir elementtir; ancak kabul görebilmesi için üretildiği maliyetten daha ucuza elde edilmesi gerekmektedir (Muthiah et al., 2024; Calabrese et al., 2024; Teke ve Öner, 2025).

Nükleer enerjinin kullanımı, radyoaktif atık yönetimi ve güvenlik için zorluklar oluşturmaktadır. Bu kapsamda uzun sürede atık depolama ve kamu güvenliği açısından risk oluşturmaktadır (Teke ve Öner, 2025).

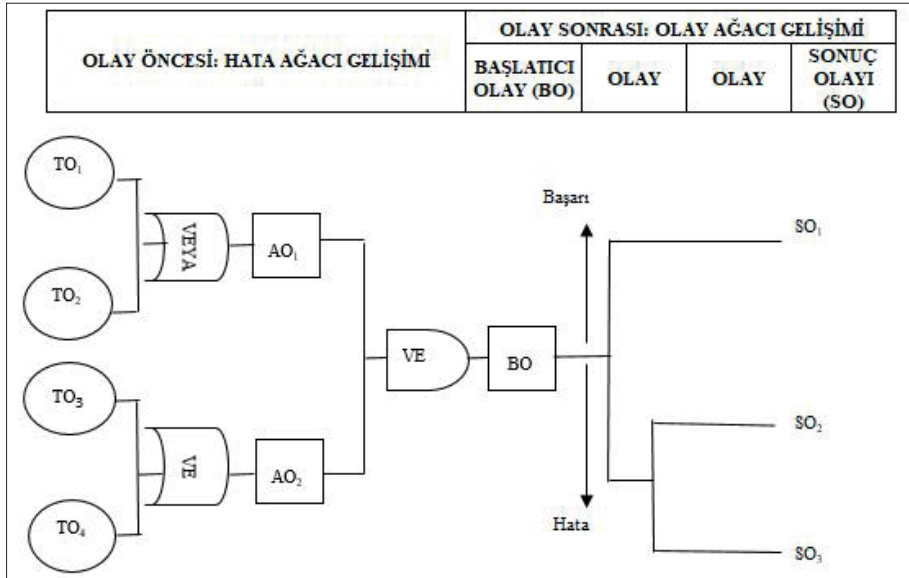
Yeşil hidrojen projelerinde, su tüketimi tatlı suya erişimde çevresel sürdürülebilirlik açısından soru işareti oluşturmaktadır. Su yetersizliğinden mustarip olan bölgelerde elektroliz için gerekli olan su önemli olabilir (Teke ve Öner, 2025).

Hidrojenin üretiminde, depolanmasında ve taşınmasında uluslararası düzenleme ve standartların olmaması yeşil hidrojen projelerinin gelişmesini etkileyen bir sorundur (Gordon et al., 2023; Beasy et al., 2023; Muthiah et al., 2024; Calabrese et al., 2024; Teke ve Öner, 2025; Alssalebin et al., 2025).

#### **4. POPYON (BOW TIE) RİSK ANALİZİ**

Popyon (Bow tie) risk analizi, risklerin kaynaklarını ve olası sonuçlarını sistematik bir şekilde ele alarak; proses güvenliği, risk değerlendirmesi ve yönetimin değerlendirmesinde sıklıkla tercih edilen görsel bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, olay senaryoları ile nedenler/tehditler arasında mantıksal bir bağ kurar. Ayrıca başlatıcı/tepe olay ile olay senaryolarının sonuçları arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, bu süreçte uygulanabilecek kontrol etme, önleme, hafifletme güvenlik önlemlerini tanımlar (Sarebanzadeh et al., 2024).

Papyon analizi, hata ağacı analizi ve olay ağacı analizi yöntemlerinin birleşimi olup, sistemler arası etkileşimin yoğun bulunduğu durumlarda kullanılır (Çabuk ve ark., 2020). İstenmeyen bir olayın kök nedenlerini ve olay gerçekleşikten sonra meydana gelen sonuçlarını görsel olarak sunar (Ferdous et al., 2013; Culwick et al., 2016; Çabuk ve ark., 2020; Browna et al., 2021). Papyon analiz yöntemi, ağırlıklı olarak nitel verilere dayanmakta, nicel verilerle de desteklenmektedir. Papyon analizinin şematik olarak gösterilmesinde güvenlik önlemlerinin ve azaltıcı/iyileştirici önlemlerin tanımlanması önemlidir (Çabuk ve ark., 2020). Papyon analizinin sol tarafında hata ağacı yer alır ve analiz, başlatıcı (kritik) olay ile başlar. Bu süreçte ara ve temel nedenler mantık kapıları (VE/VEYA bağlaçları) vasıtasıyla bağlanarak temel olaylara ulaşılan kadar kök nedene inilir. Diyagramın merkezine başlatıcı olay yerleştirilir. Papyon analizinin sağ tarafında ise olay ağacı diyagramı yerleştirilir ve bu kısım başlatıcı olayın arkasından gelen sonuç senaryolarını içerir (Ferdous et al., 2013; Culwick et al., 2016; Nunen et al., 2018; Xu nad Xu, 2018; Zhang and Guan, 2018; Muthiah et al., 2024). Bir olayın nedenleri/tehditler solunda, sonuçları sağında gösterilmiş olur. Nedenler (sızıntı, korozyon, aşırı basınç), kazanın meydana gelmesini sebep olan olaylardır; sonuçlar (yanma, patlama, tutuşmamış hidrojen salınımı), kaza sonucunda oluşan kayıplardır (can, mal kaybı, yaralanma). Kazaları önlemek için güvenlik önlemleri oluşturulmalıdır. Önleyici güvenlik önlemleri hata ağacı tarafına yerleştirilir ve başlatıcı olaydan önce gelir. Hafifletici güvenlik önlemleri olay ağacı tarafına yerleştirilir ve başlatıcı olaydan sonra gelir. Böylece, bir araya getirilmiş hata ağacı ve olay ağacı diyagramına dayanarak başlatıcı olay ile ilgili tüm neden ve sonuçlar papyon diyagramında gösterilir (Ferdous et al., 2013; Culwick et al., 2016; Nunen et al., 2018; Xu nad Xu, 2018; Muthiah et al., 2024).



**Şekil 1.** Bow-tie diyagramının elemtleri (TO-Temel Olay; AO-Ara Olay; BO-Başlatıcı Olay; SO-Sonuç Olayı) (Ferdous vd., 2013)

Bow-tie (papyon) analizinin temel bileşenleri; tehlikeler, güvenlik önlemleri, eskalasyon kontrolleri, başlatıcı olay, etki azaltma kontrolleri, kontrollerin etkinliği ve sonuç olarak sıralanmaktadır (Culwick et al., 2016).

**Tehlikeler:** Tehlike, zarara ve kayba neden olabilecek olan bir etkidir. Bir tehlikenin meydana getirebileceği zarar, etkisinin büyüklüğüne göre hafif, orta veya şiddetli olarak derecelendirilebilir (Culwick et al., 2016).

**Güvenlik önlemleri:** Bireyin bir tehlikeye maruz kalmasını engellemek amacıyla alınan koruyucu tedbirlerdir. Güvenlik önlemlerinin amacı, bireyin tehlikeye maruz kalmasını önlemektir (Culwick et al., 2016).

**Eskalasyon Kontrolleri:** Güvenlik önlemleri tek başına yeterli değildir, çünkü sistemin belirsizlikleri ve insan kaynaklı hatalar nedeniyle ihlaller olabilir. Bu nedenle tamamlayıcı önlemlerle desteklenmelidir (Culwick et al., 2016).

**Başlatıcı Olay (Tepe Olay):** Önlem almaya çalışılmayan istenmeyen olaydır. Genellikle güvenlik önlemleri ve eskalasyon kontrollerindeki bir veya daha fazla ihlalin sonucunda ortaya çıkar. Her durumda başlatıcı olaylar bir tehlikenin etkili bir şekilde yönetilememesi sonucu gelişir (Culwick et al., 2016).

**Etki Azaltma Kontrolleri:** Üst olayın ciddiyetini ve sonuçların şiddetini azaltmaya yönelik geliştirilen kontrol mekanizmalarıdır (Culwick et al., 2016).

**Kontrollerin Etkinliği:** Kontrollerin etkinliği sistem faktörleri, insan faktörleri ve şans faktörlerinden etkilenebilir (Culwick et al., 2016).

**Sonuç:** Sonuçlar tehlikenin ciddiyetine, şans faktörlerine ve kontrollerin etkinliğine bağlı olarak hiç zarar olmamasından, kalıcı veya geçici zarara, hatta ölümü içerebilen ağır düzeyde zarara neden olabilir (Culwick et al., 2016).

Tablo 1’de Papyon (bow tie) analizi ile hidrojen kullanımında tehlikeleri önleme ve sonuçları azaltma senaryosu geliştirilmiştir. Hidrojen endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler başlatıcı olayı/tepe olayı çerçevesinde hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, hidrojen sızıntısı, hidrojen gevrekleşmesi, hidrojen ile oksijenin karışması, hidrojenin üretim, depolama ve dağıtım süreçlerinde karşılaşılan maliyete ilişkin teknik ve ekonomik sınırlılıklar, nükleer kaynaklı hidrojen üretiminde ortaya çıkan radyoaktif atıkların bertarafına yönelik güvenlik sorunları ve yeşil hidrojen üretiminde su kaynaklarının kullanımına ilişkin çevresel sürdürülebilirlik riskleri potansiyel tehlike kaynakları olarak tanımlanmıştır. Söz konusu tehlikelere ilişkin altta yatan nedenler ve bu nedenlerin yol açabileceği sonuçlar analiz edilmiş; elde edilen bulgular doğrultusunda önerilen güvenlik önlemleri ve azaltıcı/iyileştirici önlemler tablo formatında yapılandırılmıştır.

**Tablo 1. Papyon Analizi ile Hidrojen Kullanımında Tehlikeleri Önleme ve Sonuçları Azaltma**

TEHLİKE	NEDENLER/ TEHDİTLER	GÜVENLİK ÖNLEMLERİ (BARIYERLERİ)	TEPE OLAY/ BAŞLATICI OLAY	SONUÇLAR	AZALTICI/İYİLEŞTİRİCİ ÖNLEMLER (BARIYERLER)
<b>Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özelliği</b>	-Geniş yanma aralığı ve düşük tutuşma enerjisi -Dış korozyon (kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar)la -İç korozyon (kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar)la -Aşırı basıncın olması -Erozyon (fiziksel kuvvetle) -Operatör hatası	-Uygun malzeme seçimi -Aşırı basınç oluşumunu engellemek için uygun sistem tasarımı -Düzenli bakım ve muayenelerin yapılması -Yeterli havalandırma sistemi -Tehlikeli alan sınıflandırması -Prosedür/standartlara uygunluk ve çalışma izni	Hidrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler	-Tutuşmamış hidrojen dağılımı -let yangını -Patlama -Patlama sonucu yaralanma ve ölüm	-Uygun malzeme seçimi -Aşırı basınç oluşumunu engellemek için uygun sistem tasarımı -Düzenli bakım ve muayenelerin yapılması -Yeterli havalandırma sistemi -Tehlikeli alan sınıflandırması -Prosedür/standartlara uygunluk ve çalışma izni
<b>Hidrojen sızıntısı</b>	-Kapalı ortam -Ekipman arızası (borular, vanalar, flanşlar) -Operatör hatası (bakım hataları, yanlış işlem) -Olumsuz hava şartları	-Yeterli havalandırma sistemlerinin bulunması -Düzenli bakım ve muayeneli yapılması -Hidrojen dedektörleri ve alarm sistemlerinin mevcudiyeti -Acil Müdahale Planı -Ateşleme kaynaklarının kontrolü	Hidrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler	-Yanıcı/patlayıcı ortam -Hidrojenin %4-%75 konsantrasyon aralığına ulaşması sonucu patlama -Tesis altyapısında ve ekipmanda meydana gelen hasar -Yanma ve patlama sonucu personel yaralanması ve ölümü	-Yeterli havalandırma sistemlerinin bulunması -Düzenli bakım ve muayeneli yapılması -Hidrojen dedektörleri ve alarm sistemlerinin mevcudiyeti -Acil Müdahale Planı -Acil kapatma sistemleri -Ateşleme kaynaklarının kontrolü

<p><b>Hidrojen gevrekleşmesi</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Malzemenin türü</li> <li>-Çevresel Faktörler</li> <li>-Sıcaklık</li> <li>-Hidrojen gazının aşırı basınçta olması</li> <li>-Sistem arızası</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gevrekleşmeye dayanıklı paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımları tercih edilmeli</li> <li>-Hidrojenin uygun bekleme süresi</li> <li>-Malzeme yüzeyleri nitel gibi uygun kaplama yapılması</li> <li>-Uygun bakım ve muayeneler</li> <li>-Periyodik denetimler zorunlu olmalı</li> <li>-Yeterli havalandırma</li> <li>-Personel eğitimleri verilmeli</li> <li>-Acil kapatma prosedürleri ve acil tahliye planları bulunmalı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Malzemenin aniden çatlaması veya kırılması</li> <li>-Sızıntı riski neticesinde yangın ve patlama</li> <li>-Ölüm ve yaralanma</li> <li>-Bakım maliyetindeki artış sonucu ekonomik kayıp</li> </ul>	<p>Hidrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yeterli havalandırma sistemlerinin bulunması</li> <li>-Düzenli bakım ve muayenin yapılması</li> <li>-Hidrojen dedektörleri ve alarm sistemlerinin mevcudiyeti</li> <li>-Acil Müdahale Planı</li> <li>-Acil kapatma sistemleri</li> <li>-Ateşleme kaynaklarının kontrolü</li> <li>-Uygun malzeme seçimi</li> <li>-Personel eğitimleri verilmeli</li> </ul>
<p><b>Hidrojen ile oksijenin karışması</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Malzemenin cinsi</li> <li>-Ateşleme kaynağı ile temas (Isı, statik elektrik, kıvılcım)</li> <li>-Ekipman arızası</li> <li>-Operatör hatası (insan kaynaklı hatalar)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yeterli havalandırma sistemlerinin bulunması</li> <li>-Düzenli bakım ve muayenin yapılması</li> <li>-Hidrojen dedektörleri ve alarm sistemlerinin mevcudiyeti</li> <li>-Acil Müdahale Planı</li> <li>-Acil kapatma sistemleri</li> <li>-Ateşleme kaynaklarının kontrolü</li> <li>-Personel eğitimleri verilmeli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yangın</li> <li>-Patlama</li> <li>-Patlama sonucu yaralanma ve ölüm</li> <li>-Çevresel Hasar</li> <li>-Prestij ve ekonomik kayıp</li> <li>-Tank, vana, boru gibi ekipmanların gevrekleşmesi (kırılganlığı)</li> </ul>	<p>Hidrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yeterli havalandırma sistemlerinin bulunması</li> <li>-Düzenli bakım ve muayenin yapılması</li> <li>-Hidrojen dedektörleri ve alarm sistemlerinin mevcudiyeti</li> <li>-Acil Müdahale Planı</li> <li>-Acil kapatma sistemleri</li> <li>-Ateşleme kaynaklarının kontrolü</li> <li>-Uygun malzeme seçimi</li> <li>-Personel eğitimleri verilmeli</li> </ul>
<p><b>Hidrojenin üretim, depolama ve dağıtım süreçlerinde karşılaşılan maliyete ilişkin teknik ve ekonomik sınırlılıklar</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Enerji yoğunluğu (hidrojen üretimi için gereken enerji miktarının yüksek olması)</li> <li>-Verimlilik kaybı (toplam enerji kaybının oluşması)</li> <li>-Yeşil enerji kaynaklarının sınırlı ve pahalı olması</li> <li>-Yeterli talebin olmaması</li> <li>-Ekipmanların yeni ve yetersiz olması</li> <li>-Altyapı yetersizliği</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Altyapı yetersizliği</li> <li>-Yüksek maliyetler</li> <li>-Karbon ayak izi</li> <li>-Hidrojen gevrekleşmesi, yangın, patlama, Prestij kaybı, çevresel hasar, yaralanma ve ölüm</li> <li>-Enerji dönüşümünde yaşanan zorluklar</li> <li>-Talep azlığı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ARGE yatırımlarının yapılması</li> <li>-Devlet teşvikleri ile desteklenmesi</li> <li>-Uluslararası düzeyde iş birliklerinin düzenlenmesi</li> </ul>	<p>Hidrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ARGE yatırımlarının yapılması</li> <li>-Devlet teşvikleri ile desteklenmesi</li> <li>-Uluslararası düzeyde iş birliklerinin düzenlenmesi</li> </ul>

<p><b>Nükleer kaynaklı hidrojen üretiminde ortaya çıkan radyoaktif atıkların bertarafına yönelik güvenlik sorunları</b></p>	<p>-Malzeme gevrekleşmesi -Delinme, çatlakların oluşması -Personel eğitimindeki yetersizlik -Kalibrasyon eksikliği -Dokümantasyon hataları -Atıkların sınıflandırmasındaki hatalar -Depolama alanlarındaki yetersizlik -Uygunsuz korumalı taşıma kapları -Denetim eksikliği</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>
<p><b>Yeşil hidrojen üretiminde su kaynaklarının kullanılmasına ilişkin çevresel sürdürülebilirlik riskleri</b></p>	<p>-Hidrojen üretimi için fazlaca suya ihtiyaç duyulması -Ekosistem dengesinde bozulma -Su yönetimi ile ilgili yasal açıklıklar -Denetim eksikliği -Şeffaf olmayan su kullanımını artırma yan ürünü olarak kimyasal kirlilik oluşumu -Kurak alanlarda kurulan tesisler</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>
<p><b>Hydrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</b></p>	<p>-Radyoaktif maddenin çevreye sızması (toprak, su, hava) -Genetik Bozukluklar -Radyasyon maruziyeti -Hidrojen ve nükleer enerjiye güvenisizlik -Yatırım kayıplarının oluşması -Mülk (toprak, konut) değerinin düşmesi -Gelecek kuşaklara miras yükü oluşturma</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>
<p><b>Hydrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</b></p>	<p>-Su kıtlığı -Ekosistemin zarar görmesi -Yeşil Hidrojen algısının zarar görmesi -Kuraklık</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>
<p><b>Hydrojen Endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler</b></p>	<p>-Su ayak izi hesaplaması yapılmaması -Deniz suyu/endüstriyel atık suyun kullanılmaması -Kurak alanlarda hidrojen tesisi kurulması engellenmeli -Otomatik izleme sistemlerinin ve denetimlerin yapılması -Su yönetimi ile ilgili mevzuatlara uyum sağlanması -Acil Eylem Planlarının hazırlanması</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>	<p>-Uygun kayıt sistemi ve dijital izleme -Kalıcı ve geçici depolama alanlarının uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması -Yüksek basınç ve sıcaklık altında depolama kaplarının çok katmanlı ve dayanıklı seçilmesi -Radyoaktif atıkların taşınmasında güvenli güzergâh olması ve özel lisanslı vasıtalar ile taşınması -Uluslararası Atom Enerji Ajansı tavsiyeleri doğrultusunda taşınması -Çalışan personelin Radyasyon güvenliği, atık yönetimi ve acil durum prosedürleri konusunda eğitilmesi -Acil durum Tatbikatlarının ve Acil Durum Planlarının hazır ve güncel olması -Toplumun bilinçlendirilmesi</p>

## SONUÇ

Hidrojenin çevre dostu oluşu, alternatif yakıtlar arasında önemli bir üstünlük sağlasa da; hidrojenin fiziksel ve kimyasal özelliği, geniş bir yanma aralığına sahip olması, hızlı patlama özelliği ve düşük tutuşma enerjisine sahip olması ciddi düzeyde güvenlik sorunu meydana getirebilmektedir. Bu çalışmada, hidrojen kullanımına bağlı meydana gelebilecek riskler papyon (bow tie) analizi yöntemi ile görsel olarak sunulmuş, oluşturulan senaryo çerçevesinde değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, hidrojen endüstrisindeki gelişmelerde karşılaşılan güçlükler başlangıç olayının hem nedenleri hem de olası sonuçları olarak tanımlanmış ve her iki tarafta güvenlik önlemleri ve azaltıcı/iyileştirici önlemler belirtilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Ahad, M.T., Bhuiyan, M. M. H., Sakib, A. N., Becerril Corral, A., Siddique, Z. (2023). An overview of challenges for the future of hydrogen. *Materials*, 16, 1-28.
- Allsalebin, E., Holborn, P. and Pilidis, P. (2025). Assesment of hydrogen storage and pipelines for hydrogen farm. *Energies*, 18, 1-31.
- Başol, F. (2021). Yenilenebilir enerji kaynaklarının avantaj, risk ve tehlikeleri. İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Tezi, Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- Beasy, K., Emery, S., Pryor, K. and Vo, T. A. (2023). Skilling the green hydrogen economy: A case study from australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 19811-19820.
- Bilgiç Tüzemen, G. (2024). Türkiye hidrojen enerjisi stratejilerinin ve geliştirilen politikaların araştırılması, *Düzce Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2(1), 70-79.
- Browna, K. R., VanBerkel, P., Khanc, F. I. and Amyottea, P. R. (2021). Application of bow tie analysis and inherently safer design to the novel coronavirus hazard. *Process Safety and Environmental Protection*, 152, 701-718.
- Calabrese, M., Portarapillo, M., Nardo, A. D., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G. and Benedetto, A. D. (2024). Hydrogen safety challenges: utilization and CFD-based consequence and risk assessment. *Energies*, 17, 1-26.
- Campari, A., Ustolin, F., Alvaro, A. and Paltrinieri, N. (2023). A review on hydrogen embrittlement and riskbased inspection of hydrogen Technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 35316-35346.
- Culwick, M. D., Merry, A. F., Clarke, D. M., Taraporewalla, K. J. and Gibbs, N. M. (2016). Bow-tie diagrams for risk management in anaesthesia. *Anaesth Intensive Care*, 44(6), 712-718.

- Çabuk, A., Atalay, H., Erdem, E. ve Aksöz Ş. (2020). Papyon modeli risk değerlendirme metodu kullanılarak proaktif ve reaktif önlemlerin belirlenmesi, depo örneği. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 4(1), 83-91.
- Daş, E. ve Teke Öner, E. (2025). Hidrojen: sürdürülebilir enerji için çok yönlü çözüm. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 536-550
- Ferdous, R., Khana, F., Sadiqb, R., Amyottec, P. ve Veitcha, B. (2013). Analyzing system safety and risks under uncertainty using a bow-tie diagram: An innovative approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 91, 1-18.
- Gordon, J. A., Balta Ozkan and N., Nabavi, S. A. (2023). Socio-technical barriers to domestic hydrogen futures: repurposing pipelines, policies and public perceptions. *Applied Energy*, 336, 1-31.
- Hassan, Q., Azzawi, I. D. J., Sameen, A.Z., Salman, H. M. (2023). Hydrogen fuel cell vehicles: opportunities and challenges. *Sustainability*, 15, 1-26.
- Kılıç, F. ve Oral, M. (2023). Alternatif bir kaynak olarak Türkiye’de hidrojen enerjisi. Ankara: İksadyayınevi.
- Koşar, C. (2021). Hydrogen storage methods. *Open Journal of Nano*, 6(1), 1-10.
- Kytömaa, H., Wechsung, A., Dimitrakopoulos, G., Cook, N., Jaimes, D., Hur, I. Y. and Faraji, S. (2024). Applications in energy and combustion science. *Applications In Energy and Science*, 18, 1-9.
- Magliano, A., Perez Carrera, C., Pappalardo, C. M., Guida, D., Berardi, V. P. A. (2024). Comprehensive literature review on hydrogen tanks: storage, safety, and structural integrity. *Appl. Sci.*, 14, 9348.
- Min, M., Yoon, C., Yoo, N., Kim, J., Yoon, Y., Jung, S. (2025). Hydrogen risk assessment studies: a review toward environmental sustainability. *Energies*, 18(229), 1-27.
- Muthiah, M., Elnashar, M., Afzal, W. and Tan, H. (2024). Safety assessment of hydrogen production using alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 84, 803-821.
- Mutlubaş, H. ve Özdemir Z. Ö. (2023). Hidrojenin kullanım alanları ve hidrojen ekonomisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi*, 8(1), 20-31.
- Nunen, K. V., Swuste, P., Reniers, G. and Paltrinieri, N., Aneziris, O. and Ponnet, K. (2018). Improving pallet mover safety in the manufacturing industry: a bow-tie analysis of accident scenarios. *Materials*, 11, 1-18.
- Qanbar, M. W. And Hong, Z. A. (2024). Review of Hydrogen Leak Detection Regulations and Technologies. *Energies*, 17, 1-25.

- Sarebanzadeh, K., Hasheminejad, N., Alimohammadlou, M. and Es'haghi, M. (2024). Using fuzzy cognitive map in bow tie method for dynamic risk assessment of spherical storage tanks: A case study. *Helion*, 10, 1-15.
- Schiaroli, A., Claussner, L., Campari, A., Cirrone, D., Linseisen, B., Ritter, E. L. T., Kuznetsov, M. and Ustolin, F. (2025). A comprehensive review on liquid hydrogen transfer operation considerations for mobile applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 107, 164-182.
- Tunçbilek, Ö. F. (2024). Hidrojen enerjisi ve çevresel etkileri üzerine değerlendirmeler. *Ankara Üniversitesi Dergisi*. 15(2), 189-197.
- Ural, T. ve Karaca, G. (2016). Hidrojen ekonomisi. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3(2), 145-154.
- Xu, O. and Xu, K. (2018). Mine safety assessment using gray relational analysis and bow tie model. *Plos One*, 1-14.
- Yang, R., Schell, G. A., Rayasam, D., Groth, K. M. (2025). Hydrogen impact on transmission pipeline risk: Probabilistic analysis of failure causes. *Reliability Engineering and system safety*, 257, 1-13.
- Zhang, Y. and Guan, X. (2018). Selecting Project Risk Preventive and Protective Strategies Based on Bow-Tie Analysis. *J. Manage. Eng.*, 34(3), 1-13.

# HYRAM: HİDROJEN RİSK DEĞERLENDİRME MODELİ

**Nafiseh FARAJİRAD**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Orcid ID: 0000-0002-1137-0600

## GİRİŞ

Hidrojen, yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayan, yüksek enerji yoğunluğuna ve temiz bir yanma özelliğine sahip bir yakıt kaynağıdır. Ancak hidrojenin düşük tutuşma enerjisi, geniş patlama sınırları ve hızlı difüzyon kabiliyeti, güvenlik açısından dikkatli bir şekilde ele alınmasını zorunlu kılar. Bu bağlamda, Hidrojen Risk Değerlendirme Modeli (Hyram), hidrojenle çalışan sistemlerin güvenliğini artırmak için kullanılan bir araç olarak geliştirilmiştir.

Hyram, risk değerlendirme sürecini sistematik hale getirerek hidrojen tesislerinde karşılaşılabilecek tehlikeleri ve bu tehlikelerin potansiyel etkilerini analiz eder. Model, hem nicel hem de nitel verilerden yararlanarak olayların meydana gelme olasılığı ve sonuçları üzerine kapsamlı bir değerlendirme sunar. Bununla birlikte, Hyram, insan, ekipman ve çevresel faktörler dahil olmak üzere birçok parametreyi hesaba katar. Böylece karar alıcıların, özellikle güvenlik standartlarının belirlenmesinde, daha bilinçli ve kanıta dayalı adımlar atmalarına olanak sağlar.

Bu modelin başarısında, risk yönetimi süreçlerinin kolaylaştırılması ve hidrojen sistemlerinin tasarım aşamasından operasyonel süreçlere kadar çeşitli alanlarda uygulanabilirliği önemli bir rol oynar. Hyram'ın kullanımı, yalnızca mevcut tehlikelerin önlenmesine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda enerji sektöründe hidrojenin yaygınlaşmasının önündeki güvenlik endişelerini gidermeye de katkı sağlar.

HyRAM, en son teknolojiye sahip, doğrulanmış bilim ve mühendislik modellerinin ve hidrojen güvenliğiyle ilgili verilerin entegrasyonu için bir platform sağlamak üzere geliştirilen kapsamlı bir metodoloji ve beraberindeki yazılım araç setidir.

HyRAM yazılım araç seti, hidrojen yakıt ikmali ve depolama altyapısının güvenliğinin değerlendirilmesiyle ilgili niceliksel risk değerlendirmesi (QRA) ve sonuç analizinin yürütülmesi için standart bir metodoloji oluşturur. HyRAM araç seti, kaza senaryolarının riskini ölçmek, fiziksel etkileri tahmin etmek ve hidrojen tehlikelerinin etkisini (jet yangınlarından kaynaklanan termal etkiler, muhafazalardaki patlamalardan ve patlamalardan kaynaklanan termal ve basınç etkileri) karakterize etmek için hızlı çalışan deterministik ve olasılıksal modelleri entegre eder. HyRAM'daki QRA yaklaşımı, kodlar ve standartlar geliştirme, kod uyumluluğu, güvenlik esaslı geliştirme ve tesis güvenlik planlaması dahil olmak üzere birden fazla analiz türü için kullanılabilir. HyRAM, belirli bir sistemin riskini ve/veya sonuçlarını değerlendirmek için olasılıksal ve deterministik modellerin bir kombinasyonunu kullanır. HyRAM, çeşitli hidrojen tehlikesi senaryolarının olasılığını değerlendirmek için belgelenmiş bir QRA metodolojisi, olasılık modelleri ve veriler sağlamaktadır. HyRAM, hem ateşlenmemiş hem de ateşlenmiş gaz halindeki hidrojen salınımlarının davranışını karakterize etmek için kullanılan çeşitli hızlı çalışan, deterministik, fiziksel etki modellerini de içerir. Bu fiziksel etki modellerinden elde edilen bilgiler (örneğin, alevden kaynaklanan ısı akışı, gecikmeli ateşlemeden kaynaklanan aşırı basınç), sonuçları ölüm sayısı cinsinden hesaplayan probit fonksiyonlarına aktarılır. HyRAM araç seti iki kullanıcı modu içerir: fizik modelleri ve probit işlevlerinden oluşan sonuç modelleriyle birlikte belgelenmiş bir QRA yaklaşımı sağlayan "QRA modu" ve sürümler için hidrojen davranış modellerinin bağımsız olarak uygulanmasına olanak tanıyan "fizik modu". HyRAM araç seti, hidrojen salınımlarıyla ilişkili iki ana tehlikeyi modellemek üzere tasarlanmıştır: alevlerden kaynaklanan termal radyasyona maruz kalma ve patlamalardan kaynaklanan aşırı basınca maruz kalma.

HyRAM+'daki niceliksel risk değerlendirmesi (QRA) modu aşağıdaki risk ölçümlerini hesaplamak için kullanılır:

- Ölümcül Kaza Oranı (FAR), maruz kalınan 100 milyon saatte beklenen ölüm sayısı
- Ortalama Bireysel Risk (AIR), maruz kalan kişi başına yıllık beklenen ölüm sayısı
- Potansiyel Can Kaybı (PLL), sistem yılı başına beklenen ölüm sayısı
- Sistem yılı başına beklenen salınım sayısı (ateşlenmemiş ve ateşlenmiş vakalar)
- Sistem yılı başına beklenen jet yangını sayısı (ani ateşleme durumları)
- Sistem yılı başına beklenen aşırı basınç sayısı (gecikmeli ateşleme durumları)

HyRAM+'ın fizik modu, aşağıdakilerle ilişkili birden fazla fiziksel etkiyi hesaplamak için kullanılır:

- Tutuşmayan duman için konsantrasyon
- Jet alev sıcaklığı ve yörüngesi
- Jet alevi ışınımlı ısı akışı
- Konsantrasyon, yanıcı kütle ve birikme ve aşırı basınçtan kaynaklanan zaman geçmişleri
- Bir jetin/duman bulutunun gecikmeli ateşlenmesinden kaynaklanan aşırı basınç.

## 1. HYRAM İLE MODELLENEN BİR SENARYO ÖRNEĞİ -HYDROJEN İMALAT DEPOLAMA TANKI

### Senaryo Bilgileri:

Hidrojen depolama tankının hidrojen-gazı ile dolum testi, şirketin tesisinde Şekil 1'de kırmızı ile işaretlenmiş olan konumda açık havada gerçekleştirilecektir.

Genel risk konturları veya belirli bir konumdaki risk (bir bina veya arsa gibi) satırı) açıkça hesaplanmamıştır. Tesisin tamamına yönelik risk, belirtilen sakinlerin her biri için ölüm riskinin toplamıdır. Bu aşamada değerlendirme için hidrojen depolama tankına olan mesafe ve yakınlıklarına göre 3 farklı alan: test alan yeri, boyahane 1 ve boyahane 2 seçildi. Çalışanların pozisyonları ve kişi sayısı tanımlanmıştır.

Kullanıcı konumlarının tamamı sızıntı noktasına göre tanımlanmıştır; yani sızıntı "başlangıçta" (0, 0, 0) meydana gelir ve pozitif- $x$  yönde olduğundan, yolcu konumları ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bu referans noktasına dayanmaktadır.  $x$  ve  $z$  koordinatları yere yatay,  $y$  koordinatları ise yerden yüksekliktir.

Bir sızıntının güvenli bir şekilde tespit edildiği ve izole edildiği senaryoda, tüm bina sakinlerinde ölümle sonuçlanmayacağı varsayılmaktadır.

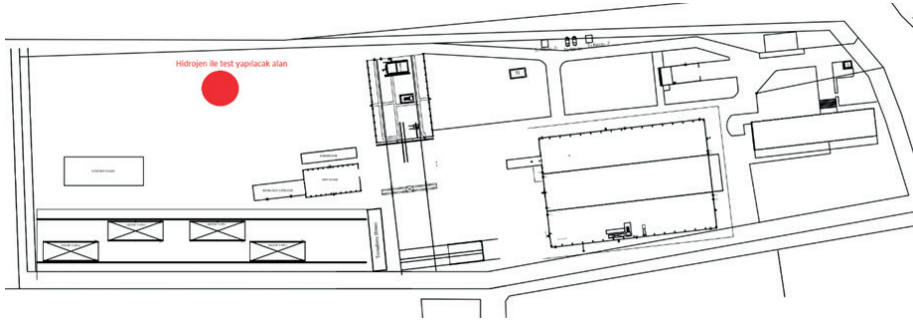
Test sahası ile firmanın ilk operasyonel atölyesi olan 1. boyahane arasındaki mesafe 105 metre ve 2. boyahane olan mesafesi ise 112 metredir. Her iki atölyede günlük 3 kişi çalışmaktadır.

### Şirketin mühendislik biriminin tasarım bilgilerine dayanarak:

Tasarım sıcaklığı min./maksimum  $-20\text{ °C} - 50\text{ °C}$  ; Çalışma sıcaklığı  $-20\text{ °C}$  ve Max çalışma basıncı  $30\text{ °C}$  derecedir. Bu bağlamda termal riskin değerlendirilmesi için  $-20\text{ °C}$ ,  $15\text{ °C}$  derece ve  $50\text{ °C}$  derece olmak üzere üç sıcaklık noktası değerlendirilmiş olup, ilgili bulgular 1.2. çıktılar ve sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Çalışanların yıllık olası maruziyeti, ayda 3 test yapıldığı varsayılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$12(\text{ay}) * 3(\text{test}) * 8(\text{saat}) = 288 \text{ saat yıllık çalışan maruziyeti}$$



**Şekil 1.** Şirketin Tesis Şeması

Literatürler TNO probit modellerinin kullanılmasını tavsiye etmiş ve aşırı basınç olaylarından kaynaklanan dolaylı etkilerin insanlar için en önemli endişeyi temsil ettiğini ileri sürmüştür. Ölümcül akciğer hasarına neden olmak için gereken aşırı basınçlar, gereken değerlerden önemli ölçüde daha yüksektir bir kişiyi engellere fırlatmak veya deriyi delebilecek füzeler üretmek. Ek olarak bir yapının içindeki bir kişinin akciğer hasarından ziyade tesisin çökmesi nedeniyle ölme olasılığı daha yüksektir. Ancak açık havada bulunan bir kişi yapının çökmesi riskiyle karşı karşıya olmayacaktır; bu nedenle HyRAM+ varsayılanı, patlama/aşırı basınç etkileri için TNO modelidir.

Gerçek verilere dayalı olarak veri bilgileri kısmında aşağıdaki özellikler ile senaryo oluşturulmuştur.

- Yakıt Fazı ve Özellikleri
- Tank Parametreler
- Akışkan Parametreler
- Sistem Açıklaması
- Boru Özellikleri
- Yakıt İkmal Özellikleri
- Tesis Açıklaması
- Varsayılan Ateşleme Olasılıkları

**Tablo 1:** Yakıt Fazı ve Özellikleri

Yakıt	Hidrojen (H <sub>2</sub> )
Yüzde	100

**Tablo 2: Tank Parametreler**

Hacim	Basınç	Yoğunluk	Kütle	Sıcaklık
19 m <sup>3</sup>	30 barg	2,82 kg/m <sup>3</sup>	53,58 kg	-20 °C

**Tablo 3: Akışkan Parametreler**

Parametreler	Değer	Birim
Tank Sıvı Basıncı	3000	Bar
Ortam Sıcaklığı	25	Celsius
Ortam Basıncı	1	Atm
Tank sıvı sıcaklığı	-20	Celsius
Deşarj katsayısı	1	-

**Tablo 4: Sistem Açıklaması**

Parametre	Tank	Instrument	Joint	Flanş	Valf	Yükleme kolları
Değer	1	4	10	5	2	4 (2 each on head and body)

**Tablo 5: Boru Özellikleri**

Parametre	Değer	Birim
Boru (Uzunluk)	0,750	Metre
Boru dış çapı	3,35	Santimetre
Boru duvar kalınlığı	0,338	Santimetre

**Tablo 6: Yakıt İkmal Özellikleri**

Parametre	Değer
Tank sayısı	1
Araç başına yakıt ikmal sayısı	1
Yıllık araç işletim günü sayısı	12
Yıllık talepler (hesaplanan)	12

**Tablo 7: Tesis Açıklaması**

Alan	Genişlik(m)	Yükseklik (m)	Çalışan Sayısı
Test Alanı	20	20	3
Boyahane1	105	137	3
Boyahane2	112	144	3
Tum Tesis Alanı	520	142	249

**Tablo 8: Varsayılan Ateşleme Olasılıkları**

Sızıntı Rate	Sızıntı Ignition Probability	
	Immadiate	Delayed
< 0.125	0.008	0.004
0.125-6.25	0.053	0.027
> 6.25	0.230	0.120

## 1.2. Çıktılar Ve Sonuçlar

### 1.2.1. QRA Sonuçları

Proje kapsamında 2.1. veri girişi bölümünde girilen veriler ile hidrojen tankının risk değerlendirmesi QRA (Quantitative Risk Assessment - Nicel Risk Değerlendirmesi) ile modellenmiştir. Sonuçlar bu bölümün altında detaylı olarak verilmiştir.

#### 1.2.1.1. Risk Ölçümleri

Değerlendirilen bir sistemin ölüm riskini ifade etmek için kullanılan birden fazla ölçüm vardır. Senaryo kapsamında Potansiyel Can Kaybı (PLL), Ölümcül Kaza Oranı (FAR) ve Ortalama Bireysel Risk (AIR) hesaplanmıştır.

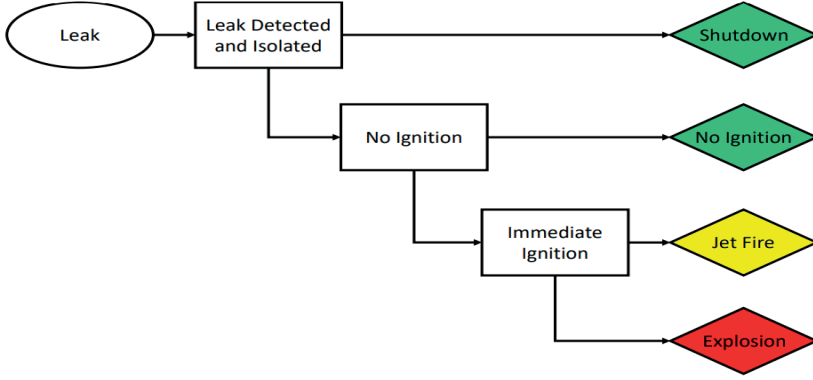
**Tablo 9: Risk Ölçümleri Sonuç tablosu**

Risk İndeksi	Değer	Birim
Potansiyel Can Kaybı (PLL)	Yok	Ölüm/sistem yıl
Ölümcül Kaza Oranı (FAR)	Yok	10 <sup>8</sup> kişi-saatteki ölümler
Ortalama Bireysel Risk (AIR)	Yok	Ölüm/yıl

HyRAM QRA analiz sonuçlarında 2.1 veri girişi bölümünde girilen sistem verilerine göre Risk ölçümleri sonuç tablosu Tablo 9'da verilmiştir. **Bu sonuçlara göre Potansiyel Can Kaybı, Ölümcül Kaza Oranı ve Ortalama Bireysel Risk çıkmamıştır.**

#### 1.2.1.2. Senaryo Modelleri

Olay Ağacı sekmesi, algılama/izolasyonun başarısına ve tutuşma zamanına bağlı olarak bir yakıt salınımından sonra meydana gelebilecek senaryoları gösterir. Şekil2'de HyRAM+ tarafından yanıcı gaz salınımları için kullanılan olay sırası diyagramı verilmiştir. Diyagramda kapatma, jet yangını, patlama, ateşleme yok senaryoları gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Yanıcı Gaz Salınımı Olay Ağacı Diyagramı

Bir yakıt salınımı algılanmaz ve izole edilmezse ortaya çıkabilecek üç olası sonuç vardır: jet yangınları, patlamalar ve tutuşmamış salınımlar. Yakıt tutuşmazsa (ya salınımın başarılı bir şekilde algılanması/izolasyonu ya da tutuşma eksikliği nedeniyle), dikkate alınan risk açısından önemli bir sonuç yoktur. Yüksek basınçlı bir yakıt salınımı kaynağın yakınında hemen tutuşturulduğunda, sonuç klasik bir türbülanslı jet alevidir. Yakıt hemen tutuşmazsa ancak daha sonra tutuşturulursa (gecikmeli tutuşma), sonuç bir patlamadır. HyRAM+’da kodlanan olay ağacı bu senaryoları modeller. Tablo 10’da %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 hidrojen gaz salınımı oranları için kapatma, jet yangını, patlama, ateşleme yok senaryolarının olasılıkları ve risk oranları sayısal değer olarak hesaplanmıştır. **Tüm senaryolarda sızıntının fark edilerek sistemin kapatılması olasılığı %90 ve risk oranları %0.00 olarak bulunmuştur.**

**Tablo 10.** Sızıntı Senaryoları Olay Ağacı Olasılık ve Risk Oranları

Senaryo	Senaryo Çıktısı	Olasılık	Risk Oranı
000,01% Sızıntı	Kapatma (Shutdown)	%90,00	%0,00
000,01% Sızıntı	Jet yangını (Jet fire)	%0,08	%0,00
000,01% Sızıntı	Patlama (Explosion)	%0,04	%0,00
000,01% Sızıntı	Ateşleme yok (No ignition)	%9,88	%0,00
000,10% Sızıntı	Kapatma (Shutdown)	%90,00	%0,00
000,10% Sızıntı	Jet yangını (Jet fire)	%0,08	%0,00
000,10% Sızıntı	Patlama (Explosion)	%0,04	%0,00
000,10% Sızıntı	Ateşleme yok (No ignition)	%9,88	%0,00
001,00% Sızıntı	Kapatma (Shutdown)	%90,00	%0,00
001,00% Sızıntı	Jet yangını (Jet fire)	%0,08	%0,00
001,00% Sızıntı	Patlama (Explosion)	%0,04	%0,00
001,00% Sızıntı	Ateşleme yok (No ignition)	%9,88	%0,00
010,00% Sızıntı	Kapatma (Shutdown)	%90,00	%0,00

010,00% Sızıntı	Jet yangını (Jet fire)	%0,08	%0,00
010,00% Sızıntı	Patlama (Explosion)	%0,04	%0,00
010,00% Sızıntı	Ateşleme yok (No ignition)	%9,88	%0,00
100,00% Sızıntı	Kapatma (Shutdown)	%90,00	%0,00
100,00% Sızıntı	Jet yangını (Jet fire)	%0,53	%0,00
100,00% Sızıntı	Patlama (Explosion)	%0,27	%0,00
100,00% Sızıntı	Ateşleme yok (No ignition)	%9,20	%0,00

### 1.2.1.3. Senaryo Detayları

Senaryo Sıralaması, tüm sürüm boyutları için son durum türlerini, sıklıklarını ve risk katkısını (PLL metrik hesaplamalarına dayalı olarak) içerir. Senaryo detayları, her sızıntı boyutu için detay sağlar; ilgili kütle akış hızı ve sızıntı çapı Tablo 5’de verilmiştir. Sızıntı senaryosu detayları boru boyutu, basınç ve kesirli sızıntı boyutlarına göre hesaplanır. Sızıntı sonuçları izolasyon ve tutuşma olasılıklarına göre hesaplanır. Sızıntı senaryoları olasılık oranları Tablo 4 ve Tablo 6’da verilmiştir.

**Tablo 11. Sızıntı Boyutuna Göre Kütle Akış Hızı ve Sızıntı Çapı**

Sızıntı Boyutu	Kütle Akış Hızı	Sızıntı Çapı (m)
000,01% Sızıntı	1,154E-004	2,700E-004
000,10% Sızıntı	1,154E-003	8,538E-004
001,00% Sızıntı	1,154E-002	2,700E-003
010,00% Sızıntı	1,154E-001	8,538E-003
100,00% Sızıntı	1,154E+000	2,700E-002

**Tablo 12. Sızıntı Senaryoları Olasılık Oranları**

Senaryo Çıktısı	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
Kapatma (Shutdown)	%90,00	%90,00	%90,00	%90,00	%90,00
Jet yangını (Jet fire)	%0,08	%0,08	%0,08	%0,08	%0,53
Patlama (Explosion)	%0,04	%0,04	%0,04	%0,04	%0,27
Ateşleme yok (No ignition)	%9,88	%9,88	%9,88	%9,88	%9,20

### 1.2.1.4. Veri olasılıkları

#### A. Parça sızıntıları (Component Leaks)

Sistemde tanımlanan hidrojen tankı, 5 flanş, 2 valf ve 10 joint sızıntının olabileceği potansiyel yerler olduğu için bu parçalar özel olarak analiz edilmiştir. Her bir kısım için 5 boyutta (%0,01, %0,1, %1, %10 ve %100) sızıntı sıklığı hakkında varsayımlar içerir. Bu değerler, lognormal bir dağılımın (mu ve sigma) parametreleri olarak kodlayarak mu ve sigma ortalaması ve varyansı otomatik olarak hesaplar.

Tablo 13 gaz halindeki hidrojen için hidrojen tankı, flanş, valf ve jointler olası (%0,01, %0,1, %1, %10 ve %100) sızıntılar için varsayılan istatistik değerlerini göstermektedir.

Sigma istatistikte standart sapmayı tanımlar. Bir istatistik dağılımında, verilerin ortalamadan ne kadar değişkenlik gösterdiğini belirtir. Ortalama, bir veri setindeki tüm verilerin (sayıların) toplamının veri sayısına bölümüdür.  $\mu$  sembolü ile gösterilir. Mean veri setimizdeki tüm veri noktalarının toplamının toplam veri noktasına bölümü ile edilen bir "ortalama" sayıdır. Medyan: Ortadaki sayı; tüm veri noktalarını sıralayıp ortadakini seçerek (veya ortada iki sayı varsa, bunların ortalamasını alarak) bulunur.

**Tablo 13. Sistemdeki Parçaların Sızıntı Boyutuna Göre İstatistik Değerleri**

<b>Hidrojen Tankı</b>						
<b>Sızıntı Boyutu</b>	<b>Mu</b>	<b>Sigma</b>	<b>Mean</b>	<b>5th</b>	<b>Median</b>	<b>95th</b>
0.01%	-13,4770	0,7347	1,8E-006	4,2E-007	1,4E-006	4,7E-006
0.10%	-13,6410	0,6387	1,5E-006	4,2E-007	1,2E-006	3,4E-006
1%	-14,0512	0,6203	9,6E-007	2,8E-007	7,9E-007	2,2E-006
10%	-14,6144	0,6041	5,4E-007	1,7E-007	4,5E-007	1,2E-006
100%	-15,2732	0,6156	2,8E-007	8,5E-008	2,3E-007	6,4E-007
<b>Flanş</b>						
<b>Sızıntı Boyutu</b>	<b>Mu</b>	<b>Sigma</b>	<b>Mean</b>	<b>5th</b>	<b>Median</b>	<b>95th</b>
0.01%	-3,9125	1,4920	6,1E-002	1,7E-003	2,0E-002	2,3E-001
0.10%	-6,1191	1,1345	4,2E-003	3,4E-004	2,2E-003	1,4E-002
1%	-8,3252	2,0541	2,0E-003	8,3E-006	2,4E-004	7,1E-003
10%	-10,5327	0,7208	3,5E-005	8,1E-006	2,7E-005	8,7E-005
100%	-12,7385	1,6925	1,2E-005	1,8E-007	2,9E-006	4,8E-005
<b>Joint</b>						
<b>Sızıntı Boyutu</b>	<b>Mu</b>	<b>Sigma</b>	<b>Mean</b>	<b>5th</b>	<b>Median</b>	<b>95th</b>
0.01%	-10,2591	0,2423	3,6E-005	2,4E-005	3,5E-005	5,2E-005
0.10%	-12,2703	0,8727	6,9E-006	1,1E-006	4,7E-006	2,0E-005
1%	-11,7538	0,5333	9,1E-006	3,3E-006	7,9E-006	1,9E-005
10%	-11,7961	0,6073	9,1E-006	2,8E-006	7,5E-006	2,0E-005
100%	-11,9590	0,6600	8,0E-006	2,2E-006	6,4E-006	1,9E-005
<b>Valf</b>						
<b>Sızıntı Boyutu</b>	<b>Mu</b>	<b>Sigma</b>	<b>Mean</b>	<b>5th</b>	<b>Median</b>	<b>95th</b>
0.01%	-5,8546	0,2500	3,0E-003	1,9E-003	2,9E-003	4,3E-003
0.10%	-7,4425	0,4344	6,4E-004	2,9E-004	5,9E-004	1,2E-003
1%	-9,8190	1,1434	1,0E-004	8,3E-006	5,4E-005	3,6E-004
10%	-10,6079	0,6270	3,0E-005	8,8E-006	2,5E-005	6,9E-005
100%	-12,2436	1,3690	1,2E-005	5,1E-007	4,8E-006	4,6E-005

## B. Cut Set

Cut Set sekmeleri, her sistem bileşeni için beklenen arıza sıklığını temsil eder. Özellikle, bir cut set, bir bileşen arızasının belirli bir potansiyel sızıntı boyutu üzerindeki etkisidir. Bu hesaplama, her olası sistem bileşeni için her sızıntı boyutu için beklenen sızıntı frekansını hesaba katar ve bu sızıntı frekanslarını sistemdeki belirli bileşenlerin sayısına göre ağırlıklandırır. Bu hesaplamalar, kullanıcıya hangi bileşenin belirli bir boyuttaki bir Sızıntıya katkıda bulunma olasılığının daha yüksek olduğunu söyleyebilir. Bu, karar vericilere sızıntıları en aza indirmek için belirli bileşenlerin kullanımını sınırlamanın gerekip gerekmediği konusunda fikir verebilir.

**Tablo 14. Cut Set Sızıntı Oranları**

Cut Set	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
Tank Sızıntı	0,000001	0,000001	0,000001	0,000000	0,000000
Valf Sızıntı	0,005733	0,001172	0,000109	0,000049	0,000010
Instrument Sızıntı	0,002494	0,000782	0,000447	0,000400	0,000147
Joint Sızıntı	0,000350	0,000047	0,000079	0,000075	0,000064
Boru Sızıntı	0,000006	0,000003	0,000001	0,000000	0,000000
Flanş Sızıntı	0,099952	0,011002	0,001212	0,000133	0,000015

**Tablo 15. Kazalardan Ve Kapatma Arızalarından Dolayı %100 Hidrojen Salınımı**

Kazalardan ve kapatma arızalarından dolayı %100 H <sub>2</sub> salınımı	%100 Sızıntı
Yakıt doldurma sırasındaki aşırı basınç yırtılmaya neden olur	0,000000
Akıştan kaynaklanan sızıntı	0,000000
Nozzle serbest bırakma	0,024010
Manuel valf kapanmıyor	0,012000
Solenoid valfler kapanmıyor	0,001536

### 1.2.1.5. Grafik Diyagramları

Firma çalışanlarının maruz kaldığı termal radyasyon akısı (radiative heat flux), anında tutuşan jet yangını senaryosuyla ilişkili potansiyel zarardır. Firma çalışanları değişen sızıntı boyutlarında (%0,01, %0,1, %1, %10 ve %100) karşılaşabileceği termal etkiler, aşırı basınç ve darbe (impulse) tablo ve grafikleri bu bölümde verilmiştir.

Tablo ve grafiklerde çalışanların deney yapılacak tank ile aralarındaki konum verileri de verilmiştir. Kullanıcı konumlarının tamamı sızıntı noktasına göre tanımlanmıştır; yani sızıntı “başlangıçta” (0, 0, 0) meydana gelir ve pozitif-*x* yönde olduğundan, yolcu konumları (*x*, *y*, *z*) bu referans noktasına dayanmaktadır. *x* ve *z* koordinatları yere yatay, *y* koordinatları ise yerden yüksekliktir. Termal riskin değerlendirilmesi için -20 °C, 15 °C derece ve 50 °C derece olmak üzere üç farklı sıcaklık değerine göre 3 farklı senaryo incelenerek. Sıcaklığın sistem üzerindeki etkisine bakılmıştır.

### A. Termal Etki (-20 °C):

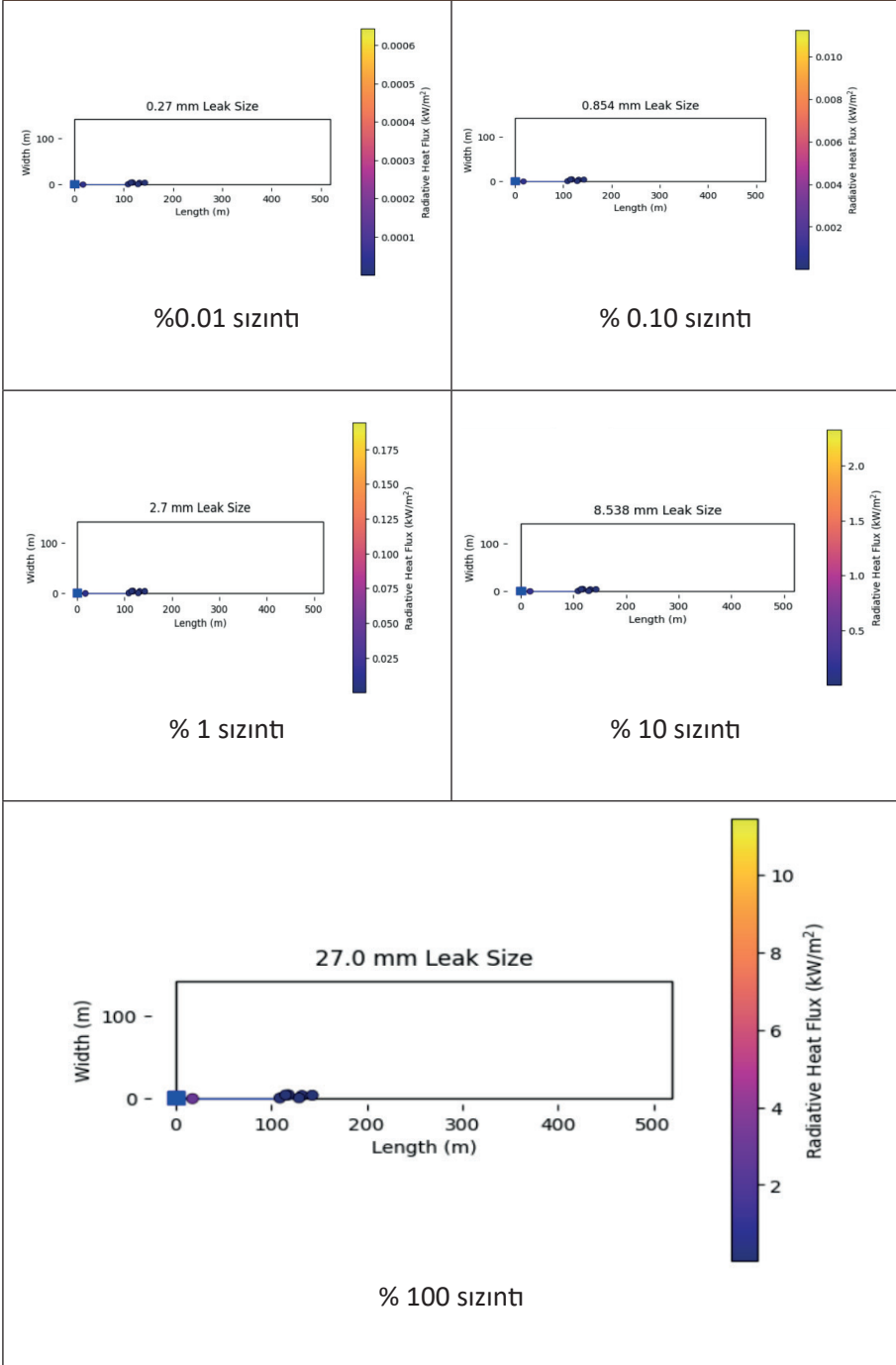
Tablo 16’da -20 °C ‘de %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 sızıntı durumlarındaki termal etki değerleri verilmiştir.

**Tablo 16. -20 °C Termal Etki (kW/m<sup>2</sup>) Değerleri**

Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	6,429E-004	1,125E-002	1,940E-001	2,327E+000	1,144E+001
2	4,6	0,0	0,0	6,337E-004	1,108E-002	1,913E-001	2,305E+000	1,139E+001
3	17,8	0,0	0,0	3,731E-005	6,449E-004	1,126E-002	1,970E-001	2,858E+000
4	132,2	12,4	3,7	5,327E-007	9,156E-006	1,575E-004	2,719E-003	4,753E-002
5	129,2	7,9	0,9	5,633E-007	9,683E-006	1,667E-004	2,881E-003	5,059E-002
6	109,2	10,5	0,7	8,023E-007	1,379E-005	2,373E-004	4,098E-003	7,174E-002
7	143,1	2,7	4,1	4,544E-007	7,812E-006	1,345E-004	2,328E-003	4,103E-002
8	118,2	0,3	4,6	6,829E-007	1,174E-005	2,024E-004	3,509E-003	6,222E-002
9	115,2	4,2	4,4	7,204E-007	1,239E-005	2,133E-004	3,694E-003	6,522E-002

Grafik 1’in köşesindeki mavi kare, yakıt sızıntısı noktasını temsil ederken alttaki *x* eksenindeki mavi çizgi, sızıntının koordinat yönünü temsil eder. Noktalar, tesisteki 9 kişinin konumlarını temsil eder ve ilgili nokta renkleri, bu tesis sakinlerinin hidrojen sızıntısı nedeniyle konumlarına göre maruz kalacağı termal radyasyon (kW/m<sup>2</sup> cinsinden) miktarını gösterir. **Sonuçlara göre tanka en yakın mesafede çalışan 3 kişinin bir jet yangını esnasında maksimum 1,144E+001 kW/m<sup>2</sup> olarak en yüksek derecede radyasyona maruz kalacağı görülmektedir.**

## Termal Etki kW/m<sup>2</sup> (-20 C)



**Grafik 1.** -20 °C 'de %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 Sızıntı Durumlarındaki Termal (kW/m<sup>2</sup>) Etki

## B. Basınç Etkisi (-20 °C):

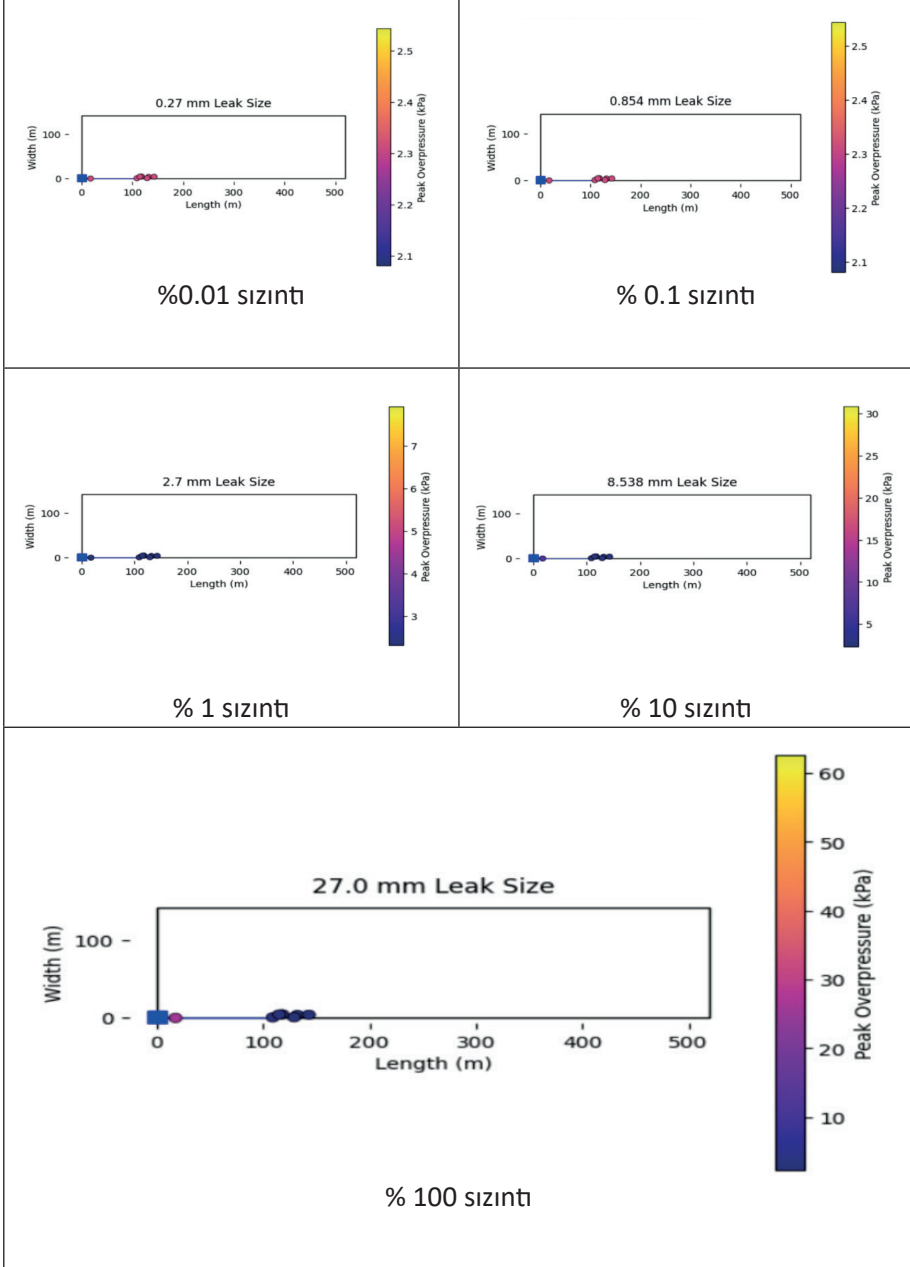
Tablo 17'deki veriler aynı çalışan konumlarında maruz kalınan yüksek basıncı (kPa cinsinden) değerlerini vermektedir.

**Tablo 17. -20 °C Yüksek Basınç (kPa) Değerleri**

Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	7,914E+000	3,084E+001	6,256E+001
2	4,6	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	7,794E+000	3,072E+001	6,230E+001
3	17,8	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	6,291E+000	2,563E+001
4	132,2	12,4	3,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,391E+000
5	129,2	7,9	0,9	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,466E+000
6	109,2	10,5	0,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,983E+000
7	143,1	2,7	4,1	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
8	118,2	0,3	4,6	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,721E+000
9	115,2	4,2	4,4	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,791E+000

Grafik 2'in köşesindeki mavi kare, yakıt sızıntısı noktasını temsil ederken alttaki x eksenindeki mavi çizgi, sızıntının koordinat yönünü temsil eder. Noktalar, tesisteki 9 kişinin konumlarını temsil eder ve ilgili nokta renkleri, bu tesis sakinlerinin hidrojen sızıntısı nedeniyle konumlarına göre maruz kalacağı yüksek basınç (kPa cinsinden) miktarını gösterir. **Sonuçlara göre tanka en yakın mesafede çalışan 3 kişinin bir jet yangını esnasında maksimum 6,256E+001 kPa olarak yüksek basınca maruz kalacağı görülmektedir.**

## Yüksek Basınç (-20 C)



**Grafik 2.** -20 oC 'de %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 Sızıntı Durumlarındaki Yüksek Basınç (kPa) Etkisi

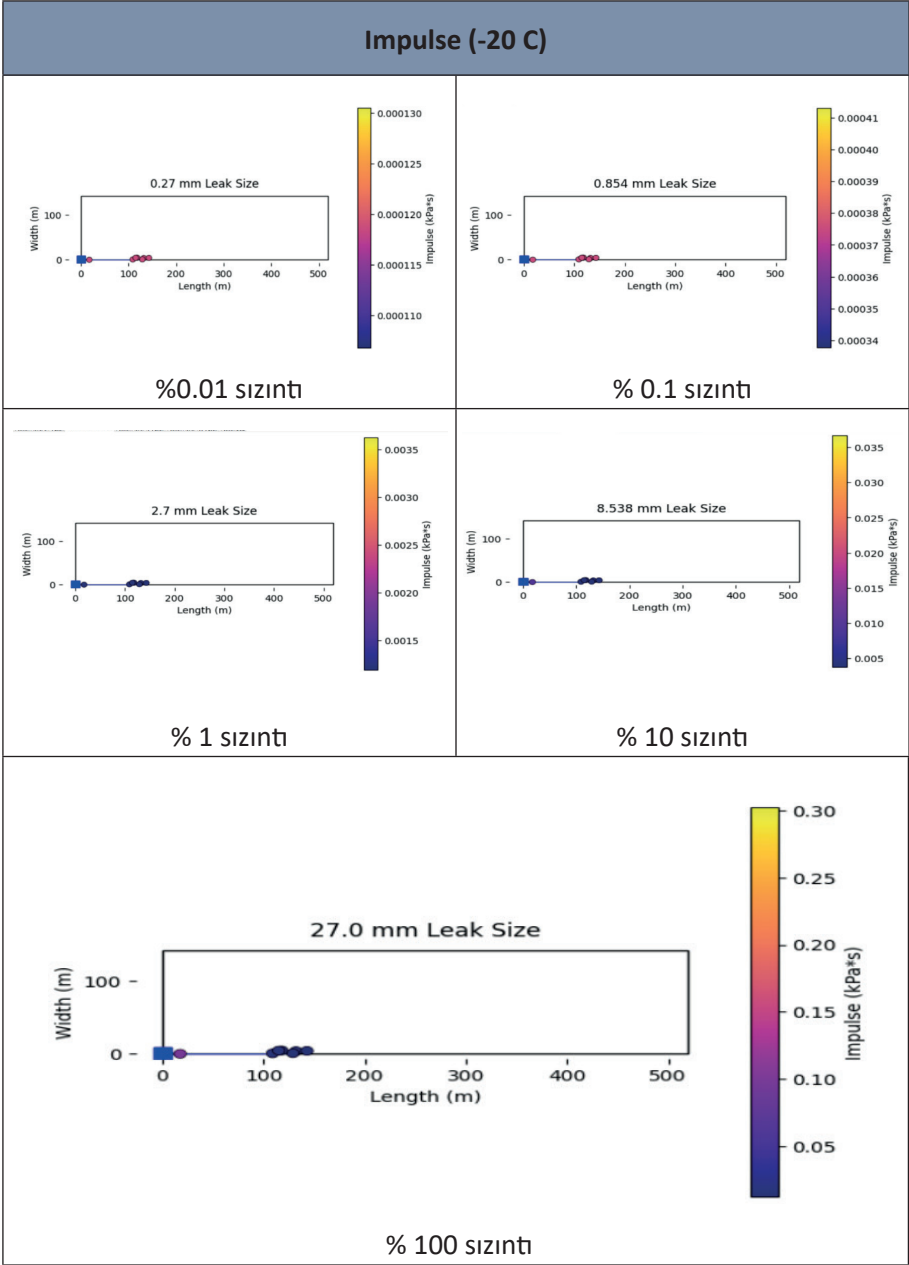
### C. Darbe (Impulse) (kPa\*s) Etkisi (-20 °C):

Tablo 18’de, veriler aynı çalışan konumlarında maruz kalınan darbe (kPa\*s cinsinden) değerlerini vermektedir.

**Tablo 18. -20 °C Darbe Etki (kPa\*s) Değerleri**

Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	1,186E-004	3,753E-004	3,622E-003	3,666E-002	3,023E-001
2	4,6	0,0	0,0	1,186E-004	3,753E-004	3,574E-003	3,645E-002	3,015E-001
3	17,8	0,0	0,0	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	9,228E-003	9,650E-002
4	132,2	12,4	3,7	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,230E-002
5	129,2	7,9	0,9	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,264E-002
6	109,2	10,5	0,7	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,524E-002
7	143,1	2,7	4,1	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,221E-002
8	118,2	0,3	4,6	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,435E-002
9	115,2	4,2	4,4	1,186E-004	3,753E-004	1,189E-003	3,782E-003	1,473E-002

Grafik 3’in köşesindeki mavi kare, yakıt sızıntısı noktasını temsil ederken alttaki x eksenindeki mavi çizgi, sızıntının koordinat yönünü temsil eder. Noktalar, tesisteki 9 kişinin konumlarını temsil eder ve ilgili nokta renkleri, bu tesis sakinlerinin hidrojen sızıntısı nedeniyle konumlarına göre maruz kalacağı yüksek basınç (kPa cinsinden) miktarını gösterir. **Sonuçlara göre tanka en yakın mesafede çalışan 3 kişinin bir jet yangını esnasında maksimum 3,023E-001kPa\*s olarak darbeye maruz kalacağı görülmektedir.**



**Grafik 3. -20 oC 'de %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 Sızıntı Durumlarındaki Darbe (kPa\*s) Etkisi**

Sıcaklığın tank üzerindeki risklerinin detaylı etkilerini görmek için -20 °C'nin yanında +15 °C derece ve +50 °C derecedeki senaryolar diğer tüm değerler aynı tutularak analiz edilmiştir. Tablo 19'da 15 °C için termal etki, yüksek basınç ve darbe değerleri verilmiştir.

**Tablo 19. +15 °C için Termal Etki, Yüksek Basınç ve Darbe Değerleri**

Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	5,641E-004	9,860E-003	1,708E-001	2,132E+000	1,073E+001
2	4,6	0,0	0,0	5,560E-004	9,719E-003	1,684E-001	2,112E+000	1,068E+001
3	17,8	0,0	0,0	3,275E-005	5,659E-004	9,872E-003	1,729E-001	2,459E+000
4	132,2	12,4	3,7	4,677E-007	8,038E-006	1,383E-004	2,386E-003	4,144E-002
5	129,2	7,9	0,9	4,946E-007	8,501E-006	1,463E-004	2,528E-003	4,409E-002
6	109,2	10,5	0,7	7,044E-007	1,211E-005	2,084E-004	3,596E-003	6,246E-002
7	143,1	2,7	4,1	3,989E-007	6,858E-006	1,181E-004	2,042E-003	3,578E-002
8	118,2	0,3	4,6	5,996E-007	1,031E-005	1,776E-004	3,078E-003	5,417E-002
9	115,2	4,2	4,4	6,325E-007	1,087E-005	1,873E-004	3,241E-003	5,677E-002
Yüksek Basınç (kPa) (15 °C)								
Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	7,075E+000	2,832E+001	5,633E+001
2	4,6	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	7,010E+000	2,812E+001	5,610E+001
3	17,8	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	5,517E+000	2,186E+001
4	132,2	12,4	3,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
5	129,2	7,9	0,9	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
6	109,2	10,5	0,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,602E+000
7	143,1	2,7	4,1	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
8	118,2	0,3	4,6	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,410E+000
9	115,2	4,2	4,4	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,471E+000

Darbe (kPa*s) (15 °C)								
Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	1,065E-004	3,369E-004	2,821E-003	2,860E-002	2,509E-001
2	4,6	0,0	0,0	1,065E-004	3,369E-004	2,806E-003	2,835E-002	2,497E-001
3	17,8	0,0	0,0	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	7,214E-003	7,785E-002
4	132,2	12,4	3,7	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,089E-002
5	129,2	7,9	0,9	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,089E-002
6	109,2	10,5	0,7	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,186E-002
7	143,1	2,7	4,1	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,089E-002
8	118,2	0,3	4,6	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,102E-002
9	115,2	4,2	4,4	1,065E-004	3,369E-004	1,067E-003	3,389E-003	1,130E-002

Tablo 19 'da +50 °C için termal etki, yüksek basınç ve darbe değerleri verilmiştir.

**Tablo 20. +50 °C İçin Termal Etki, Yüksek Basınç ve Darbe Değerleri**

Termal Etki (50 °C)								
Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	5,031E-004	8,790E-003	1,527E-001	1,971E+000	1,033E+001
2	4,6	0,0	0,0	4,960E-004	8,664E-003	1,506E-001	1,951E+000	1,028E+001
3	17,8	0,0	0,0	2,923E-005	5,048E-004	8,801E-003	1,542E-001	2,234E+000
4	132,2	12,4	3,7	4,174E-007	7,174E-006	1,234E-004	2,128E-003	3,690E-002
5	129,2	7,9	0,9	4,414E-007	7,587E-006	1,306E-004	2,255E-003	3,924E-002
6	109,2	10,5	0,7	6,287E-007	1,081E-005	1,859E-004	3,208E-003	5,560E-002
7	143,1	2,7	4,1	3,560E-007	6,120E-006	1,054E-004	1,821E-003	3,184E-002
8	118,2	0,3	4,6	5,351E-007	9,200E-006	1,585E-004	2,745E-003	4,817E-002
9	115,2	4,2	4,4	5,645E-007	9,705E-006	1,671E-004	2,890E-003	5,051E-002

Yüksek Basınç (kPa) (50 °C)								
Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	6,344E+000	2,527E+001	5,509E+001
2	4,6	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	6,297E+000	2,500E+001	5,509E+001
3	17,8	0,0	0,0	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	4,927E+000	1,937E+001
4	132,2	12,4	3,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
5	129,2	7,9	0,9	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
6	109,2	10,5	0,7	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
7	143,1	2,7	4,1	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
8	118,2	0,3	4,6	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
9	115,2	4,2	4,4	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000	2,312E+000
Darbe (kPa*s) (50 °C)								
Pozisyon	x(m)	y(m)	z(m)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
1	4,5	0,0	0,0	9,688E-005	3,065E-004	2,382E-003	2,418E-002	2,108E-001
2	4,6	0,0	0,0	9,688E-005	3,065E-004	2,369E-003	2,408E-002	2,100E-001
3	17,8	0,0	0,0	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	5,963E-003	6,300E-002
4	132,2	12,4	3,7	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003
5	129,2	7,9	0,9	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003
6	109,2	10,5	0,7	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003
7	143,1	2,7	4,1	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003
8	118,2	0,3	4,6	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003
9	115,2	4,2	4,4	9,688E-005	3,065E-004	9,703E-004	3,080E-003	9,871E-003

Tank en yakın mesafede olan 1 numaralı çalışan için Tablo20'de -20 °C, 15 °C ve 50 °C derece olmak üzere üç farklı senaryo da %0,01, %0,1, %1, %10 ve %100 sızıntı durumlarındaki termal etki, yüksek basınç ve darbe değerleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 21. 1 Numaralı Çalışan İçin Termal Etki, Yüksek Basınç ve Darbe Değerleri**

	Sıcaklık (°C)	%0.01 Sızıntı	%0.10 Sızıntı	%1 Sızıntı	%10 Sızıntı	%100 Sızıntı
Termal	-20	6,429E-004	1,125E-002	1,940E-001	2,327E+000	1,144E+001
	15	5,641E-004	9,860E-003	1,708E-001	2,132E+000	1,073E+001
	50	5,031E-004	8,790E-003	1,527E-001	1,971E+000	1,033E+001
Yüksek Basınç	-20	2,312E+000	2,312E+000	7,914E+000	3,084E+001	6,256E+001
	15	2,312E+000	2,312E+000	7,075E+000	2,832E+001	5,633E+001
	50	2,312E+000	2,312E+000	6,344E+000	2,527E+001	5,509E+001
Darbe	-20	1,186E-004	3,753E-004	3,622E-003	3,666E-002	3,023E-001
	15	1,065E-004	3,369E-004	2,821E-003	2,860E-002	2,509E-001
	50	9,688E-005	3,065E-004	2,382E-003	2,418E-002	2,108E-001

### 1.2.2. Fiziksel Parametre Analizi (Physical Consequence Models)

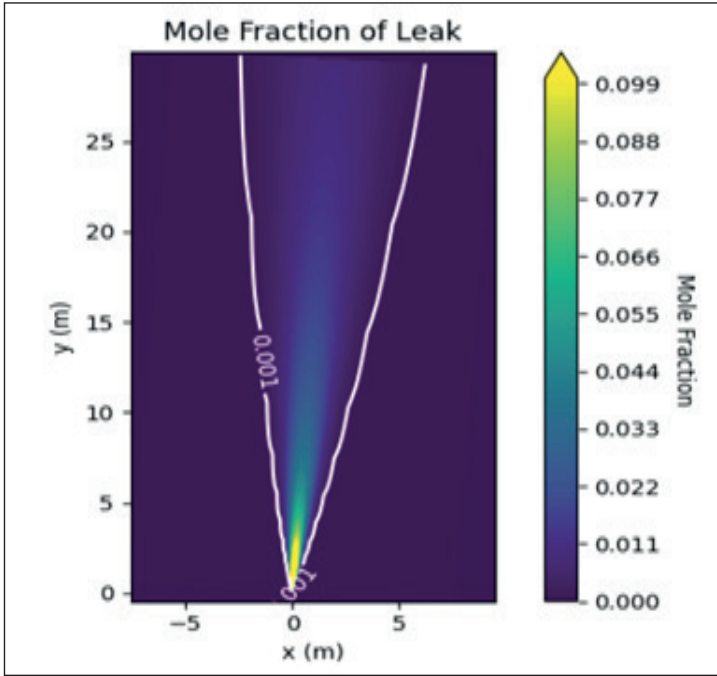
HyRAM+, farklı yakıtların salınımının davranışı, tehlikeleri ve sonuçlarıyla ilgili modeller sağlayan bir fizik modunu içerir. Jet alevleri, tutuşmayanlar için konsantrasyon profilleri jetler/dumanlar, bir dumanın gecikmeli tutuşmasından kaynaklanan aşırı basınç ve aşırı basınca neden olan gecikmeli ateşleme ile iç mekan birikiminin tümü fizik modundan incelenebilir. HyRAM+, çeşitli termodinamik hesaplamaları gerçekleştirmek için Python arayüzü aracılığıyla çağrılan CoolProp kütüphanesini kullanır. Termodinamik hesaplamalar sızıntı oranlarını hesaplamak için kullanılır ve sızıntı noktasına yakın bölgelerdeki kütle, momentum ve enerji dengelerinde kullanılır.

#### 1.2.2.1. Gaz Dağılımı (Gas Plume Dispersion)

Gaz dağılımı, tutuşmamış bir yakıt dumanının özelliklerini hesaplar. Bir jet veya duman bulutu için HyRAM+, Houf ve Winters tarafından açıklanan tek boyutlu modeli takip eder. Model yalnızca bir boyutu dikkate alırken, bu boyut akış çizgisi boyuncadır ve jet/duman, kaldırma kuvveti etkilerinden dolayı eğrilebilmektedir. Sızıntı deliğinden geçen kütleli akış hızı da verilmiştir. Tablo 22'de tankta çapı 5mm'lik bir yırtık olduğunda hidrojen gazının 3.959E-002 kg/s akış hızı ile dikey mesafede 29.75m yüksekliğe çıktığı görülmektedir.

**Tablo 22. Gaz Dağılımı Değerleri**

	Değer	Birim
Yırtık Çapı	5	mm
Jet Açısı	1.5	radyan
Kütle akış hızı	3.959E-002	Kg/s
Akış çizgisi mesafesi	29.58	m
Min Yatay Mesafe	-2.40	m
Maksimum Yatay Mesafe	0.00	m
Min Dikey Mesafe	0.00	m
Maksimum Dikey Mesafe	29.75	m



**Şekil 3. Gaz Dağılımı Dikey Mesafe Mol Fraksiyonu**

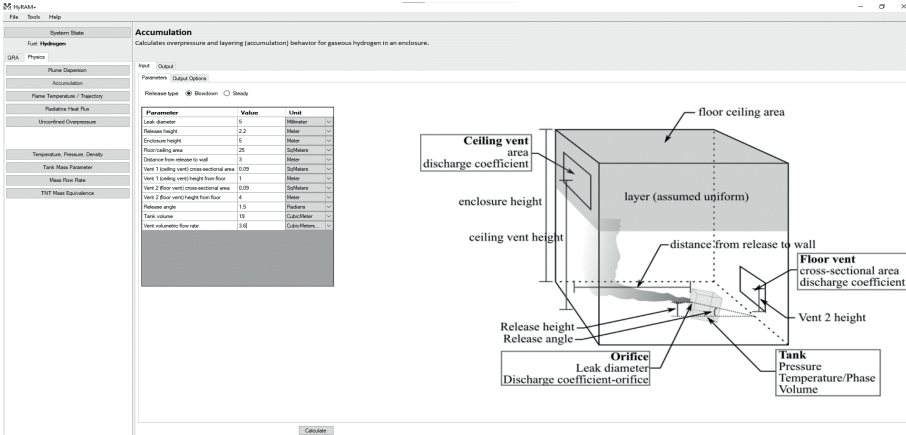
### 1.2.2.2. Birikim Sonuç Çıktıları (Accumulation Output)

Kapalı alanda hidrojen gaz birikimi sonuç çıktıları kısmında basınç grafiği, yanıcı kütle grafiği, katman grafiği, yörünge grafiği, kütle akış grafiği ve veri tablosunu içerir.

Tablo 23'te kapalı alanda gaz sızıntısı senaryo verileri, Şekil 4'de Kapalı alan simülasyon modelini şekilsel olarak verilmiştir.

**Tablo 23. Kapalı Alanda Gaz Sızıntısı Senaryo Verileri**

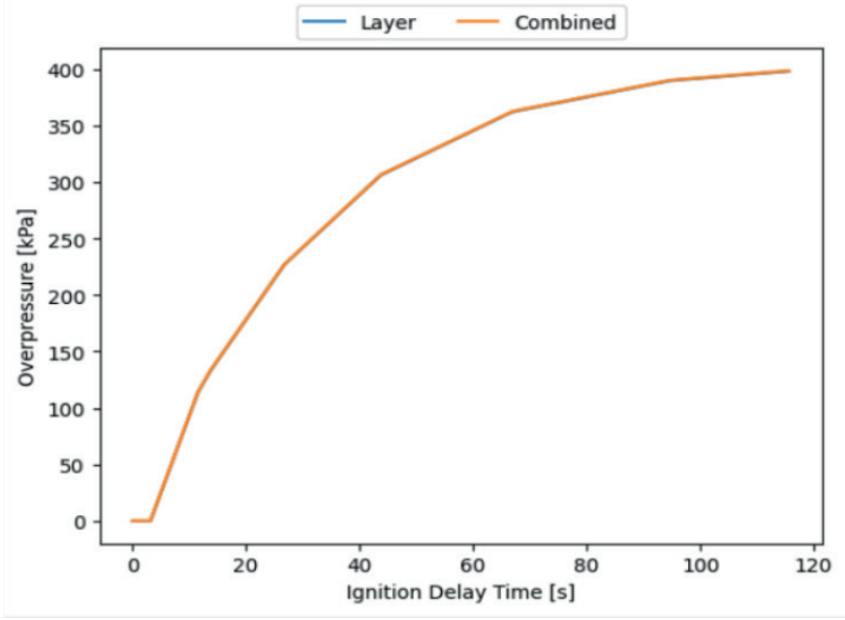
	Değer	Birim
Yırtık çapı	5	mm
Sızıntı yüksekliği	22	m
Muhafaza yüksekliği	5	m
Tavan/zemin alanı	25	m <sup>2</sup>
Sızıntıdan duvara olan mesafe	3	m
Havalandırma 1 (tavan havalandırması) kesit alanı	0.09	m <sup>2</sup>
Havalandırma 1 (tavan havalandırması) zeminden yükseklik	1	mr
Havalandırma 2 (zemin havalandırması) kesit alanı	0.09	m <sup>2</sup>
Havalandırma 2 (zemin havalandırması) zeminden yükseklik	4	m
Sızıntı açısı	1.5	radyan
Tank hacmi	19	m <sup>3</sup>
Havalandırma hacimsel akış hızı	36	m <sup>3</sup> /s



**Şekil 4. Kapalı alan simülasyon grafiği**

### 1.2.2.3. Basınç grafiği

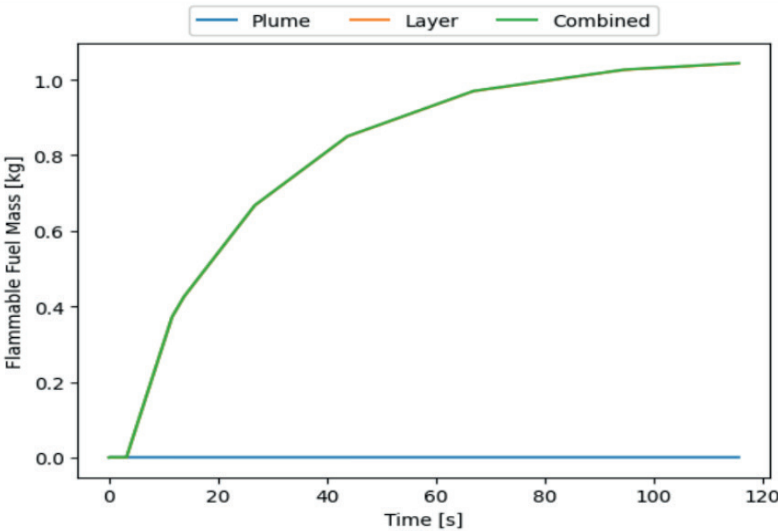
Yüksek basınç grafiği kapalı ortamda biriken gaz katmanlarının ateşlenmesinin gecikmesi durumunda oluşacak basıncı temsil eder. Şekil 5' de görülen sonuçlara göre 115,6. saniyede maksimum basınç 398,61 kPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Yüksek Basınç vs. Ateşleme Gecikme Süresi Grafiği

#### 1.2.2.4. Yanıcı Kütle Grafiği (Flammable Mass Plot)

Yanıcı kütle grafiği, ilgili zaman boyunca yanıcı bir konsantrasyonda mevcut olan hidrojen miktarını gösterir. Bu kütle hem birikmiş katmanı hem de sızıntıdan kaynaklanan dumanı içerir; Ayrıca hem katmandan hem de dumandan gelen yanıcı kütleleri birleştiren birleşik yanıcı kütle grafiği de çizilmiştir. Şekil 6'da yanıcı kütlelerin zaman ile nasıl arttığı görülmektedir.



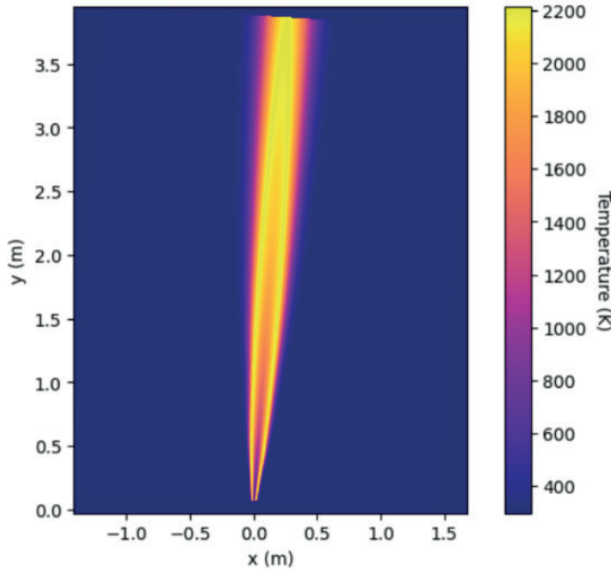
Şekil 6. Yanıcı Kütle vs. Zaman Grafiği

### 1.2.2.5. Jet Alev Sıcaklığı ve Yönü (Jet Flame Temperature and Trajectory)

Alev sıcaklığı/yönü, yakıt sıcaklığı, yön ve sızıntı boyutu da dahil olmak üzere jet alevinin davranışını hesaplayan değişkenleri içerir. Hidrojen sistemi, kavramsal nozul modeli Yuceil/Otugen'e ve sıvı fazlı gaza dayalı olarak alevin tol aldığı x ve y boyutlarında modellenmiştir. Tablo 24'te jet alev sıcaklığı ve yönünü hesaplamak için girilen parametreler verilmiştir. Şekil 7'de jet alevinin x ve y boyutlarındaki konumu görülmektedir.

**Tablo 24.** Jet Alev Parametreleri

	Değer	Birim
Yırtık Çapı	5	mm
Sızıntı Açısı	1.5	radyan
Kütle Akış Oranı	3.959E2-002	kg/s
Toplam Yayılan Radyasyon Gücü	2.525E+005	W
Görünür Alev Uzunluğu	3.872	m
Radyant Fraksiyon	0.053	



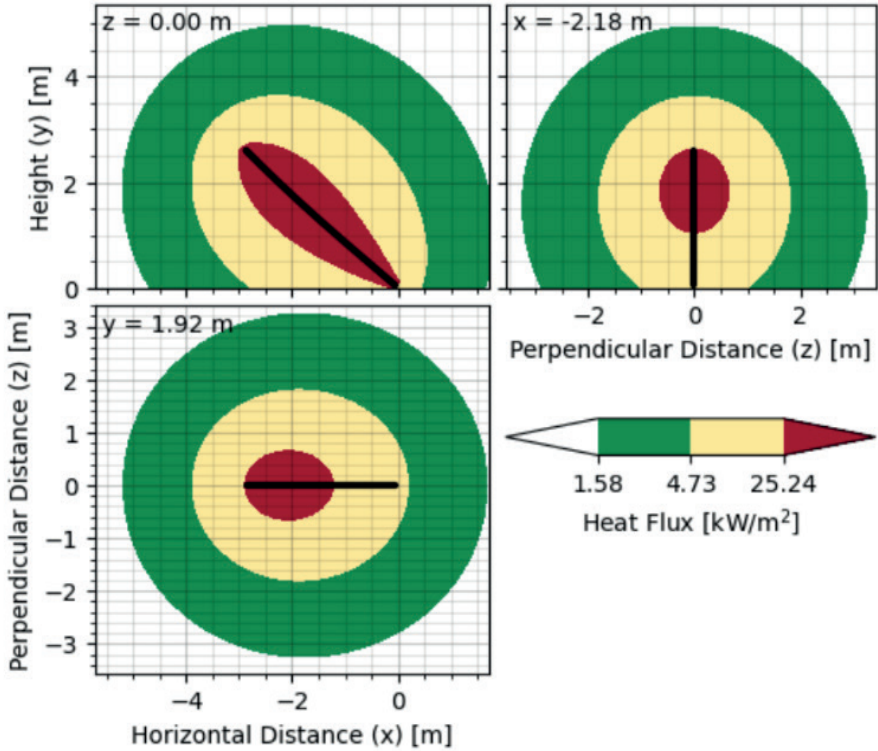
**Şekil 7.** Jet Alev Sıcaklık Grafiği

### 1.2.2.6. Jet Alev Isı Akısı (Jet Flame Heat Flux)

Radyatif Isı Akısı, radyatif ısı akısı değerlerini hesaplayan değişkenleri, ilgili çizimi içerir ve ayrıca bir sıcaklık çizimi oluşturur. Tablo 25'de jet alev kaynaklı ısı akısı değerleri ve x,y, z koordinatları verilmiştir. Jet alevine karşılık gelen üç radyatif ısı akısı 2-B çizimi; bir yan görünüm (sol üst), bir ön görünüm (sağ üst), bir üst görünüm (sol alt) olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.

**Tablo 25.** Jet Alev Kaynaklı Isı Akısı Değerleri ve X,Y, Z Koordinatları

x(m)	y(m)	z(m)	Flux (kW/m <sup>2</sup> )
0.0100	1.0000	0.0100	9.0839
0.5000	1.0000	0.5000	4.3159
1.0000	1.0000	0.5000	2.7271
2.0000	1.0000	1.0000	1.2767
2.5000	1.0000	1.0000	0.9875
5.0000	2.0000	1.0000	0.3753
10.0000	2.0000	0.5000	0.1201
15.0000	2.0000	0.5000	0.0572
25.0000	2.0000	1.0000	0.0214
40.0000	2.0000	2.0000	0.0084



**Şekil 8.** Jet Alev Kaynaklı Isı Akısı Değerleri ve X,Y, Z Koordinatları Grafiği

# ULUSAL VE ULUSLARARASI PROJELERDE HİDROJEN ENERJİSİ

**Hikmet Gamze İZ**

Üsküdar Üniversitesi, BrainPark Teknoloji Transfer Ofisi Destekli Projeler Uzmanı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-2000-3183

## GİRİŞ

Hidrojen enerjisi, artan dünya enerji ihtiyacı ve mevcut enerji kaynaklarının tükenme riski nedeniyle 21. yüzyılın öne çıkan enerji çözümlerinden biri olarak görülmektedir. Bu durum, sürdürülebilir ve alternatif enerji kaynaklarına olan talebi artırmış, hidrojenin potansiyeli bu bağlamda daha da önem kazanmıştır (Tutar ve Eren, 2011: 5). Bu yüzden enerji sürdürülebilir kalkınma hedefleri için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Hidrojen enerjisi hem ulusal hem de uluslararası düzeyde enerji politikalarının önemli bir parçasıdır.

Hidrojen, yakıldığında veya yakıt hücresinde kullanıldığında su buharı dışında emisyon üretmemektedir (Şenaktaş, 2005: 18). Bu durum karbon emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Hidrojen, enerji depolama özelliği sayesinde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının düzensiz üretimlerini dengelemek için etkili bir şekilde kullanılabilir. Fazla elektrik, suyun elektroliziyle hidrojene dönüştürülerek depolanabilir ve gerektiğinde tekrar elektrik üretilebilir. Ayrıca hidrojen, elektrik, ısıtma, ulaşım ve sanayi gibi farklı enerji tüketim sektörlerini birbirine bağlama potansiyeline sahiptir. Bu da enerji sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırabilir ve enerji verimliliğini artırabilir (Şenaktaş, 200: 55).

Hidrojen enerjisinin sunduğu bu avantajlar, sadece çevre koruma değil, aynı zamanda enerji güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır. Karbonsuz bir enerji taşıyıcısı olarak, hidrojenin kullanımı, sera gazı emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliği ile mücadele konusundaki küresel hedeflere ulaşmada kritik bir araçtır. Ayrıca, hidrojenin enerji depolama ve taşıma alanlarındaki yenilikçi uygulamaları, enerji arz güvenliğini artırma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyelini beraberinde getirmektedir.

Bu bağlamda, hidrojen enerjisi projelerinin geliştirilmesi ve desteklenmesi, sadece ulusal enerji stratejileri için değil, aynı zamanda uluslararası iş birlikleri ve küresel enerji politikaları açısından da büyük bir adım teşkil etmektedir. Bu projeler, enerjinin daha temiz, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde üretilmesi ve kullanılmasını sağlayarak, gelecekteki enerji güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerimize ulaşmada temel bir yapı taşı olacaktır. Dolayısıyla, hidrojen enerjisi alanındaki araştırmalar, yatırımlar ve teknolojik ilerlemeler hem çevresel hem de ekonomik açıdan uzun vadeli yararlar sağlayacak ve dünya genelinde enerji sistemlerinin dönüşümüne önemli katkılarda bulunacaktır.

Sonuç olarak, hidrojen enerjisi, 21. yüzyılın enerji gereksinimlerine yanıt verme kapasitesi nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Enerji ihtiyacının artışı ve geleneksel kaynakların tükenme riski, hidrojen enerjisinin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada oynayacağı rolü daha da belirgin hale getirmektedir. Karbonsuz emisyon avantajı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon yeteneği, hidrojenin çevresel etkileri azaltma ve enerji sistemlerini daha verimli hale getirme potansiyelini gözler önüne sermektedir. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi projelerinin geliştirilmesi ve desteklenmesi hem ulusal hem de uluslararası enerji stratejilerinde kritik bir adım olup, gelecekteki enerji güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik için büyük bir önem taşımaktadır.

## **1. HİDROJEN ENERJİSİNİN KÜRESEL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDEKİ ROLÜ**

Enerji teriminin giderek artan kullanımı, başlıca enerji kaynaklarının durumunu ele almamıza yol açmıştır. Günümüzde mevcut enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi bu kaynakların akılcı yöntemlerle kullanıma sunulması enerji politikalarının temelini oluşturmaktadır. Geleneksel enerji üretim ve tüketiminin çevre ve organik yaşam üstünde küresel düzeyde negatif etkilere neden oluşu kaynak çeşitliliğine ve seçilen kaynakların minimum erişilebilirliği kadar önem taşıdığı görülmüştür (Külekçi, 2009: 84).

Hidrojen çelik üretimi, kimya endüstrisi ve rafinaj gibi çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılabilir. Bu sektörlerde fosil yakıtların yerine temiz bir alternatif sunmaktadır. Hidrojen yakıt hücreli araçlar (otomobiller, kamyonlar, otobüsler, trenler) karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir potansiyele

sahiptir. Bu araçlar, fosil yakıtlı araçlara göre daha temiz ve sessizdir. Hidrojen, ülkelerin enerji ithalat bağımlılığını azaltabilir. Özellikle güneş ve rüzgâr gibi yerel yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen, enerji güvenliğini arttırabilir. Ancak, hidrojenin geniş ölçekli kullanımı bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Üretim maliyetleri, depolama ve taşıma zorlukları ve altyapı gereksinimleri gibi faktörler bu zorluklar arasındadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023: 14).

## 2. TÜRKİYE'DE HİDROJEN ENERJİSİNİN ÖNEMİ

Ülkemizde hidrojen araştırmaları 1900'lerin başında başlamıştır. Türkiye'de bilimsel araştırmaların artmasıyla 2003 yılından itibaren Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Kurulu Örgütü (UNIDO) ve Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojisi Merkezi'nde (ICHET) önemli bir rol üstlenmiş bulunmaktadır. Söz konusu araştırmalar Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından desteklenmektedir (Önder ve Şahin, 2021: 5).

Hidrojen araştırmaları, ülkemizde üniversiteler ve araştırma merkezlerinde kısıtlı bir şekilde yürütülmektedir. Örneğin, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) 1990'larda Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) hidrojen programlarıyla iş birliği yapmayı planlamış, ancak bu iş birliği 1996 yılında sona erdirilmiştir. Bu durum, hidrojen teknolojileri üzerine ulusal düzeyde daha kapsamlı ve sürekli araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir (Apak, Atay ve Tuncer, 2017: 2550). Bu alandaki bilgi birikimi ve teknolojik gelişmeler, enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyel taşırken, devlet destekli projeler ve uluslararası iş birlikleri ile bu eksikliğin giderilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Hidrojen enerjisi ile ilgili resmî belgelerdeki referanslar 2007 yılında olduğu görülmektedir. Ancak, enerji verimliliği çerçevesinde hidrojen enerjisine dair yönetmelikler ve bilgilendirici konferanslar, 2019-2020 yıllarında ülkemizde başlamış bulunmaktadır. 2022'deki "İklim Şurası" sonrası yayımlanan Orta Vadeli Program'da (OVP), Avrupa'daki önemli çalışmalara atıfta bulunularak Türkiye'nin 2053 hedefleri doğrultusunda "net sıfır karbon emisyonu" Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, yeşil teknoloji Ar-Ge projelerini desteklemeyi, net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda düşük karbonlu büyüme stratejisi geliştirmeyi ve iklim finansmanını özel sektörün ihtiyaçlarına göre düzenlemeyi ön görmüştür (Resmi Gazete, 2007: 9).

Ancak, bu hedefler Avrupa'ya kıyasla geç başlanmış ve yetersiz olarak değerlendirilebilir niteliktedir. Net sıfır karbon emisyonu hedefi için finansal çerçevelerin ve destek mekanizmalarının net bir şekilde belirlenmiş bir yol haritası eksikliği olduğu ifade edilerek, hidrojen üretimi için kullanılan enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması gerektiği, aksi takdirde endüstriyel dönüşümün sürdürülebilir olamayacağını söylemek mümkündür

(World Energy Council, 2021: 5). Kaynakların potansiyeli dikkate alınarak somut bir strateji oluşturulması gerekmektedir.

### **1.1. Türkiye’de Gerçekleştirilen Hidrojen Konulu Projeler**

Türkiye’nin 12. Kalkınma Planı’nda hidrojen ve hidrojen enerjisinin ulusal ve uluslararası projeler kapsamında desteklenmesine yönelik birçok politika ve tedbir geliştirilmiştir. Hidrojen enerjisine yapılan yatırımlar Türkiye açısından çeşitli avantajlar sunmaktadır. Araştırmalar, hidrojen enerjisinin enerjiye olan bağımlılığı %3 oranında azaltacağını öngörmektedir (Apak, Atay ve Tuncer, 2017: 2446-2452). Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında ve ulaştırma sektöründe önemli bir adım kaydedilmesini mümkün kılabilir niteliktedir.

Ülkemizde proje destekleri genellikle belirli kurumlar tarafından sağlanmaktadır. Enerji politikaları çerçevesinde, TÜBİTAK, Enerji Bakanlığı ve Üniversiteler tarafından yürütülen Bilimsel Araştırma projeleri (BAP) gibi kaynaklar bu konuda öne çıkmaktadır. Bu projeler, ilgili kuruluşlar tarafından finansal ve bilimsel desteklerle güçlendirilebilmektedir.

Avrupa Birliği (AB), uzun vadeli enerji planlarında hidrojenin enerji tüketimindeki payını 2050 yılı itibarıyla %13’e çıkarma hedefini belirlemiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023: 8). Bu hedef, Avrupa’nın enerji dönüşümünü desteklemeyi ve karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Türkiye’nin bu hedeflere uyum sağlaması için hidrojen enerjisi alanında net bir ulusal strateji geliştirmesi büyük önem taşımaktadır. Bu strateji, Türkiye’nin küresel ölçekte rekabetçi bir konum elde etmesini ve sürdürülebilir enerji çözümlerini desteklemesini sağlayacaktır.

Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojisi Merkezi (ICHET), hidrojen ve yakıt hücresi enerji teknolojilerini teşvik etmek amacıyla ülkemizde yapılan çeşitli projelere destek sağlamıştır. Bu projeler hem teknolojik gelişmeleri hem de bu teknolojilerin sosyal ve ekonomik uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini kapsayan; Gezici Hidrojen Evi, Yakıt Pilleri Yolcu Taşıma Aracı, Hidrojen Yakıt Pilleri Forklift’i, Yakıt Pilleri Hibrit Scooter, İDO Yakıt Pilleri Kesintisiz Güç Kaynağı projelerini geliştirmiştir (Önder ve Şahin, 2021: 5).

Ancak, ICHET, 2012 yılında Türkiye’de faaliyetlerine son vermiştir. Yine de bu projeler, hidrojen teknolojilerinin çeşitli uygulama alanlarında nasıl kullanılabileceğini ve bu teknolojilerin potansiyelini göstermek açısından önemli birer örnek teşkil etmektedir.

TEKSIS firması Yeşil Hidrojen Enerji Teknolojileri hakkında ürün ve oluşan sorunlara çözümler geliştirmeyi amaçlayan bir firma olarak ülkemizde yer almaktadır. 2021 yılı itibarıyla, dış kaynaklı olarak yürütülen AR-GE ve ÜR-GE projelerinin sayısı 15’e ulaşmıştır. Bu projeler, ODTÜ Teknokent Tasarım ve Mühendislik Ofisi, Yaşamkent Araştırma Test ve Üretim Teknoloji Binası ve İstanbul İrtibat Ofisi gibi önemli merkezlerde yürütülmektedir.

Bu projeler arasında, Enerjisa Üretim tarafından kurulan Yeşil Hidrojen Tesisinin kurulumu, Türkiye'nin hidrojen üretim kapasitesini artırmayı hedeflemektedir. TÜBİTAK'ın Anyon Değişim Membran Hidrojen Elektrolizörü Geliştirilmesi projesi, hidrojen elektrolizörlerinin verimliliğini ve performansını artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, ROKETSAN tarafından yürütülen uzay uygulamaları için yakıt hücresi geliştirilmesi projesi, uzay teknolojilerinde hidrojen kullanımını geliştirmeyi hedeflemektedir. KOSGEB destekli Elektrokimyasal Hidrojen Safılaştırıcı ve Basınçlandırıcı Geliştirilmesi projeleri ile hidrojenin saflaştırılması ve basınçlandırılması süreçlerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Alptekin, 2024). Bu projeler, hidrojen teknolojilerinde yenilikçi çözümler sunarak Türkiye'nin enerji bağımsızlığını ve enerjinin sürdürülebilirliğini artırmayı hedefler niteliktedir.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Araştırma Destek Programları (TÜBİTAK-ARDEB), 2015 yılında açılan Çağrı programı başlığı Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri Çağrı Programı başlığı altında açılmış olup, direkt olarak Hidrojen konusunu ele alabilecek Ar-Ge projelerini desteklemiştir. 1003 Çağrı koduyla ilişkilendirilen Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Hidrojen konusunun da öncelikli alanlar arasında yer alması, ülkemizdeki önde gelen araştırma kurumlarından TÜBİTAK tarafından da hidrojen enerjisinin önemi vurgulanarak duyurulmuştur. 2015 yılında diğer bir çağrı olan, TÜBİTAK ARDEB tarafından başlatılan Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri Çağrı Programı çerçevesinde, EN0201-Hidrojen Üretim, Dağıtım, Depolama ve Yakıt Olarak Kullanım Teknolojileri çağrısı açılmıştır. Bu çağrı, özellikle hidrojen kullanımına yönelik projeleri hedef almış ve 1003-Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Bu çerçevede, başvuru yapan projelerden dört tanesine destek verilmiştir (TÜBİTAK, Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri Çağrı Programı, 2015: 1-3).

Aynı zamanda TÜBİTAK, hidrojen konusundaki bilgi günleri ve çeşitli eğitim etkinlikleriyle çağrılar düzenlemektedir. Her yıl kasım ayında gerçekleştirilen Avrupa Hidrojen Haftası, Avrupa genelinde hidrojen ile hidrojen bazlı yakıtların üretim ve kullanımını değerlendirmeyi amaçlayan bilgi günleri ve farkındalık artırıcı etkinlikler sunmaktadır (TÜBİTAK, Küme 5, Hidrojen, 2021-2023).

Aynı zamanda, TÜBİTAK- Marmara Araştırma Merkezi (MAM) desteğiyle; Bozcaada Hidrojen Adası Projesi, Harissa'da İkmal İstasyonu, Hidrojen Turist Teknesi, İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri (İETT) projeleri Hidrojen Otobüsü ve Mobil Hidrojen İkmal İstasyonu gibi projeler de gerçekleştirilmiştir (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, 2023: 29).

Ufuk Avrupa Programı kapsamında hidrojen alanındaki çalışmaları takip etmek isteyen araştırmacılar için 2022 yılında Ulusal Koordinasyon Ofisi bir iletişim e-posta grubu oluşturmuştur. Bu grup, hidrojen konularında fikir alışverişi yapmak ve paydaşları güncel gelişmelerden haberdar etmek amacı taşımaktadır (TÜBİTAK, Küme 5, Hidrojen, 2021-2023).

2023 Yılında (Enterprise Europe Network) Sabancı Üniversitesi Avrupa İşletmeler Ağı ve TÜBİTAK iş birliğiyle “Temiz Havacılık Ortaklığı ve Hidrojen Enerjisi Bilgi Günü ve Proje Pazarı Etkinliği” düzenlenmiştir. Temiz hidrojen çağrısının kapsamı doğrultusunda düzenlenen etkinlikte, yenilenebilir hidrojen üretimi, hidrojen depolama ve dağıtım çözümleri üzerinde durulacak; ayrıca, enerji yoğun endüstriler ve havacılık gibi karbon salınımının azaltılması zor sektörlerde düşük karbonlu hidrojen kullanımının teşvik edilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım hem çevresel etkilerin minimize edilmesini hem de sürdürülebilir enerji geçişinin hızlandırılmasını amaçlamaktadır. Ayrıca hidrojen değer zincirini kapsayan projeler ve Avrupa genelinde hidrojen ekosistemlerini yaygınlaştırmak için “hidrojen vadileri” oluşturulmuştur. Bu bağlamda, Hidrojen bazlı ekonomiye geçişi hızlandırmak amacıyla, altı adet öncü proje desteklenmiştir. Bu projeler, yenilikçi hidrojen üretim tekniklerinden depolama ve dağıtım çözümlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsayarak, hidrojen ekonomisinin gelişimine önemli katkılarda bulunacaktır (TÜBİTAK, Temiz Havacılık Ortaklığı ve Hidrojen Enerjisi Bilgi Günü ve Proje Pazarı Etkinliği, 2023).

Tüm bu etkinliklerin ve proje desteklerinin yanında ülkemizin öncü kuruluşlarından biri olan, Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı (TENMAK) tarafından her yıl açılan Ar-Ge Teşvikleri Hidrojen Teknolojileri ve Yakıt Hücresi Çağrısı ile büyük ölçekli projelerle de destek verilmektedir (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, 2024).

2022 yılında Temiz Hidrojen Ortaklığı tarafından düzenlenen Bilgi Günü etkinliği, hidrojen teknolojilerinin gelişimine dair önemli bilgiler sunmuştur. 2023 yılında ise Avrupa Birliği, hidrojen vadilerinin yeniden güçlendirilmesi konusundaki ilerlemeyi değerlendirmek amacıyla bir anket ve kanıt çağrısı başlatmıştır. Kanıt çağrısı, belirli bir konu hakkında bilgi, veri veya kanıt toplamak için yapılan resmi bir talebi ifade eder ve bu bilgilerin karar verme, politika oluşturma veya araştırma süreçlerinde kullanılmasını sağlar. Kanıt çağrıları, çeşitli alanlarda, özellikle yasal, kamu politikası ve sağlık hizmetlerinde, güvenilir bilgi ve verilerin sağlanması için önemli bir araçtır (TÜBİTAK, Küme 5, Hidrojen, 2021-2023).

Hidrojen konusunda Türkiye’de önemli bir adım olan Ulusal Hidrojen Teknolojileri Derneği Türkiye’de hidrojen teknolojileri ve uygulamalarını teşvik etmek amacıyla kurulmuştur. İş birliklerinin güçlenmesi amacıyla 2015-2024 yılları arasında International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC), Global Conference on Global Warming (GCGW) ve World Hydrogen Energy Conference (WHEC) kongreleri düzenlenmiştir (Önder, 2021: 6).

BOREN tarafından işletilen Hidrojen Teknolojileri Laboratuvarı, 2018 yılında kuruldu. Laboratuvar, hidrojen enerjisinin çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını teşvik etmek için gereken teknolojik altyapıyı sağlama ve enerji verimliliğini artırma konularında çalışmalar yapmaktadır.

Bu hedef doğrultusunda, on altı üniversite ve kamu kurumu arasında bir iş birliği protokolü imzalanmıştır. Ayrıca, Zonguldak, Samsun, Sinop ve Giresun'da hidrojen üretim tesislerinin kurulumu için fizibilite çalışmaları sürdürülmektedir. Türkiye'de geliştirilen ve hidrojenle çalışan Bormobil adlı araç, BOREN ve TÜBİTAK'ın desteğiyle, hidrojen depolama amacıyla bor kullanan yerli bir otomobil olarak öne çıkmaktadır (Yalçın, 2020).

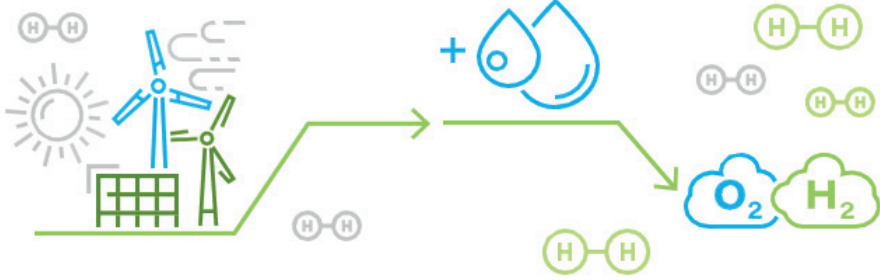
2021 yılında Enerji Bakanlığı'nın düzenlediği Enerjide Arama Buluşmaları çalıştayında, Türkiye'nin enerji altyapısında önemli bir yenilik olarak hidrojen enerjisinin dağıtım hatlarına entegrasyonu hedef olarak belirlenmiştir. Bu hedef, ülkenin enerji dönüşüm sürecinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Çalıştayda hidrojenin, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynakları arasında nasıl bir rol oynayabileceği tartışılmış ve bu doğrultuda stratejik hedefler oluşturulmuştur. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesi için, Hidrojen Teknolojileri Derneği tarafından Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na (EPDK) sunulan ilk Ar-Ge projesinin temelleri atılmıştır. Bu proje, hidrojen enerjisinin enerji şebekelerine entegrasyonunu sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesini amaçlamaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021: 1-6). Ayrıca, hidrojenin enerji sistemine dahil edilmesiyle birlikte, enerji güvenliğinin artırılması ve karbon salınımının azaltılması hedeflenmektedir.

Yıldız Teknik Üniversitesi'nin inceleme grubu ve Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği (GazBir) tarafından yürütülen projede, doğal gaz sistemlerinin performansını artırmak amacıyla temiz hidrojen enjeksiyonunun etkileri araştırılmıştır. İlk fazda, pak hidrojen enjeksiyonu kullanılarak doğal gaz sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik laboratuvar çalışmaları yapılmış ve bu süreçte, hidrojen ile doğal gazın çevre dostu bir şekilde işlenmesini sağlayacak hızla gelişen teknolojinin kavramsal tasarımı tamamlanmıştır. İkinci faz çalışmalarında ise, yenilenebilir enerji destekli hidrojen kullanılarak doğal gazın çevre dostu bir şekilde işlenmesini sağlayacak teknolojinin ilk deneysel kontrol grupları başarıyla oluşturulmuştur. Bu aşama, laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilen testlerle hidrojenin doğal gaz sistemlerine entegrasyonunun ne denli etkili olabileceğini göstermektedir. Projenin ilerleyen aşamalarında, elde edilen bulguların ve teknolojilerin daha geniş çapta uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yapılması planlanmaktadır (Dinçer ve Ezan, 2021). Bu gelişmeler, enerji sistemlerinin çevresel etkilerini azaltma ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceği sağlama konusundaki önemli adımlardandır.

Teknoloji sayesinde, yaklaşık %5 oranında hidrojen ve %95 oranında doğal gaz karıştırılmış ve elde edilen bu karışım, kontrol amaçlı olarak yakılmıştır. Bu süreç, hem hidrojenin doğal gaz sistemlerine entegrasyonunun sağlanmasını hem de yakıtın çevresel etkilerini azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu hızla gelişen ve değişen teknolojinin, doğal gaz sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulması ve sürdürülebilir enerji çözümleri arasında yerini alması

amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, teknolojinin etkinliğinin artırılması ve ticari ölçekli uygulamalarının yaygınlaştırılması da uzun vadeli hedefler arasında yer almaktadır (Türkiye Enerji Vakfı, 2020: 41).

Tüm bu projeler ve çalışmalar kapsamında, hidrojen enerjisinin küresel enerji sistemine entegrasyonunda mühim adımlar olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1). Hem ulusal hem de uluslararası düzeydeki bu projeler, temiz enerji geçişini hızlandırmayı ve karbon ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023: 74).



**Şekil 1.** Hidrojen Enerjisinin Dönüşümü  
(Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023: 9)

Gecikmelere ve eksikliklere rağmen, Türkiye’de hidrojen enerjisi konusunda gelişmeler yaşanmaktadır. Güney Marmara Kalkınma Ajansı’nın koordinatörlüğündeki AB katkılı hibe desteği almış “HY SouthMarmara Projesi”, Ufuk Avrupa Temiz Hidrojen Ortaklığı kapsamında desteklenmeye hak kazanmış ve 13 ortaklı bir projemiz bulunmaktadır. Yaklaşık otuzyediy milyon euro bütçesi olan ve beş yıl sürecek bu projede, Türkiye’nin ilk Yeşil Hidrojen Vadisi kurulacak olup, proje, Türkiye’nin 2053’te karbon-nötr ekonomiye ulaşmasında öncü bir rol oynayacak ve ülkenin hidrojen ve türevlerinin Avrupa’ya ihracatında önemli bir merkez olma potansiyeline sahip olması öngörülmektedir (HYSouthMarmara, 2024).

Güney Marmara Bölgesi, Türkiye’nin toplam elektrik üretiminin yüzde 13’ünü sağlayarak lider konumda bulunmaktadır. Bu proje kapsamında Balıkesir’de yeşil hidrojen üretilebilmesiyle çeşitli sanayi tesislerinde kullanılacaktır. Ayrıca, sıvı ve katı hidrojen türevlerinin üretimi ve Türkiye’nin ithalata bağımlı olduğu metanol ve amonyak gibi hidrojen türevlerinin yerli yöntemlerle üretilmesi hedeflenmektedir. Türkiye’nin bor rezervlerinin kullanımıyla Sodyum Bor Hidrür Tesisi kurulacak ve hidrojen ekonomisinde önemli bir yer tutacaktır. (Alptekin, 2024)

Birleşmiş Milletler’in (UNIDO) desteğiyle yürütülen Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (ICHET) projesi çerçevesinde, 1996 yılında İstanbul’da Hidrojen Enstitüsü kurulmuştur. Bu önemli adım, 20-22 Kasım 1996 tarihlerinde Viyana’da gerçekleştirilen 16. UNIDO Endüstriyel Kalkınma Kurulu Toplantısı’nda alınan kararla hayata geçmiştir (Apak, Atay ve Tuncer,

2017: 2446-2452). Bu toplantıda, UNIDO iş birliğiyle Türkiye’de bir ICHET merkezi kurulması kararlaştırılmış ve bu merkez, UNIDO ‘nun hukuksal çerçevesinde özerk bir kurum olarak İstanbul’da faaliyete geçmiştir.

ICHET’ in kuruluş amacı, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında hidrojen teknolojileri konusunda bir köprü oluşturarak, bu alandaki bilimsel ve teknolojik ilerlemeleri desteklemektir. Merkez, hidrojen enerjisinin potansiyelini araştırmak, yeni teknolojiler geliştirmek ve uygulamalı Ar-Ge projeleri yürütmek amacıyla kurulmuştur (Önder & Şahin, 2021, s. 5). Ayrıca, ICHET, hidrojen enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için uluslararası iş birliklerini teşvik ederek, global enerji dönüşümüne katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Ulusal çağrı programları kapsamında çeşitli destekler ve teşvikler sunulmaktadır. TÜBİTAK tarafından sağlanan destekler arasında TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü ve Ulusal Hidrojen Teknolojileri Platformu gibi önemli yapılar yer almaktadır. Ayrıca, İstanbul Enerji A.Ş. tarafından yürütülen projeler, yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimi ve kullanımına, Yenilenebilir Enerji ve Çevre Teknolojileri Kümelenmesi ile, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yürütülen Hidrojen Teknolojileri Teşvik ve Destek Programları da bu alandaki yenilikçi çözümleri desteklemek amacıyla faaliyet göstermektedir. Bu tür programlar, hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için önemli fırsatlar sunmaktadır.

## 2. ULUSLARARASI HİDROJEN KONULU PROJELER

İlk yakıt hücresi, 1839 yılında Sir William Grove tarafından tasarlanmıştır. Grove, seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşan bir sistem kullanarak hidrojen ve oksijenin reaksiyonunu başarıyla gerçekleştirmiştir (Temelci, 2000). Bu deneysel sistem, enerji üretimi için kimyasal reaksiyonların kullanılabilirliğini gösteren ilk örneklerden biri olarak kabul edilmiştir ve modern yakıt hücrelerinin temelini atmıştır.

Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt hücresindeki her bir bileşenin, hücrenin genel performansındaki görevini ve etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. William W. Jacques ise eriyik elektrolitli yakıt pillerinin temelini atmış ve bu alandaki önemli ilerlemeleri ile 1900 yılında Emil Baur, bilim adamı Walther Nernst ‘in başlattığı katı oksit elektrolitli yakıt hücresi projesinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Bu projenin önemini kavrayan Pratt & Whitney şirketi, teknolojiyi lisanslayarak NASA’da kullanılmasını mümkün kılmıştır. 1950’li yıllarda uzay yarışının etkisiyle yakıt pillerine olan ilgi artmış, 1958 yılında NASA, hidrojen-oksijen yakıt pillerini uzay çalışmalarında kullanmaya başlamıştır (Çetinkaya & Karaosmanoğlu, 2003: 18).

2022 yılında Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan “REPowerEU” Planı, fosil yakıt tüketimini azaltmayı ve 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretimini hedeflemektedir. Plan çerçevesinde, 2030 yılına

kadar kurulu elektrolizör kapasitesinin 65-80 GW seviyelerine çıkarılması öngörülmektedir. Bu hedefler, Avrupa'nın enerji bağımsızlığını artırmayı ve temiz enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu projeler ve stratejik hedefler, hidrojen enerjisinin gelecekteki rolünü ve uluslararası enerji piyasalarındaki etkisini anlamak için kritik öneme sahiptir. Türkiye'nin bu global trendleri takip ederek, enerji stratejilerini bu doğrultuda şekillendirmesi gerekmektedir. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023). Tüm bu hedefler doğrultusunda hidrojen konusunda uluslararası iş birliklerine öncülük edilerek konusunda uzman araştırmacılar tarafından ön görülen projeler desteklenmiştir.

İklim hedeflerine ulaşmanın tek başına mümkün olmadığı, küresel iş birliğini gerektirdiği büyük önem taşımaktadır. Almanya, özellikle enerji yoğun sektörlerde hidrojen enerjisi teknolojilerini kullanarak yenilenebilir enerjileri yaygınlaştırmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, Almanya'nın Namibya ile yaptığı anlaşma yapmış ve büyük ölçekli yatırımlar ve hidrojen enerjisinin iki ülke arasında transferi üzerine kurulmuştur. Almanya ve Namibya arasındaki bu proje, Namibya'nın artan enerji ihtiyacını karşılamayı, bölgesel ekonomik gelişimi desteklemeyi ve işsizliği azaltmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, hidrojen enerjisinin Almanya'ya aktarılması ve fazlasının amonyak olarak sıvılaştırılması ile Namibya'nın güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli bu projeyi enerji açısından önemli hale getirmektedir (Creamer, 2024).

Almanya, Norveç ile 2030'a kadar kurulacak bir enerji ağı ve botu hattı ile hidrojen enerjisi iş birliği yapmayı planlamaktadır. Norveç'in hidrolik enerji kaynakları bu iş birliğinin temelini oluşturarak, Kanada ile 2022'de imzalanan "Enerji İttifakı" çerçevesinde, 2025'ten itibaren Kanada'nın rüzgâr enerjisi potansiyelinden elde edilecek hidrojenin Almanya'ya ihraç edilmesi planlanmaktadır. Tüm bu projeler kapsamında, enerji kaynaklarını çeşitlendirme stratejisi uluslararası düzeyde başarılı olacaktır (Bloomberg, 2024).

Türkiye ve Almanya, özellikle hidrojen üretim ve teknolojileri konusunda ortak projeler ve yatırımlar gerçekleştirmektedir. Bu projeler arasında, Bosch ve Arçelik İş birliği 2022 yılında Türkiye ve Almanya arasında yapılan hidrojen teknolojileri üzerine ortak projelerdendir (Bosch, 2022).

2014 yılında, Japonya ve Almanya, hidrojen teknolojileri Fukushima Hidrojen Projesi ile başlayarak 2015 yılında H2 Mobility ile devam etmektedir (Hygear, 2024). Almanya'nın hidrojen teknolojisi geliştirme konusundaki tecrübesi ve Japonya'nın yakıt hücresi teknolojileri üzerine uzmanlaşması, iki ülke arasında bilgi ve teknoloji transferini teşvik etmektedir.

ABD ve Güney Kore ikili iş birliği 2020 yılında Hyundai ve General Motors İş birliği ile başlamış bulunmaktadır. ABD'nin teknoloji geliştirme konusundaki gücü ile Güney Kore'nin hızlı uygulama kapasitesi birleştirilerek, hidrojen ekonomisini geliştirme hedeflenmektedir (Geniş Üretim Kapasitesi Hyundai, 2024).

Çin ve Fransa, hidrojen teknolojilerinde ortak projeler ve yatırım fırsatları yaratmaktadır. CNPC ve Air Liquide projesi ile 2019 yılında Fransa'nın temiz enerji stratejileri ve Çin'in büyük ölçekli enerji projeleri, iki ülkenin hidrojen alanındaki iş birliğini desteklemektedir (Sürdürülebilirlik Raporu, 2022: 18).

Japonya ve Avusturalya arasında 2020 yılında başlayan bir konsorsiyum oluşturulmuş ve hidrojen üretimi ve ticareti konusunda lider konumda bulunan Japonya ile tedarik zinciri üzerine iş birliği kurulmuştur (Japonya Ülke Raporu, 2020).

İkili iş birlikleri, hidrojen enerjisinin global olarak benimsenmesini ve geliştirilmesini hızlandırmayı amaçlamaktadır. Ülkeler arasındaki bu tür iş birlikleri, teknoloji transferi, yatırım ve stratejik ortaklıklarla hidrojen ekonomisinin gelişimine de büyük ölçüde katkı sağlamaktadır.

Özbekistan'da ise ACWA Power tarafından yürütülen Yeşil Hidrojen Projesi, iki aşamada geliştirilecektir. İlk aşamada, 3.000 ton kapasiteli bir yeşil amonyak pilot projesi hali hazırda devam etmektedir. İkinci aşama tamamlandığında ise, 2,4 GW rüzgâr enerjisi kapasitesi ile yıllık 500.000 ton yeşil amonyak üretimi gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu projeye, Özbekistan'ın yenilenebilir enerji kaynaklarından nasıl yararlandığı ve yeşil hidrojen üretiminde nasıl bir ilerleme kaydetmiş bulunmaktadır (Energy Transition Takes Ambition, 2023, s. 2).Yapılan projeler ülkelerin yeşil hidrojen üretimindeki stratejik vizyonlarını ve küresel enerji geçişindeki rollerini ortaya koymaktadır (İş Zirvesi, 2024).

Gelişmekte olan ülkelerin iklim-nötr enerjiye erişimi, yerel halkın fosil yakıt bağımlılığını azaltabilir ve göç sorununu hafifletebilir bir nitelik taşımaktadır (Alptekin, 2024). Bu bağlamda, enerji erişimi ve yerel ekonomik çevrimin güçlenmesi hem ilgili ülkeler hem de küresel düzeyde önemli bir öneme sahiptir.

### **3. ULUSAL VE ULUSLARARASI ÇAĞRI PROGRAMLARI**

Türkiye, 2021 yılında açıklanan Ulusal Hidrojen Stratejisi ile hidrojen enerjisinin teşvik edilmesini ve bu alanda yapılan yatırımların artırılmasını hedeflemektedir (World Energy Council, 2021: 3). Bu strateji, hidrojen üretimi, taşınması ve kullanımıyla ilgili projelere kapsamlı destek sağlamayı amaçlamaktadır. Türkiye'nin hidrojen enerjisi konusundaki destek ve fonlama programları, devlet politikaları ve stratejik hedefler doğrultusunda çeşitli mekanizmalarla güçlendirilmektedir.

Uluslararası projeler açısından, Türkiye'nin hidrojen enerjisiyle ilgili girişimleri genellikle Avrupa Birliği fonları, Horizon Europe programları ve çeşitli konsorsiyum projeleri aracılığıyla desteklenmektedir. Bu uluslararası fonlar, Türkiye'nin global enerji projelerine entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve uluslararası iş birliklerini teşvik etmektedir. Ayrıca, ulusal düzeyde, hidrojen enerjisiyle ilgili özel çağrılar ve destek programları da bulunmaktadır. Bu

programlar, yerel projelerin finansmanını sağlamakta ve Türkiye'nin hidrojen enerjisi pazarındaki rolünü güçlendirmeyi hedeflemektedir.

Türkiye'nin stratejik hedefleri doğrultusunda, hidrojen enerjisi sektörü hızla gelişmekte ve çeşitli fonlama ve destek mekanizmaları aracılığıyla uluslararası ve ulusal projeler desteklenmektedir. Bu çabalar, ülkenin enerji geçişi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Türkiye, hidrojen enerjisi alanında geniş bir destek ve fonlama yelpazesi sunarak bu sektördeki gelişmeleri teşvik etmektedir. TÜBİTAK'ın 1003 – Öncelikli Alanlar Ar-Ge Destek Programı, hidrojen enerjisi dahil öncelikli alanlarda yapılan araştırma ve geliştirme projelerine finansal destek sağlamaktadır. Ayrıca, 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı, genel araştırma projelerine destek sunarak hidrojen projelerini de kapsayabilmektedir (TÜBİTAK, 2023). Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yatırım teşvikleri, enerji sektörü ve özellikle hidrojen projelerine yönelik destekler sunarken, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, yenilenebilir enerji ve hidrojen teknolojileri için enerji verimliliği destekleri sağlamaktadır. KOSGEB'in Ar-Ge, İnovasyon ve Endüstriyel Uygulama Destek Programı ise hidrojen enerjisiyle ilgili Ar-Ge projelerine destek verme imkânı sunmaktadır (KOSGEB, 2023). Ayrıca, İstanbul Kalkınma Ajansı ve diğer bölgesel kalkınma ajansları, enerji ve teknoloji projeleri için çeşitli fonlama ve destek programları yürütmektedir. Türkiye'nin enerji ve tabii kaynaklar bakanlığının yürütücüsü olduğu projeler ve ulusal ile uluslararası iş birlikleri, hidrojen enerjisi araştırma ve geliştirme fırsatlarını destekleyerek sektördeki yenilikçi gelişmeleri teşvik etmektedir.

Diğer bir taraftan, Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK), enerji sektöründe yenilikçi çözümleri teşvik etmek amacıyla Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı'nı yürütmektedir. Bu program, Ar-Ge Teşvikleri aracılığıyla Enerjide Dijitalleşme, Hidrojen Teknolojileri ve Yakıt Hücreleri ve Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojileri gibi çeşitli çağrılar sunmaktadır. TENMAK'ın destekleri, teknolojik yeniliklerin geliştirilmesive uygulama aşamasında sistematik bir yol haritası oluşturulmasını amaçlamakta ve ulusal ile uluslararası rekabeti artırmaktadır (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, 2024). Bu teşvikler, Türkiye'nin enerji sektöründe uluslararası düzeyde güçlü bir oyuncu olmasına katkı sağlamakta, yenilikçi teknolojilerin piyasaya sunulmasını desteklemektedir.

2022 yılında uluslararası çağrılar arasında Horizon Europe – the Framework Programme for Research and Innovation (2021/2027) programı açılmıştır. Türkiye, bu çağrı kapsamında ortak arayışı için proje eğitimi düzenlemiştir ve hidrojen temasıyla ilgili otuz üç başlık altında fırsatlar sunulmuştur (Ufuk Avrupa, 2022). Ayrıca, GIG (Global Innovation Grant) gibi uluslararası fonlama fırsatları da mevcuttur; bu program, Türkiye'nin uluslararası projelere katılımını destekleyerek hidrojen projelerine finansal destek sağlanmasına olanak tanır.

Avrupa Komisyonu'na proje başvuruları, "Funding and Tenders" portalı üzerinden yapılır. Başvuruların yapılabilmesi için portalda üye olunmalı ve bir PIC numarası alınmalıdır. Başvuru belgeleri Avrupa Komisyonu'nun web sitesinden erişilebilir (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2022). Konsorsiyum başvurularında, Başvuru Dokümanı yalnızca koordinatör tarafından doldurulmalıdır.

Bu çeşitli destek mekanizmaları, Türkiye'nin hidrojen enerjisi alanındaki vizyonunu güçlendirerek sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunmaktadır. Avrupa ve uluslararası fonlama programları, devlet destekleri ve yerel teşvikler, hidrojen teknolojilerinin ilerlemesini destekleyerek Türkiye'yi küresel enerji dönüşümünde öncü bir rol oynamaya hazırlamaktadır. Türkiye'de hidrojen enerjisiyle ilgili destekler, hükümet politikaları, ekonomik koşullar ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda düzenli olarak güncellenmekte ve sektörel ihtiyaçlara yönelik stratejik adımlar atılmaktadır. Bu dinamik yaklaşım, ülkenin enerji altyapısının modernleşmesini ve sürdürülebilir enerji hedeflerinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Avrupa'ya bakıldığında, Horizon Europe programı, hidrojen ve diğer araştırma projelerini desteklerken; Clean Hydrogen Partnership ve FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) temiz hidrojen teknolojileri için fonlama sunmaktadır. Almanya, National Hydrogen Strategy ile hidrojen projelerine devlet destekleri sağlarken, H2Global uluslararası fonlama fırsatları sunar. Fransa'nın France Relance Plan ve ADEME ajansı, hidrojen projelerini ekonomik toparlanma planı ve çevre yönetimi çerçevesinde destekler. İngiltere'de, Hydrogen for Transport Program ulaşım sektöründe hidrojen kullanımını teşvik ederken, UKRI (UK Research and Innovation) hidrojen teknolojileri projelerine fon sağlar. ABD'de, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO) ve DOE (Department of Energy) Funding Opportunities hidrojen ve yakıt hücreleri teknolojilerine destek sunar. Japonya, Japan's Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells ve NEDO ile fonlama sağlar. Güney Kore'nin K-H2 Project ve Korean Hydrogen Economy Roadmap programları hidrojen projelerini desteklerken, Çin'in China Hydrogen Strategy ve National Key R&D Program çeşitli fonlama ve destek programları sunar. Bu programlar, hidrojen enerjisi projelerinin gelişimini uluslararası düzeyde destekleyerek teknolojik ilerlemeyi teşvik etmektedir.

## **SONUÇ VE ÖNERİLER**

Hidrojen yakıldığında veya yakıt hücresinde kullanıldığında su buharı dışında emisyon üretmez. Bu, karbon emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, enerji depolama kapasitesine sahiptir ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr) dalgalı üretimlerini dengelemek için kullanılabilir. Fazla elektrik, suyun elektroliziyle hidrojene dönüştürülerek depolanabilir

ve gerektiğinde tekrar elektrik üretilebilir. Çelik üretimi, kimya endüstrisi ve rafinaj gibi çeşitli endüstriyel süreçlerde hidrojen yararlanılmaktadır. Bu sektörlerde fosil yakıtların yerine temiz bir alternatif sunarak Hidrojen yakıt hücreli araçlar karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir potansiyele sahiptir. Bu araçlar, fosil yakıtlı araçlara göre daha temiz ve sessizdir. Bu sebeplerden dolayı Hidrojen enerjisini çevre dostu olarak nitelendirebilmemiz mümkündür. Ayrıca, Hidrojen enerjisi kullanılarak desteklenen projeler sayesinde ülkelerin enerji ithalat bağımlılığını azaltabilir. Özellikle, güneş ve rüzgâr gibi yerel yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen, enerji güvenliğini artırarak; elektrik, ısıtma, ulaşım ve sanayi gibi farklı enerji tüketim sektörlerini birbirine bağlama potansiyeline sahip bir enerji kaynağıdır. Ancak hidrojenin geniş ölçekli kullanımı bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Üretim maliyetleri, depolama ve taşıma zorlukları ve altyapı gereksinimleri gibi faktörler bu zorluklar arasındadır. Bu nedenle, hidrojen ekonomisine geçişin gerçekleştirilmesi için teknolojik ilerlemeler ve politik destekler gerekmektedir.

Hidrojen enerjisinin gelecekteki rolü enerji dönüşümünde kritik bir bileşen olarak görülmektedir. Hidrojenin, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr) entegrasyonunda kilit bir rol oynaması beklenmektedir. Yenilenebilir kaynakların üretim dalgalanmalarını dengelemek için hidrojen, fazla elektriğin depolanması ve gerektiğinde tekrar kullanılması için ağır sanayi yüksek karbon emisyonuna sahip sektörlerde temiz bir alternatif sunabilmektedir. Fosil yakıtların yerini alarak karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olabilecek bir kaynak niteliğindedir. Hidrojen yakıt hücreli araçlar, özellikle ağır yük taşıma, uzun mesafe taşımacılığı ve denizcilik gibi zorlu uygulamalarda yaygınlaşacaktır. Elektrikli araçların menzil ve şarj süresi sınırlamalarını aşmak için hidrojen önemli bir alternatif olması beklenmektedir. Uzun vadeli enerji depolama ve enerji taşımacılığı için bir çözüm sunmaktadır. Özellikle elektrik şebekelerinin yük dengelemesi ve enerji ihracatı için kullanılacak, yakın gelecekte trafikte karşımıza çıkması beklenen tam sürücüsüz araçların yerini almasıyla birlikte temiz çevre temiz bir gelecek için hidrojen enerjisi büyük bir önem taşımaktadır.

Evlerimizde halihazırda kullanmış olduğumuz doğalgazın yerini alarak ısıtma ve enerji üretimi gibi uygulamalarda karbonsuzlaştırma sürecine katkı sağlayarak karbon emisyonlarını azaltabilecektir. *12.kalkınma planı hedeflerinde de yer alan* elektroliz yoluyla yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen yeşil hidrojen, hidrojen üretiminin çevresel etkilerini minimize edebilecek niteliktedir.

Küresel hükümetlerin ve büyük endüstriyel aktörlerin hidrojen stratejilerini benimsemesi, hidrojen teknolojilerinin gelişimini hızlandıracaktır. Altyapı yatırımları, araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile teşvik mekanizmaları bu gelişimi destekleyecektir. Yakın gelecekte hidrojen enerjisinin başarılı bir şekilde benimsenmesi, teknolojik ilerlemelere, maliyetlerin düşmesine

ve uluslararası iş birliğine bağlıdır. Bu süreç, enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir ve karbonsuz hale gelmesine büyük katkı sağlayacaktır.

Küresel enerji dönüşümünü destekleme, iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte büyük bir rol oynamaktadır. Bu çabalar, Karbon Emisyonlarını Azaltma, Enerji Güvenliği, Ekonomik Fırsatlar, Altyapı ve Teknoloji Gelişimi Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ve İklim Değişikliği ile Mücadele gibi konularda kritik öneme sahiptir.

Kısaca, ulusal ve uluslararası hidrojen enerjisi çabaları, sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir geleceğe geçişi hızlandırmak için kritik öneme sahiptir. Bu çabalar enerji güvenliğini artırır, ekonomik fırsatlar yaratır, yenilikçi teknolojilerin gelişimini destekler ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkin çözümler sunabilmektedir.

Bu yüzden Hidrojen teknolojilerinde yeniliklerin hızlandırılması için daha fazla araştırma ve geliştirme yatırımı yapılmalıdır. Hem kamu hem de özel sektör bu alana daha fazla kaynak ayırmalıdır. Hidrojen üretim, depolama ve dağıtım maliyetlerinin düşürülmesi için ekonomik ölçekli üretim yöntemleri ve daha verimli teknolojiler geliştirilmelidir. Bunun için hidrojen üretim tesisleri, depolama ve dağıtım ağları gibi altyapı yatırımları teşvik edilmeli ve uzun vadeli politikalar geliştirilmelidir. Hidrojen teknolojisinin yaygınlaşmasının sağlanabilmesi için iş birlikleri ve konsorsiyumlar oluşturularak bilgi paylaşımlarına teşvik edilmelidir. Kamuoyunu bilinçlendirebilmek ve bu enerji kaynağının niteliğinin anlaşılabilirliği için eğitim programları ve alanında uzman kişi/kurumlardan farkındalık kampanyaları düzenlenmesi sağlanmalıdır.

Yakın gelecekte, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretiminin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmak için yeni teknolojiler araştırılmalıdır. Daha verimli elektrolizörler ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynakları bu alanda kritik öneme sahiptir. Hidrojenin güvenli, ekonomik ve etkili bir şekilde depolanması için yeni yöntemler ve malzemeler geliştirilmelidir. Bu alandaki araştırmalar, hidrojenin yaygın kullanımını kolaylaştıracaktır. Yakıt hücrelerinin performansını ve ömrünü artırmak, maliyetlerini düşürmek ve geniş çapta uygulanabilirliğini sağlamak için ileri malzemeler ve yeni tasarımlar üzerine çalışılmalıdır. Hem hidrojen üretiminde hem de yakıt hücrelerinde kullanılan katalizörlerin daha verimli ve ucuz hale getirilmesi için araştırmalar yapılmalıdır. Özellikle platin gibi pahalı metallerin yerine geçecek alternatifler bulunmalıdır. Hidrojenin ekonomik ve çevresel faydalarını maksimize edecek modeller ve senaryolar üzerinde çalışılmalıdır. Bu, yatırım kararlarını ve politika oluşturma süreçlerini destekleyecektir. Hidrojenin diğer enerji sistemleriyle entegrasyonunu sağlamak için hidrojen ve batarya teknolojilerinin birleşik kullanımı gibi hibrit enerji sistemleri üzerine araştırmalar yapılmalıdır. Mavi hidrojen üretiminde karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, fosil yakıtlardan hidrojen üretimini daha sürdürülebilir hale getirebilir. Hidrojen üretimi,

depolanması, taşınması ve kullanımı için güvenlik standartları ve düzenleyici çerçeveler geliştirilmelidir. Bu, teknolojinin güvenli ve yaygın bir şekilde benimsenmesini sağlar.

Bu öneriler ve araştırma alanları hidrojen enerjisinin potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirmeye yönelik kritik adımlardır. Bu adımlar, sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir enerji geleceğine geçişte hidrojenin merkezi bir rol oynamasını sağlayacaktır.

*“We tend to overestimate the effect of a technology in the short run and underestimate the effect in the long run”*

**Roy Amara**

## **KAYNAKÇA**

- Alptekin, Z. (2024). Hidrojen Enerjisi ve Küresel İşbirlikleri. Son Erişim Tarihi: 28.07.2024  
<https://www.perspektif.online/hidrojen-enerjisi-ve-kuresel-isbirlikleri/>
- Apak, S., Atay, E., ve Tuncer, G. (2017). Renewable hydrogen energy and energy efficiency in Turkey in the 21st century. *Hydrogen Energy*, 2446-2452.
- Bloomberg. (2024). Almanya ve Norveç'ten yeşil enerji için iş birliği. Son Erişim Tarihi: 08.06.2024 tarihinde <https://www.bloomberght.com/almanya-ve-norvec-ten-yesil-enerji-icin-is-birligi-2322712>
- Bosch. (2022). Bosch'tan hidrojen atağı: İklim Nötr Fabrikalar ve Sıfır Karbon Trafığı için Teknoloji. Son Erişim Tarihi: 08.02.2024 <https://www.bosch.com.tr/kesfet/2022/2022-05-25-boschtan-hidrojen-atagi-iklim-noetr-fabrikalar-ve-sifir-karbon-trafigi-icin-teknoloji/>
- Creamer, M. (2024). Creamer Media's. \$10-billion Namibian green hydrogen project receives major German boost Son Erişim Tarihi: 08.12.2024 <https://www.miningweekly.com/article/10-billion-namibian-green-hydrogen-project-receives-major-german-boost-2024-03-22>
- Çetinkaya, M., ve Karaosmanoğlu, F. (2003). Yakıt Pilleri, Tesisat Mühendisliği. (75), 18-33.
- Dinçer, P. D., & Ezan, D. D. (2021). Türkiye Bilimler Akademisi. Doğal Gaz Raporu. *Energy Transition Takes Ambition. Integrated Annual Report*.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.(2023). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası.
- Funda ÖNDER, R. Z. (2021). Türkiye'de Hidrojen Enerjisi ve Geleceği. Son Erişim Tarihi: 31.12.2024, [chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/2072/efis\\_funda\\_v8\\_finalversion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/2072/efis_funda_v8_finalversion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Geniş Üretim Kapasitesi Hyundai. Son Erişim Tarihi: 24.12.2024 <https://www.hyundai.com/tr/tr/hakimizda/neden-hyundai/hep-daha-iyiye>
- Hidrojen Teknolojileri Derneği. (2022). AB'nin yeşil hidrojen ihtiyacını karşılamada avantajlı durumda Türkiye,. Son Erişim Tarihi: 28.07.2024 <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/turkiye-hidrojen-haberleri/>
- Hygear. (2024). Cost-effective steam methane reforming. Son Erişim Tarihi: 08.02.2024 [https://hygear.com/gases/hydrogen/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=14870107912&utm\\_adgroup=131587411321&gad\\_source=1&gclid=EAlaIQobChMI4rvN9vbVhwMVj3pBAh3HKhcuaEAYASAAEgLnFd\\_BwE](https://hygear.com/gases/hydrogen/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=14870107912&utm_adgroup=131587411321&gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMI4rvN9vbVhwMVj3pBAh3HKhcuaEAYASAAEgLnFd_BwE)
- HYSouthMarmara. (2024). Türkiye'nin İlk Hidrojen Vadisi Projesi . Son Erişim Tarihi: 26.09.2024 Güney Marmara Kalkınma Ajansı: <https://www.gmka.gov.tr/haber/turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-projesi-guney-marmara-hidrojen-kiyisi-hysouthmarmara-projesinin-ilk-calistayi-gerceklesti>
- İş Zirvesi. (2024). Orta Asya ve Haza'e'da Hidrojen. Son Erişim Tarihi:08.12.2024
- Japonya Ülke Raporu. (2020). T.C. Ticaret Bakanlığı Dış Temsilcilikler ve Uluslararası [https://globuc.com/hydrogen-central-asia/projects/?gad\\_source=1&gclid=EAlaIQobChMIhLWogYvvhwMVEzMIBR3lxQgJEAAYASAAEgLgkvD\\_BwE](https://globuc.com/hydrogen-central-asia/projects/?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMIhLWogYvvhwMVEzMIBR3lxQgJEAAYASAAEgLgkvD_BwE)
- KOSGEB (2023). Küçük ve Orta Ölçekli Sanayi Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı Destekler: <https://www.kosgeb.gov.tr/>
- Külekçi, Ö. C. (2009). Yenilenebilir enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 1(2). Ankara.
- Önder, F., & Şahin, R. Z. (2021). Türkiye'de Hidrojen Enerjisi Ve Geleceği. 5. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu. (9-11 Temmuz 2021)
- Publications Office of the European Union (2016). Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Hydrogen roadmap Europe – A sustainable pathway for the European energy transition, Publications Office,. <https://data.europa.eu/doi/10.2843/341510>
- Resmi Gazete. (2007). Enerji Verimliliği Kanunu.
- Sürdürülebilirlik Raporu (2022). CNPC ve Air Liquide Resmi Raporları: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/2023-03/air-liquide-sustainability-report-2022.pdf>
- Şenaktaş, B. (2005). Hidrojen Enerjisi, Üretimi Ve Uygulamaları. Denizli, Türkiye: Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi- Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2021). Faaliyet Raporu. 169. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet\_Raporlari/2021/ETKB2021FR.pdf
- Temelci, F. (2000). Taşıtlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, 45-47.
- Tutar, F., ve Eren, M. F. (2011). Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi Ve Türkiye. International Journal of Economics and Administrative Studies, Dergipark(6), 3, 5.
- doi:ISSN 1307-9832
- TÜBİTAK. (2015). Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri Çağrı Programı. “EN0201 - Hidrojen Üretim, Dağıtım, Depolama ve Yakıt Olarak Kullanım Teknolojileri. Son Erişim Tarihi: 28.11.2024 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/en0201\_cagri\_metni\_2015\_1.pdf
- TÜBİTAK. (2021-2023). Küme 5, Hidrojen. Son Erişim Tarihi: 02.08.2024 <https://ufukavrupa.org.tr/tr/hidrojen>
- TÜBİTAK. (2023). Ulusal Programlar: <https://tubitak.gov.tr/tr/destekler/akademik/ulusal-destek-programlari>
- TÜBİTAK. (2023). Temiz Havacılık Ortaklığı ve Hidrojen Enerjisi Bilgi Günü ve Proje Pazarı Etkinliği. Clean Aviation Joint Undertaking. İstanbul. Son Erişim Tarihi: 02.08.2024 <https://ufukavrupa.org.tr/tr/haberler/temiz-havacilik-ortakligi-ve-hidrojen-enerjisi-bilgi-gunu-ve-proje-pazari-etkinligi>
- Türkiye Enerji Vakfı, T. (2020). Türkiye'nin Hidrojen Çalışmaları. Enerji Panorama Dergisi(41).
- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu. (2024). Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı. Açık Çağrılar. Son Erişim Tarihi: 02.08.2024 <https://www.tenmak.gov.tr/destekler.html>
- Türkiye Sınai Kalkınma Bankası. (2023). Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu Güncellemesi. Enerji Çalışma Grubu .
- Ufuk Avrupa. (2022). European Commission. Son Erişim Tarihi: 16.08.2024 [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizoneurope\\_en#:~:text=Horizon%20Europe%20is%20the%20EU's,2027%20is%20EUR%2093.5%20billion.](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizoneurope_en#:~:text=Horizon%20Europe%20is%20the%20EU's,2027%20is%20EUR%2093.5%20billion.)
- World Energy Council. (2021). Dünya Enerji Konseyi Türkiye. Turkey: “Global Hydrogen Review 2021”, IEA.
- Yalçın, D. (2020). Hydrogen law and regulation in Turkey. CMS Expert Guide to hydrogen law and regulation.

# GELECEĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİSİ HİDROJEN VE HİDROJEN EKONOMİSİ

---

**Serap DUMAN**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0002-6243-9970

**Rüştü UÇAN**

Dr. Öğr. Üyesi, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği  
Bölümü, İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-2389-8231

---

## GİRİŞ

Yakıt hücresi teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, doğal gaz, metanol, etanol ve hidrojen gibi alternatif enerji kaynaklarının kullanımını mümkün kılmıştır. Özellikle hidrojenin, yanma sonucu yalnızca su üretmesi, onu diğer enerji kaynaklarına göre çok daha avantajlı bir konuma getirmektedir. Bu nedenle, tüm ulaşım türlerinde hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi fikriyle “hidrojen ekonomisi” terimi 1970 yılında General Motors mühendisleri tarafından ortaya atılmıştır (Ramirez ve Martinez, 2004). Hidrojen enerjisi ve hidrojen ekonomisi ile ilgili ilk uluslararası konferans 1974 yılında gerçekleştirilmiş ve aynı yıl Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği (IAHE) kurulmuştur (Bockris vd., 2001). IAHE, hidrojen enerjisi topluluğuna bir platform sunmak amacıyla Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansları’nı (WHEC) düzenlemiştir. 1970’ten önce neredeyse bilinmeyen “hidrojen enerjisi”, “hidrojen ekonomisi” ve “hidrojen enerji sistemleri” terimleri, yapılan çalışmalar sonucu artık geniş kitleler tarafından tanınmaktadır (Momirlan ve Veziroğlu, 2002). Hidrojen ekonomisi, enerjimizin büyük bir kısmının çevreye zarar vermeyen ve sera gazı salınımına yol açmayan, tamamen yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklardan üretilen hidrojen ile karşılandığı bir gelecek vizyonunu tasvir etmektedir. Gelecekte, güneş, rüzgar ve su gibi yeşil enerji

kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen; enerji ihtiyacımızı karşılayarak, fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı ortadan kaldırarak hem çevresel sürdürülebilirliği sağlayacak hem de iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayacaktır. Bu vizyon, daha temiz bir hava, daha güvenli bir enerji altyapısı ve daha yeşil bir gezegen yaratmayı amaçlamaktadır (Romm, 2004). Bu ekonomi, yalnızca yakıt değişikliği önermekle kalmaz, aynı zamanda hidrojeni bir enerji taşıyıcısı olarak kullanacak teknolojilerin geliştirilmesini ve yaygınlaşmasını gerektirir. Hidrojen sadece enerji kaynağı değil aynı zamanda bir enerji taşıyıcısıdır; diğer kaynaklardan elde edilen enerjinin depolanmasına ve iletilmesine olanak sağlar. Hidrojen ekonomisinin beklenen ekonomik, sosyal ve çevresel avantajları tanımlanmış olup, bazı faydalar tartışılmasına rağmen genel olarak temiz ve bol bir enerji taşıyıcısı olduğu düşünülmektedir (Waegel vd., 2006). 21. yüzyıl, enerji-ekonomi-ekoloji uyumu açısından “hidrojen çağı” olacaktır. Hidrojen enerji sistemlerinin; sera etkisi, kirlilik ve asit yağmuru gibi sorunları çözeceği, temiz ve sürdürülebilir bir enerji sistemi kuracağı, istihdam sağlayacağı, petrol ithalatını azaltacağı, yeni enerji teknolojileri için ihracat potansiyeli oluşturacağı, ticaret açığını azaltacağı ve çevreyi koruyarak ekonomiye destek olacağı öngörülmektedir (Şahin, 2006). Bununla birlikte hidrojen ekonomisine geçişin uzun bir süreç gerektirdiği öngörülmektedir. Kısa dönemde, hidrojen doğal gazın ileri buhar biçimlendirmesiyle üretilip, karbondioksit salınımı azaltılabilecektir. Orta dönemde, hidrojenle çalışan yakıt hücreleri elektrik, ısı ve termal enerji üretecek, hidrojen kömür ve biyo kütleden elde edilecektir. Uzun dönemde ise yenilenebilir enerji kaynaklarıyla hidrojen üretimi artacak, ileri teknolojilerle hidrojeni depolama ve kullanma imkanları geliştirilecektir. Bu süreç, hidrojen ekonomisinin inşasını sağlayacaktır. (Midilli vd, 2005). Yenilenen enerji güvenliği, jeopolitik unsurlar, iklim krizi ve ekonomik değerler, hidrojen ekonomisine olan ilgiyi giderek artırmaktadır. Özellikle karbon emisyonlarını azaltma hedefleri ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma isteği, hidrojenin alternatif bir enerji kaynağı olarak önem kazanmasına yol açmaktadır. Hidrojen, çevre dostu bir enerji taşıyıcısı olarak temiz enerjiye geçişte kilit bir rol oynayabilir. Henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, özellikle mali ve siyasi taahhütler göz önüne alındığında, hidrojen ekonomisinin hızla gelişme potansiyeli oldukça yüksektir. Birçok ülke ve şirket, hidrojen teknolojilerine büyük yatırımlar yaparak gelecekte bu alanda lider olmayı hedeflemektedir. Ayrıca, hidrojen ekonomisinin önündeki en büyük zorluklardan biri, gerekli altyapının kurulması ve hidrojen üretiminin maliyetinin düşürülmesidir. Hidrojen üretimi, depolama ve dağıtım gibi süreçler hâlâ gelişim aşamasında olup, geniş ölçekli kullanım için maliyet etkin çözümlere ihtiyaç vardır. Hidrojenin üretimi genellikle suyun elektrolizi veya fosil yakıtların kullanımı ile gerçekleştirilmektedir. Hidrojenin depolanması ise; güvenli ve verimli bir şekilde saklanmasını sağlamak için gelişmiş teknolojiler gerektirmektedir. Taşınması sırasında ise, özel altyapılar ve güvenlik önlemleri devreye girer, çünkü hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Hidrojen enerjisi dağıtım ağı ile, çeşitli endüstriyel ve ticari kullanımlara aktarılması sağlanarak enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır. (IEA, 2019). Bununla birlikte bu alanda yapılacak teknolojik ilerlemeler, hidrojen ekonomisinin hızla yaygınlaşmasına olanak tanıyabilir. Birçok bilim insanı ve araştırmacı, hidrojen ekonomisi üzerine yapılan sosyal ve toplumsal değerlendirmelerin önemli ölçüde eksik olduğunu belirtmektedir. Hidrojenin enerji sistemi üzerindeki etkileri kadar, sosyal, ekonomik ve politik sonuçlarının da değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle enerji güvenliği, iş gücü dönüşümü ve halkın bu yeni teknolojiye adaptasyonu gibi konular daha fazla araştırılmalıdır. Bu nedenle, hidrojen ekonomisinin gelişimi sadece teknolojik ilerlemelere değil, aynı zamanda bu sürecin toplum üzerindeki etkilerine yönelik kapsamlı bir değerlendirmeye de dayanmalıdır (Dillman ve Heinonen, 2022). Küresel ilişkiler büyük ölçüde enerji tedariki, arz güvenliği ve bu alandaki stratejiler üzerine inşa edilir. Enerji kaynaklarına sahip olmak, her ülke için ekonomik bağımsızlığının bir simgesidir. Dünyada kullanılan enerji kaynakları üç ana gruba ayrılır: fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji. Enerji çeşitliliği hem sanayi hem de günlük yaşamda önemli bir yer kapladığından, ekonomik faaliyetlerin temel taşlarından biridir (Khan ve Al-Ghamdi, 2022). Enerji ekonomisi, mevcut enerji kaynaklarının ekonomik faaliyetlerle olan ilişkisini inceler. Özellikle fosil yakıtların yoğun kullanımı, karbon salınımı yapmaları, sınırlı rezervlere sahip olmaları ve sera gazı emisyonlarına yol açmaları gibi nedenlerle, karbon salınımını, hava kirliliğini ve asit yağmurlarını azaltacak alternatif enerji kaynaklarına yönelmek kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, hidrojen ekonomisine geçişin sağlanması hayati bir önem taşımaktadır (Hunt, 2023). Operasyonel bir hidrojen ekonomisinin hayata geçirilmesi, yalnızca teknik altyapının kurulmasını değil, aynı zamanda halkın geniş çapta desteğini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Hidrojen ekonomisine geçişin başarılı olabilmesi için, toplumun bu yeni enerji sistemini benimsemesi ve desteklemesi hayati bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, halkın hidrojen ekonomisi konusundaki bilgi düzeyi ve farkındalığı, bu teknolojilere olan tutumu belirleyen önemli faktörler arasındadır. Hidrojen teknolojisinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği, halkın desteğine ve bu teknolojilere karşı geliştirebileceği olumlu ya da olumsuz tutumlara bağlıdır. Bu nedenle, toplumun hidrojen ekonomisine yönelik kabulünü değerlendirmek, halkın bu konuda nasıl düşündüğünü anlamak, endişelerini dinlemek, eğitim ve bilgilendirme kampanyaları yoluyla farkındalık yaratmak büyük önem taşır. Özellikle, hidrojenin güvenliği, maliyeti ve çevresel faydaları hakkında doğru bilgilerin paylaşılması, halkın olası yanlış anlamaları ve dirençlerini ortadan kaldırmak için gereklidir. Hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı isteksizlikleri önlemek, toplumun kaygılarını anlamak ve bunlara etkili yanıtlar geliştirmekle mümkündür. Bu nedenle, hidrojen ekonomisinin teknik altyapı gereksinimlerinin yanı sıra, sosyal boyutuna da önem vermek ve halkın desteğini kazanmak, bu ekonominin uzun vadede başarılı bir şekilde

uygulanabilmesi için kritik adımlardan biridir (Ricci, Bellaby, ve Flynn, 2008; Scovell, 2023). Enerji, modern yaşamın temel ihtiyacıdır ve uluslararası ilişkilerde enerji temini ve güvenliği önemli rol oynar. Fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji ve nükleer enerji gibi kaynaklar, bu ihtiyacı karşılar. Enerji ekonomisi ise bu kaynakların ekonomik faaliyetlerle olan ilişkisini inceler (Tutar ve Eren, 2011). Karbon salınımını azaltma hedefleri, gelecekte enerji santrallerinin ve motorlu araçların hidrojenle çalışacağına dair tahminlerde bulunulmasına yol açmaktadır. Bu durum “hidrojen ekonomisi” olarak adlandırılan yeni bir ekonomik yapının ortaya çıkmasına neden olacaktır. İklim değişikliği, hava kirliliği, oksijen azalması ve çevre sorunları gibi problemler nedeniyle hidrojen ekonomisine geçiş giderek önem kazanmaktadır. Hidrojen, ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında büyük ölçekli nükleer enerji üretimi için keşfedilmiştir. Küresel ısınma ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri, hidrojen kullanımına olan ilgiyi artırmıştır (Fanchi, 2005). Hidrojen enerjisi, ilk kez 1973 yılında yaşanan enerji krizi sonucunda dünya genelindeki bilim insanlarının bu acil ve önemli soruna çözüm arayışına girmesiyle uluslararası gündeme oturmuştur. Bu kriz, fosil yakıtların tükenmesi ve enerji kaynaklarının sınırlı olması gibi problemleri gündeme getirmiş, bu durum da bilim insanlarını alternatif enerji kaynakları üzerinde yoğun bir şekilde çalışmaya teşvik etmiştir. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi, potansiyel bir çözüm olarak öne çıkmış ve hem enerji güvenliğini artırmak hem de çevresel etkileri azaltmak amacıyla geniş bir araştırma ve geliştirme sürecine girilmiştir (Kurtuluş, Tabakoğlu ve Türe, 2006). 1974 yılında, Miami’de düzenlenen The Hydrogen Economy Miami Energy (THEME) Konferansı’nın ardından gerçekleştirilen toplantılar sonucunda, hidrojen enerjisinin potansiyelini ve önemini vurgulayan bir dizi tartışma ve planlama yapılmış, bu süreçlerin sonunda Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kurumu (International Hydrogen Energy Institute, IHEI) kurulmuş ve faaliyetlerine başlamıştır. Bu kurum, hidrojen enerjisinin araştırılması, geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması amacıyla uluslararası düzeyde iş birliğini teşvik eden ve destekleyen bir platform olarak ortaya çıkmış, hidrojen enerjisinin global enerji sistemlerinde önemli bir rol oynaması için gerekli bilimsel ve teknolojik ilerlemeleri sağlamayı hedeflemiştir (Veziroglu, 2000). THEME konferansından önce hidrojen enerjisi konusunda bilgi ve farkındalık oldukça sınırlıydı ve bu konu, geniş bir kitle tarafından neredeyse hiç bilinmiyordu. Ancak, bu konferansın ardından, hidrojen enerjisinin potansiyelini ve gelecekteki rolünü vurgulayan sayısız süreli yayın, akademik makale ve uluslararası düzeyde düzenlenen konferanslar sayesinde konu büyük bir ilgi görmeye başlamıştır. Bu yayınlar ve etkinlikler, hidrojenin çevre dostu özellikleri, enerji verimliliği ve sürdürülebilirliği gibi avantajlarını kamuoyuna tanıtmış ve bu sayede halk arasında hidrojenin geleceğin yakıtı olarak kabul edilmesine yol açmıştır. Bu gelişmeler, hidrojen enerjisinin geniş çapta bir bilinirlik kazanmasını ve enerji sektörü üzerindeki potansiyel etkilerinin anlaşılmasını sağlamıştır (Momirlan ve Veziroglu, 2002).

**Tablo 1. Dünyada Enerji Teknolojilerine Göre Girişim Verileri (IEA, 2019)**

	2019	2020	2021	2022	2023
Biyoenerji	0.3%	0.5	0.6	0.3	0.3
Elektrikli Araçlar	12.8%	13.8	16	15	10.2
Elektrik Verimliliği	17.5	17.2	15	15	16.8
Enerji Depolama ve Piller	6.0	5.8	7.5	10.9	10.3
Fosil Yakıtlar	11.0	8.9	7.3	5.5	5.7
Grid Enerji Depolama	4.5	4.7	4.3	4.6	3.9
Hidrojen ve Yakıt Hücreleri	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1
Nükleer Enerji	0.3	0.2	0.5	0.3	1.1
Diğer Enerjiler	20.0	19.9	17.8	17.3	18.9
Diğer Yenilenebilir Enerjiler	19.3	20.4	21.9	23.9	23.4
Güneş Enerjisi	7.7	7.5	7.7	6.0	8.2
Rüzgar Enerjisi	0.8	0.9	1.1	1.0	0.6

**Tablo 2. Türkiye ve Dünyada Enerji Kaynaklarının Kullanımı Ekonomik Verileri (IEA, 2019).**

Ülke	Toplam Enerji Tüketimi(TWh)	Kişi Başına Enerji Tüketimi (kWh)	GSYİH (Milyar Dolar)	Enerji Bağımlılığı (%)
ABD	4400	12.154	25.000	36
Çin	7400	4.473	17.500	15
Almanya	590	7.000	4.200	63
Rusya	1500	6.500	1.700	-80 (Net İhracat)
Hindistan	1500	900	3.500	20
Türkiye	350	3.200	900	75

### **Tablo 1 ve Tablo 2 ile ilgili açıklamalar;**

**Toplam Enerji Üretimi:** Ülkenin yıllık enerji üretimi toplamı (terawatt - saat cinsinden).

**Kişi Başına Enerji Tüketimi:** Ülkedeki kişi başına düşen yıllık enerji tüketimi (kilowatt-saat cinsinden).

**GSYİH:** Ülkenin Gayri Safi Yurtiçi Hasılası (milyar dolar cinsinden).

**Enerji Bağımlılığı:** Bir ülkenin enerji ihtiyacını karşılama oranı, negatif değerler ihracatçı ülkeler için kullanılır.

Tablo 1 ve Tablo 2, önde gelen ülkeler ve Türkiye'nin enerji konusundaki girişimleri, enerji kaynaklarını nasıl kullandıklarını ve ekonomilerine nasıl entegre ettiklerini inceleyerek kıyaslamaya yardımcı olabilir. Bu veriler, enerji politikaları ve ekonomik kalkınma stratejileri hakkında daha derin bir analiz için temel oluşturabilir. Özellikle Tablo 1'de dikkat çeken durum hidrojen konusundaki girişimin varlığıdır.

Hidrojen, birçok çevresel ve ekonomik soruna kalıcı çözümler sunarak, ideal iklim koşullarının sağlanmasına, temiz hava kalitesinin korunmasına, asit yağmurlarının ortadan kaldırılmasına ve ozon tabakasının korunmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, çevrenin temizlenmesine ve petrol sızıntılarının azaltılmasına veya tamamen ortadan kaldırılmasına olanak tanıyabilir. Her ülkenin kendi enerji ihtiyacını karşılamak üzere hidrojen yakıtını üretme imkânı, enerji bağımsızlığını artırabilir ve petrol savaşlarının sona ermesini teşvik edebilir. Tüm bu gelişmeler, yaşam standartlarının yükselmesine ve toplumsal refahın artmasına önemli katkılarda bulunabilir (Veziroğlu ve Türe, 2006). Hidrojen ekonomisinin Türkiye'ye sağlayacağı büyük yararlar olacaktır. Öncelikle kendi enerji kaynaklarımızı kullanarak, hidrojen üretimiyle dışa bağımlılığımız azalacaktır. Fosil yakıt ithalatı azalacak ve uzun vadede sıfırlanarak dövizden tasarruf sağlanabilir. İhracat olanakları gelişerek fazla hidrojenin diğer ülkelere ihracı döviz kazandıracaktır. Hidrojen sektöründe yeni iş olanakları yaratılacak ve yeni istihdamlar olacaktır. Türkiye, yüksek katma değerli hidrojenle çalışan ürünleri ihraç edebilecektir. Enerji ithalatını azaltarak ekonomik kalkınma yı hızlandıracaktır bu da ekonomik bağımsızlığımızı sağlayarak ulusal istikrarımızı güçlendirecektir (Veziroğlu ve Türe, 2006). Clark II ve Rifkin'e göre, fosil yakıtlardan yeşil hidrojene geçişte optimize edilmesi gereken unsurlar bulunmaktadır. İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana endüstrileşmiş ülkeler, araştırma ve geliştirme bütçelerini yenilikçi teknolojilere destek için kullanmıştır. Vergi indirimleri, devlet teşvikleri ve yönetmelikler, yeni teknolojilerin ticarileşmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yenilenebilir enerji, ekonomik güvenliği ve çevreyi korumanın yanı sıra yeni iş fırsatları da yaratmaktadır (Clark ve Rifkin 2006). Hidrojen ekonomisine geçiş büyük bir paradigma değişikliği gerektirdiğinden, iyi planlanmış bir değişim süreci önemlidir. Benzin ve sıkıştırılmış doğalgaz kullanımı, hidrojen ekonomisine geçişin bir parçasıdır. Ancak, hidrojen ekonomisinin en büyük

sorunlarından biri, dünya çapında petrol ve kömüre bağımlılığın artmasıdır. Doğalgaz, temiz bir yakıt olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Enerji verimliliği ve depolanması, sürdürülebilir hidrojen geçişinde kritik öneme sahiptir. Hem talebi azaltmak hem de güvenliği sağlamak açısından enerji depolama ve verimlilik önemlidir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerin hidrojen araştırma ve geliştirme faaliyetlerine katılım sağlaması gerekmektedir (Clark ve Rifkin, 2006). Hidrojen, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. Yüksek enerji verimliliği, sessiz çalışma özelliği, düşük işletme maliyetleri ve sıfır emisyon gibi avantajları sayesinde hidrojen yakıt hücreleri, gelecekte enerji sektöründe önemli bir rol oynayabilir. Proton değişim membranı (PEM), katı oksit yakıt hücresi (SOFC) ve erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC) gibi çeşitli yakıt hücresi türleri, hidrojen enerjisinin farklı alanlarda kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu çeşitlilik, hidrojenin enerji sektöründeki kullanım alanlarını genişletebilir. Hidrojenin, temiz bir enerji kaynağı olarak konumunu daha da güçlendirmek için yalnızca teknolojik ilerlemeler yeterli değildir. Aynı zamanda politik ve ekonomik faktörlerin de dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Hidrojen ekonomisinin toplum genelinde benimsenmesi ve yaygınlaşması için, halkın desteği büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte, hidrojen teknolojisi ve altyapı projelerine karşı oluşabilecek olumsuz tutumların önüne geçmek için etkili stratejiler geliştirilmeli ve gerekli adımlar atılmalıdır. Toplumun bu yeni enerji kaynağına adaptasyonu, başarılı bir hidrojen dönüşümü için kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, dünya genelindeki ülkelerin ortak hareket ederek hidrojen ekonomisini teşvik etmek adına iş birliği yapmaları büyük bir gerekliliktir. Ortak bir strateji oluşturulması ve bu alanda kapsamlı yatırımların yapılması, hidrojenin daha yaygın bir enerji kaynağı haline gelmesini sağlayabilir. Ayrıca, hidrojen altyapısının geliştirilmesi ve bu alandaki yeniliklerin desteklenmesi, hem ekonomik büyümeye katkıda bulunacak hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını kolaylaştıracaktır.

Sonuç olarak, hidrojenin gelecekte enerji sektöründe daha yaygın bir şekilde kullanılması kaçınılmazdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi ve teknolojik ilerlemelerle birlikte, politik ve ekonomik kararların da bu süreci desteklemesi, hidrojen ekonomisinin başarıya ulaşmasında kritik bir faktördür. Bu şekilde, fosil yakıtlara olan bağımlılık azalacak, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak hidrojenin kullanımı artacak ve gezegenimizin geleceği için daha sağlıklı bir çevre oluşturulabilecektir.

## KAYNAKÇA

Bockris, O'M.J., Veziroğlu, T.N., Smith, D.L., (2001). Geleceğin Enerjisi Güneş ve Hidrojen, Çev. Ömer Faruk Noyan, Kaynak Yayınları, İstanbul.

Clark II, WW., Rifkin, J.A., (2006). Green Hydrogen Economy, Energy Policy, 34: 2630 2639.

- Dillman K.J., Heinonen J., (2022). A Just Hydrogen Economy: A Normative Energy Justice Assessment of The Hydrogen Economy. doi: 10.1016/j.rser.2022.112648.
- Hunt, J. D., Montanari, P. M., Hummes, D. N., Taghavi, M., Zakeri, B., Romero, O. J., Zhou, W., Freitas, M. A. V. D., José de Castro, N., Schneider, P. S., Wada, Y., (2023). Solid Air Hydrogen Liquefaction, the Missing Link of the Hydrogen Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.405>.
- IEA, (2019), Uluslararası Enerji Ajansı. Erişim Adresi: <https://www.iea.org>.
- Khan, M.I., Al-Ghamdi, S.G., (2023). Hydrogen Economy for Sustainable Development in GCC Countries: A SWOT Analysis Considering Current Situation, Challenges, and Prospects., *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 28, pp. 10315–10344.
- Kurtuluş, G., Tabakoğlu, F. Ö., Türe, İ. E., (2006). Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve Unido - Ichet, Türkiye 10. Enerji Kongresi, s. 459-466.
- Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M.A., (2005). On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies: I: Current Status and Needs, *Renewable and Sustainable Energy*., <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.003>
- Midilli, A., Dincer İ., Ay M., (2006). Green Energy Strategies for Sustainable Development, *Energy Policy*, Vol.:34, pp:3623-3633.
- Momirlan M., Veziroglu, T.N., (2002). Current Status of Hydrogen Energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume:6/1-2, pp:141-179.
- Ramírez-Salgado, J., Estrada-Martínez, A., (2004). Roadmap Towards a Sustainable Hydrogen Economy in Mexico, *Journal of Power Sources*, Volume:129, pp:255-263.
- Ricci, M., Bellaby, P., Flynn, R., (2008). What Do We Know About Public Perceptions and Acceptance of Hydrogen? A critical Review and New Case Study Evidence., *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 21.
- Romm, J.J., (2004). *The Hype About Hydrogen: Fact and Fiction in The Race To Save The Climate*, Island Press.
- Scovell, M.D., (2022). Explaining Hydrogen Energy Technology Acceptance: A critical Review., *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume: 47 doi:10.1016/j.ijhydene.2022.01.099.
- Şahin, S., (2006). Nükleer Hidrojen Üretimi, In: III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi Bildiri Kitabı, pp:123-128.
- Tutar, F., Eren, M. V., (2011). Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye, *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 3 (6) : 1-26.
- Waegel A., Byrne J., Tobin D., Haney B., (2006). Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface, *Bulletin of Science, Technology & Society*, 26(4): 288-298.

# BİR EMAYE KAPLAMA TESİSİNDE HİDROJEN GAZI PATLAMASI: İŞÇİ SAĞLIĞI VE İŞ GÜVENLİĞİ YÖNÜNDEN OLGU DEĞERLENDİRMESİ

**Mustafa Cüneyt GEZEN**

Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü,  
İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0001-6352-0087

**Rüştü UÇAN**

Dr. Öğr. Üyesi, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği  
Bölümü, İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-2389-8231

## GİRİŞ

2021 yılında, ülkemizin Marmara Bölgesi'nde tarım ve sanayinin ağırlıklı olarak yer aldığı bir ilimizde yerleşik büyük bir emaye fabrikasında bir öğütme fırınında patlama gerçekleşmiş ve bunun sonucunda bir operatör yaşamını yitirmiş ve işyerinde maddi hasar oluşmuştur. Bu çalışmada önce patlamaya neden olduğu düşünülen gazın (ya da gazların) özelliklerinden söz edilerek emaye üretim sürecine değinilmiş ve daha sonra olgu aktarılarak tartışma bölümünde işçi sağlığı ve iş güvenliği ile patlamadan korunma dokümanı üzerinde değerlendirmelerde bulunulmuştur.

### 1. Emaye İşlemi Nedir?

Emaye işlemi mineleme (enamelling) olarak da bilinmektedir. Emaye, mücevherlerin, duvar işlerinin ve heykellerin yüzeyinde renk ve desen oluşturmak için hem cam hem de metalle çalışmanın en eski biçimlerinden biridir. Ev aletleri, tencere ve tabelalarda pratik kullanımlar için çeliği kaplamak paha biçilmez endüstriyel bir işlemdir (Arcelor Mittal, 2015). Emaye, toz camın yüksek ısıda metal bir alt tabakaya kaynaştırıldığı bir işlemdir. Emayeler cama, seramiklere ve en yaygın olarak metallere uygulanabilir. Emaye uygulaması çeliğe renk katabilir. Emayeler cama, seramiklere ve en yaygın olarak metallere uygulanabilir. Toz haline getirilmiş cam bir yüzeye ıslak veya

kuru olarak uygulanabilir. Emaye, üzerinde ısı uygulandığında pürüzsüz bir kaplamada ergir, akar ve yüzeye kaynaşır. Bir sprey kullanarak pişirme sıcaklıkları genellikle 750 – 900 °C’ler arasında değişir (Karasu vd., 2020).

Emaye, M.Ö. 6. yüzyıla kadar uzanan, binlerce yıldır kullanılan eski bir süreçtir ve günümüzde de yaygın olarak benimsenen bir teknolojidir. Tarih boyunca, tören nesnelerinde değerli taşların yerine renk katmak için emaye kullanılmıştır. Zanaatkarların, Doğu Roma İmparatorluğu ve Bizans’ın yükselişi sırasında dini ve törensel nesnelere süslemek için emaye kullandıkları bilinmektedir (US EPA, 1985).

Emaye dökme demirden yapılan ilk mutfak eşyaları 18. yüzyıla dayanmakta olup, ilk olarak Almanya’da ortaya çıktığı bilinmektedir. 19. yüzyıldaki Sanayi Devrimi, dökme demir ve daha sonra çeliğin daha büyük miktarlarda üretilmesini olanaklı kılmış; bu da alt katmanlar üzerinde emayenin geliştirilmesinin önünü açmıştır. Günümüzdeki emaye süreçleri, 20. yüzyıl boyunca gelişmiş; bu süreç, çelik üretimindeki ilerlemeyi yansıtırken aynı zamanda giderek daha katı hale gelen çevresel düzenlemelere de uyum sağlamıştır.

Emaye, 1000–1300 °C arasında yüksek sıcaklıkta füzyonla elde edilen bir cam olup, ana bileşeni silika ( $\text{SiO}_2$ )’dır (Kara, 2014). Boyamadan farklı olarak emaye işlemi, şiddetli hava koşullarının yanı sıra yüksek ısıya dayanıklı bir kaplama üretir. Bu nedenlerden dolayı, emaye çeliğin yaygın uygulamaları arasında pişirme endüstrisi ve dış ortam tabelaları bulunmaktadır.

Emaye işlemi, uygun çelik parçanın bir veya her iki tarafına bir ya da birden çok emaye katmanının uygulanmasını ve ateşlenmesini gerektirir. Başarılı bir emaylama işleminin iki temel özelliği vardır: emayenin çeliğin yüzeyine düzgün dağılması ve mineleme oluştuktan sonra iyi bir yüzey görünümü. Çeliğin karbon içeriği, bu iki özelliğe ulaşma sürecini engelleyebilir. Emayenin yapışmasını sağlamak için karbon önemlidir. Bununla birlikte, içerik çok yüksekse, emayenin yüzey görünümünü olumsuz yönde etkileyebilir.

Emaye çeliğin avantajları, dayanıklılık, estetik nitelikler, hijyen ve çevreye saygılı olmasıdır. Emaye çelik, korozyona, kimyasallara, deterjanlara, çözücülere ve asitlere, havaya, suya, buhara, ateşe, sıcak ve soğuya, çizilmelere ya da aşınmaya karşı dayanıklıdır. Neredeyse sınırsız bir renk yelpazesinde boyanabilir. Ekran baskısı sorunlar oluşturur. Geniş bir yüzey dokusu yelpazesi üretilebilir. Bakteri çoğalmasını engeller. Kötü kokuları emmez. Gıda ile temas için güvenlidir. Temizlemesi kolaydır. Emaye çelik, iki adet temiz ve geri dönüştürülebilir malzemenin bileşimidir ve tümüyle geri dönüştürülebilir.

Emaye çelik ürünleri çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Emaye çeliğin mükemmel özellikleri ve özellikle hijyenik nitelikleri, onu mutfak aletleri için ideal bir seçenek haline getirir. Fırın boşlukları, kızartma tepsileri, ocaklar

ve ızgara kapakları iyi örneklerdir. Tabelalama, emayeli çeliğin yararlanıldığı bir başka uygulamadır. Bu, iç ve dış ortamlar için ideal bir çözümdür. Yüzey, hava koşullarından, kirlilikten ya da grafitiden zarar görmeyecektir. Emayeli çelik genellikle mimarlık işkolunda kullanılır. İstasyonlar, havaalanları ve diğer binalar gibi kamu alanlarının iç ortamlarında kullanılabilir. Emayeli çelik, dış ortamlarda binaların kaplaması olarak da kullanılabilir, çünkü hava koşullarına ve UV'ye dayanıklıdır, hafif bir yapısı vardır ve birçok renkte mevcuttur.

Emaylama, metal yüzeyine çok ince öğütülmüş cam tozunun (frit) uygulanarak 500 °C'den daha yüksek bir sıcaklıkta ergitilip cama dönüşmesiyle metal yüzeye kalıcı olarak yapıştırılmasıdır. Bu teknik boya değil, cam esaslı bir kaplamadır. Emaye işlemi, çelik ile emaye arasında kalıcı bir füzyon üretir. Bu işlem, bir ya da birden çok emaye katmanının, parçanın özenle hazırlanmış yüzeyine farklı yöntemlerle (daldırma, püskürtme, elektrostatik) uygulanmasının ardından yüksek sıcaklıklarda pişirilmesini içerir (Demirhan, 2015).

Emaye, ince bir cam parçasıdır ve boya uygulamak yerine çelik ile emaye arasında güçlü, yok edilemez bir füzyon yaratır. Emaye, çeşitli metal oksitleri ile renklendirilmiş inorganik camdan malzemelerin (kuvars, kum, kil vb.) ve akıların (boraks, soda vb.) karışımıdır. Karışım, yaklaşık 1300 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta ergitilir, dökülür ve ardından hızlı bir şekilde soğutulup parçalanarak "emaye friti" oluşturulur; bu frit, emaye üretmek için fırınlarda öğütülür (SRJ Steel LLC, 2024).

İki temel porselen-emaye kaplama türü vardır. Bunlardan biri, zemin kaplaması ve üst kaplama olarak iki katmanlı sistemdir. Zemin kaplaması önce uygulanır ve sert, birleşik bir kaplama geliştirmek için ateşte tutulur; ardından üst kaplama, zemin kaplaması üzerine uygulanarak istenen rengi ve yüzey görünümünü sağlar. Diğer porselen emaye uygulama türü ise tek katmanlı sistemdir. Adından da anlaşılacağı üzere, bu yöntem tek kat ve tek ateşte uygulanan bir kaplamadır.

Bu emaylama yöntemi, daha seçici işlenmiş emaylama çeliklerinin kullanılmasını gerektirir. Emaylama sırasında SRJ çelik gibi uygun bir çelik türünün kullanılması kritik öneme sahiptir (ASTM A424/A424M-25, 2025). Emaylama için kullanılan çelik, parçaların pişirilmesi ve sonrasında soğuma sırasında oluşabilecek gerilmelere karşı deforme olmadan dayanabilmelidir. Ayrıca, emaylama sonrası iyi bir yüzey finisajı elde etmek için yanma sırasında nem düzeyleri dikkatle kontrol edilmeli ve çelik, yüzey kusurlarını önlemek için hidrojen kapanları içermelidir. "Balık pulu" olarak bilinen kusur, emaye çeliğin yüzeyinden sıçradığında oluşur. Bu kusur, emayenin alazlandığı anın hemen sonrasında ya da haftalar sonra görülebilir. Balık pulu direncini sağlamak için emaylama sürecinde uygun emaylama çeliğinin kullanılması kritik öneme sahiptir.

ASTM A424 Standardı uyarınca Tip I, Tip II ve Tip III olmak üzere üç tür emaye çeliği vardır. Tip I çelik, açık sac tavlama süreciyle üretilen ultra düşük karbonlu emaye çeliğidir. Mükemmel emaye yeteneğine sahiptir ve birden çok pişirme gerektiren çoğu uygulama için uygundur. Ayrıca iyi bir sarkma direnci ve şekillendirilebilirlik özelliği vardır. Tip II çelik, yalnızca bir tarafın emaylanması için kullanılabilen düşük karbonlu emaye çeliğidir. Zemin ve örtü kat emaylama işlemlerinde kullanılır. Tip III çelik, açık bobin tavlama yerine özel bir kimyasal yöntemle üretilen ultra düşük karbonlu çeliktir. Mükemmel emaye yeteneğine, ekstra derin şekillendirme özelliklerine sahiptir ve büyük parçaların bozulmasını önlemek için titanyum içerir (ISO, 2023b).

Emaye işlemi birkaç aşamadan oluşur:

Şekillendirme sonrası yüzey hazırlığı: Amaç, metal yüzey üzerinde yağ, pas ve oksit gibi kirleticilerin temizlenmesidir. İlgili standartlar: ISO 14713-1, ISO 18719, ISO 15773.

Emayenin hazırlanması: Emaye çamuru (suda süspansiyonlu camı parçacıklar) ve pigmentler (metal oksitler: CoO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vb.) oda sıcaklığında hazırlanır. İlgili standartlar: ISO 28764.

Emayenin çeliğe uygulanması: Kaplama, camı tozların veya süspansiyonların yüzeye uygulanmasıyla yapılır.

Kurutma: Amaç, kurutma fırınlarında fazla nemin uzaklaştırılmasıdır. Sıcaklık: 100–150 °C; süre: 10–30 dakika. İlgili standartlar: ISO 28764.

Yüksek sıcaklıklarda fırınlama (pişirme/sinterleme): Kaplanan parça fırında yüksek sıcaklıkta pişirilir. Cam tozu eriyerek yüzeye bağlanır. Fırın tipleri: Tünel fırın, kutu (box) fırın, yürüyen tabanlı fırın. Sıcaklık: 780–900 °C; süre: 2–15 dakika. Standartlar: ISO 28764, ISO 8289, ISO 4532.

Cam esaslı emaye katman, metal ile füzyon halinde olur. Bu yapı hem kimyasal hem de fiziksel olarak oldukça dayanıklıdır. Ancak uygun pişirme yapılmazsa emaye yüzeyden soyulabilir, çatlayabilir veya yapışma zayıf olabilir. Yüzey işleminin amacı, emaye işlemi ile uyumlu bir yüzey elde etmektir. Geçmişte çeliğin dekapajı yüzey hazırlığı için yaygın bir yöntemdi. Günümüzde ise çoğu emaye tesisi asit banyoları kullanmakta ve ardından emaylamadan önceki kısımdaki tüm yağları çıkarmak için temizlik işlemi uygulamaktadır. Emaye, ıslak ya da kuru yöntemlerle uygulanabilir. Her iki yöntem de hava destekli manuel püskürtme tabancaları veya elektrostatik püskürtme yoluyla gerçekleştirilebilir. Emaye uygulandıktan sonra, özellikle ıslak uygulama işleminden sonra kurutma kritik bir adımdır.

## 1.1. Emaye Fırınının Özellikleri

### 1.1.1 Fırın Tipleri ve Özellikleri

Tablo 1. Emaye Fırın Tipleri

Fırın Tipi	Kullanım Alanı	Özellikleri
Kutu (Box) Fırın	Küçük/orta ölçekli üretim ya da tek parçalar	Önceden ısıtılır, manuel yükleme yapılır (*)
Tünel (Kontinü) Fırın	Seri/profesyonel yüksek kapasiteli üretim	Konveyör sistemiyle sürekli proses, bölümler: ön ısıtma, pişirme, soğutma

(\*) Thompson Enamel, *Enameling Help and Information*, (2025).

Fırınlarda bulunan hava perdeleri (air seal), sıcaklığın dışarıya kaçmasını engeller ve malzemenin giriş-çıkışına olanak sağlar. Fırın içerisinde anti-scale emaye taşıma tepsisi yer almaktadır. Bu düzenek, parçaların doğrudan fırın zeminine temasını engeller; emaye kaplama yüzeyini korur (özellikle alt yüzeyde bozulma riskine karşı); anti-scale özelliği sayesinde oksit, cüruf veya metal parçacıkların bulaşmasını önler ve 800–1400 °C gibi çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır (National Fire Protection Association, 2023b).



Şekil 1. Emaye Fırın Alanı (İslamoğlu, 2021)

### 1.1.2 Fırınlarda Tehlikeli Gaz Oluşumu

Emaye fırınlarında gerek öğütme ve gerekse pişirme sırasında yüksek sıcaklık ve fırın redüksiyonu nedeniyle hidrojen, karbondioksit ve VOC gazları oluşmaktadır. Bu riskin azaltılması için bir Hidrojen Risk Yönetimi Planı (H<sub>2</sub>RMP) oluşturulması gerekmektedir. Hidrojen gazı algılayıcılarının konumlandırılması hem güvenlik ve hem de doğru algılama açısından yaşamsal öneme sahiptir. Hidrojen çok hafif bir gaz olduğundan hızla yükselir; bu nedenle fırın ortamında uygun algılayıcı yerleştirilmesi kritik önem taşır.

Hidrojenin yoğunluğu havadan yaklaşık 14 kat daha düşüktür; bu nedenle hızla yükselir. Algılayıcılar, fırın odası veya işlem alanının tavanına yakın, hava çıkış bacalarının bulunduğu noktalara yerleştirilmelidir (International Electrotechnical Commission, 2020). Algılayıcıların fırın ortam sıcaklığına dayanıklı modeller olması gerekir (örn. 0–70 °C). Patlayıcı ortamlarda kullanılan aygıtlar en az ATEX Zone 1 uyumlu olmalıdır (National Fire Protection Association, 2023a). Algılayıcılar, otomatik havalandırma sistemlerini ve sesli/ışıklı uyarı sistemlerini tetiklemelidir (Bachara vd., 2017). Pişirme fırınlarında hidrojen ve karbon monoksit gazlarının açığa çıkması, emaylama sürecinin doğal bir sonucudur (Nannan Yang vd., 2024).

### 1.1.3 Hidrojen Gazı Algılayıcıları Nerede Olmalı?

Yukarıda belirtildiği gibi hidrojenin yoğunluğu havadan yaklaşık 14 kat daha düşüktür (0,089 g/L @ 101,325 kPa ve 0 °C) ve bu nedenle dünyada bilinen en düşük yoğunluktaki gazdır (Wang vd., 2024). Bu yüzden fırın içerisinde hızla yükselir; dolayısıyla algılayıcılar, fırın bölmesi veya işlem alanının tavan kesimine yakın, hava çıkış bacalarının bulunduğu noktalara ve hava akım yönlerine göre stratejik noktalara yerleştirilmelidir.

Kontinü (tünel) tip bir fırın kullanılıyorsa algılayıcıların konumlandırılması şu şekilde olmalıdır:

Giriş ve çıkış noktaları: Özellikle ürünün taşındığı bölgelere yakın hava ceplerine yerleştirilmelidir. Bu bölgelerde gaz sızıntısı birikebilir.

Havalandırma çıkışları: Fırın içindeki gazlar çıkış (egzoz) kanallarına yönlendirilir. Bu kanalların giriş ağızlarına (özellikle yüksek noktalara) algılayıcı yerleştirilmelidir. Böylece hem kaçak hem de birikme hızlıca saptanabilir.

Fırın tavanındaki “ölü noktalar”: Hava dolaşımının az olduğu ölü hacimlerde hidrojen birikebilir. Bu alanlara (örneğin tavan köşeleri, duvar-davlumbaz birleşimleri) en az bir adet algılayıcı konulmalıdır.

**Tablo 2.** Algılayıcıların Teknik Yerleşim Kuralları (Endüstriyel Uygulamalar) (Ditmer Trading & Consulting BV, (n.d.))

Ölçüt	Açıklama
Yükseklik	Algılayıcılar tavanın hemen altına (20–30 cm aşağıya) yerleştirilmelidir.
Aralık	Büyük hacimli fırınlarda yaklaşık her 5–8 metrede bir algılayıcı önerilmektedir.
Sıcaklık toleransı	Algılayıcıların fırın ortam sıcaklığına dayanıklı modeller olması gerekir (örn. 0–700 °C).
ATEX Sertifikası	Patlayıcı ortamlarda kullanılan aygıtlar en az ATEX Zone 1 uyumlu olmalıdır.
Alarm sistemleri	Algılayıcılar, otomatik havalandırma sistemlerini ve sesli / ışıklı uyarı sistemlerini tetiklemelidir.

Algılayıcı tipleri: Katalitik ya da kızılötesi (IR) algılayıcı, patlamaya karşı korumalı (kivilcim çıkarmaz) aygıtlar kullanılmalıdır.

Alarm sistemi: Algılayıcılar, otomatik gaz kesme vanası ve acil havalandırma sistemi ile eşgüdümlü çalışmalıdır.

Periyodik kontrol: Ayda bir kalibrasyon ve altı ayda bir algılayıcı testi yapılmalıdır.

Yedekleme: Kritik noktalarda algılayıcıların yedeklenmesi önerilmektedir (n+1 ilkesi) (MSA, 2007).

**Tablo 3. Özet – Algılayıcı Yerleşim Önerisi (MSA, The Safety Co., Gas Detection Handbook, 2007).**

Bölge	Algılayıcının konumu	Açıklama
Fırın tavanı	Tavanın 20–30 cm altında	Ana gaz birikme bölgesi
Fırın çıkışı/girişi	Yüksek noktalara	Ürün taşınım yerleri
Çıkış sistemi	Çıkış kanalı girişine yakın	Gaz yönlendirme noktası
Hareketsiz hava	Tavan köşeleri ya da durgun bölgeler	Gaz birikme riski
Fırın odası dışı	Kontrol paneli ve alarm sistemi	Operatör güvenliği

### 1.1.4 Emaye Fırınlarının Yapıları ve Kullanılacak Malzemeler

Emaye fırınlarının iç çeperleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik veya refrakter malzemedan yapılmaktadır. Kimi durumlarda özel paslanmaz çelik ızgaralar ya da emayeye zarar vermeyen kaplamalı plakalar kullanılır. Üzerine genellikle emayeye yapışmayan ince bir toz serilir (örn. zirkonyum, kaolin).

Emayeli parça doğrudan fırın yüzeyine konulduğunda, aşırı sıcaklık nedeniyle parçanın alt yüzeyinde oksitlenme, yapışma, çatlama veya renk bozulması oluşabilir. Fırın yüzeyinde biriken metal oksitler (pullanmalar) zamanla parçanın altına yapışır. Bu oksit tabakaları daha sonra parçadan ayrılmaz, yüzeye zarar verir ve emaye yüzeyinde kabarcıklanma veya bozulma oluşur.

Pullanmayı önleyici (anti-scale) taşıyıcılar, parçayla fırın arasında tampon görevi görerek bu tür fiziksel ve kimyasal sorunları engeller (Liu vd., 2022). Anti-scale taşıyıcılar (saggar), yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlarda: Emaylanmış parçaların deformasyonunu önlemek, fırın yüzeyine temasını engellemek, oluşabilecek oksit pullarından (scale) ürünü korumak, emaye kaplama yüzeyinde bozulmaları önlemek amacıyla kullanılan taşıyıcı ya da destekleyici özel seramik ya da metal tabanlardır. Bunlar, parçaların doğrudan fırın zeminine temasını engeller. Saggar, emaye fırınının içinde pişirilmek istenen nesneyi

içine alarak, fırın içi kirletici etkenlerden korumak için emayın pişirilmesinde kullanılan seramik kutu benzeri bir kaptır. Emaye kaplama yüzeyini korur (özellikle alt yüzeyde bozulma riskine karşı). Pullanmayı önleyici özelliği yardımıyla oksit, cüruf ya da metal partikül bulaşmasını önler. 800–1400 °C gibi yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Genellikle refrakter seramik, silikon karbür, zirkon, mullit, porselenit ya da özel paslanmaz çelik bir malzemeden üretilmektedir.

Bu malzemenin kullanılmasındaki amaç şudur: Emayeli parça doğrudan fırın yüzeyine konulursa, aşırı sıcaklık nedeniyle parçanın alt yüzeyinde oksit, yapışma, çatlama ya da renk bozulması oluşabilir. Fırın yüzeyinde biriken metal oksitler (scale) zamanla parçanın altına yapışır. Bu pullanmalar daha sonra parçadan kopmaz, yüzeye zarar verir ve emaye yüzeyinde kabarcıklanma ya da bozulmalar oluşmasına neden olur. Anti-scale taşıyıcılar, parçayla fırın arasında tampon görevi görerek bu tür fiziksel ve kimyasal sorunları önler.



**Şekil 2.** Saggar ((Manufacture nationale de Sèvres, Hauts-de-Seine, France)

**Tablo 4.** Anti-scale Taşıyıcıların Özellikleri (Mei-Ling Liu vd., 2022)

Özellik	Açıklama
Amaç	Oksit oluşumunu ve yüzey hasarını önlemek
Malzeme	Seramik, refrakter ya da özel metal
Kullanım yeri	Emaye pişirme fırınlarında ürün altlığı
Avantaj	Emaye kalitesini korur, fırın ömrünü uzatır

## 2. HİDROJEN

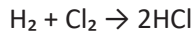
### 2.1 Hidrojen Gazının Genel Özellikleri

Hidrojen gazı konusu oldukça kapsamlıdır. Öncelikle temel tanımla başlamak istenirse, şunlar söylenebilir: Hidrojen, evrendeki en basit ve en bol element olup, Periyodik Tabloda 1. Grup (Alkali Metaller) ve 1. Periyotta

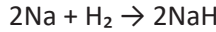
yer alır, ama alkali metal değildir ve simgesi H'dir. Elektron yapısı  $1s^1$  dir, bu nedenle +1 yükseltgenme derecesine sahiptir. Atomik kütlesi yaklaşık 1,008 g/mol olup, doğada çoğunlukla diatomik gaz molekülü ( $H_2$ ) olarak bulunur. CAS# 1333-74-0; EC# 215-605-7; UN# 1049; ICSC # 0001 (ICSC, 2025).

Fiziksel özellikler arasında dikkat çekici noktalar yer almaktadır. Standart sıcaklık-basınçta (STP) renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır; bağıl yoğunluğu çok düşük olup, havadan 14 kat daha hafiftir. Hidrojenin havadaki dağılım katsayısı  $0,61 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Graham Dağılım Yasası – gazın dağılım katsayısı yoğunluğunun karekökü ile ters orantılıdır) (Mason ve Kronstadt, 1967). Hidrojen, bilinen en hafif gazdır (bağıl yoğunluk: 0,0695, hava = 1) ve havada hızla yayılır. Ancak kapalı ve kısıtlı bir alanın tavanına çok yakın bir yerde kolayca birikebilir. Erime Noktası:  $-259,16^\circ\text{C}$  (14,01 K) (çok düşük basınç altında); kaynama noktası:  $-252,87^\circ\text{C}$  (@20,28 K); suda çözünürlüğü: 1,62 mg/L (@21 °C); elektriksel iletkenliği: 2.000 S/cm (@1,4–1,8 Mbar); bunların yanı sıra plazma hali iletkendir (Zaghoo ve Silvera, 2017). Spesifik olarak hidrojen, 350 GPa'ı aşan basınçlarda metalik bir duruma geçebilir (WestAir Gases and Equipment, 2025).

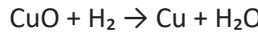
Kimyasal özellikleri. Elektron Yapısı:  $1s^1$ . Tek elektronu kolayca kaybederek +1 yükseltgenme basamağına ( $H^+$  iyonu) ulaşma eğilimindedir. Ayrıca 1 elektron alarak -1 indirgenme basamağında ( $H^-$  iyonu, hidrür) da bulunabilir. Reaktifliğinin nedenleri düşük iyonlaşma enerjisi ve yüksek elektronegatiflikli elementlere yöneliminin bulunmasıdır. Tipik tepkime örnekleri: Metallerle (hidrürler) ve ametallerle (su, amonyak vb) tipik tepkimeler vermektedir. Oksijen ile su oluşturur (yanma tepkimesi). Fluor, klor, brom, iyot gibi halojenler ile hidrohalik asitler oluşturur. Örneğin:



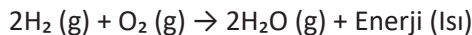
Fluor ( $F_2$ ) ile karanlıkta bile şiddetli patlama gerçekleşir. Haber-Bosch Prosesine göre, azot ile yüksek sıcaklık ve basınç altında katalizör yardımıyla amonyak ( $NH_3$ ) oluşturur (WestAir Gases and Equipment, 2025). Yüksek sıcaklıkta Karbon (C) ile metan ( $CH_4$ ) gibi hidrokarbonlar oluşturur. Na, K, Ca gibi aktif metallerle iyonik hidrürler oluşturur. Örneğin:



Özellikle yüksek sıcaklık altında Bakır (Cu), Demir (Fe), Nikel (Ni) gibi metallerle Hidrojen kırılabilirliğine neden olabilir (metale difüze olup kırılabilirlik yaratır). Kimi metal oksitleri indirger. Örneğin:



Yanma ve patlama özelliklerine gelindiğinde: Hidrojen son derece yanıcı bir gazdır. Havadaki yanma tepkimesi:



Kütlice en yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıtlardan biridir ( $\approx 142$  MJ/kg) (Max Appl. 1997). Alevi gözle görülmeyebilir. Hidrojen, havada son derece yanıcı ve patlayıcıdır. Patlama riskiyle ilgili kritik parametreler için, havadaki yanma ve patlama aralığı %4,0 – 75,0 (LEL/UEL) örnek verilebilir. En şiddetli patlama noktası yaklaşık %29 olup, AIP = 253 °C'dir (MSA, 2007). Patlama konusunda 6 Mayıs 1937'de ABD'nin New Jersey eyaletinde yaşanan Hindenburg Zeplin faciası tarihsel bir örnek olarak gösterilebilir (LZ 129 Hindenburg, 2026).

Renksiz/kokusuz olması nedeniyle kaçakların ve sızıntıların saptanma zorluğu, yüksek yayılma hızı nedeniyle kapalı alan riskleri gibi güvenlik uyarıları kesinlikle unutulmamalıdır. Tüm bunlara karşın hidrojenin yakıt teknolojisindeki önemi göz ardı edilmemelidir. Hidrojen toksik değildir, yaşamı desteklemez ve kapalı bir alanda ortamdaki oksijen içeriği ile yer değiştirme yoluyla boğucu etkide bulunabilir.

Tutuşması için gereken enerji  $17 \approx J$  gibi son derece küçük bir değerde olup, tutuşma olayı statik elektrik ya da akış sürtünmesiyle gerçekleşir. Bu nedenle, hidrojen-hava karışımları için tutuşabilme potansiyeli öteki yakıtlarla karşılaştırıldığında daha büyük kabul edilebilir. Karışımdaki oksijen içeriği, MIE değerini etkileyerek, %35 hacim itibarıyla oksijenle zenginleştirilmiş havada  $5,7 \approx J$ 'e düşmesine neden olur. Oksijen içinde hidrojen yanması ile yapılan deneylerde, aygıtın en düşük ölçme değerinin  $4 \approx J$  olması nedeniyle MIE'yi ölçme işlemi gerçekleştirilememiştir. Kimi kaynaklara göre, hidrojen-oksijenin tutuşma enerjisi  $1,2 \approx J$  kadar düşük olabilir (Cirrone vd., 2023). Hidrojen havada çok sıcak ve neredeyse görünmez bir alevle yanar; bu alev çok düşük ışınım ısıyı yaydığı için, varlığını sınırlı şekilde haber verir. Alev hızı yaklaşık 300 cm/s dir. Bu da alevin fark edilmemesine, yangın ve patlamanın çok hızlı ve şiddetli olmasına neden olur. Öyle ki patlama basıncı üç-seksiyoner borulu küresel test tankında yapılan testte, çıkış borusunda 1,78 MPa olarak ölçülmüştür (Jiao vd., 2017).

Kirleticiler (özellikle tuz) alevin rengini sarılaştırabilir. Hidrojen, hava ya da başka yaygın gazlarla sızdırmaz olan malzemeler ve sistemler aracılığıyla hızla yayılabilir. Yayılma, yüksek sıcaklıklarda daha belirgin hale gelir. Hidrojenin yanma sonucunda alevinin yaydığı sıcaklık 2045 °C'dir (Griessen, 2003). Hidrojen iki modda yanar. Yanmanın ilk modu deflagrasyon olarak adlandırılır. Bu modda, alev, karışımdan süpersonik olmayan hızlarla geçer. Alev hızı yaklaşık 300 cm/s dir. Öteki yanma modu ise detonasyon olarak adlandırılır. Bu modda ise, alev ve eşlik eden şok dalgası karışımdan süpersonik hızda geçer (Cirrone vd., 2023).

Deflagrasyon, serbest bir hidrojen-hava karışımının tutuşmasıyla oluşur. Serbest bir durum, binalar ya da duvarlar gibi engellerin olmadığı, iyi havalandırılmış bir açık hava alanını ifade eder. Alev hızı, sıkıştırma ile büyük ölçüde artabilir. Bir detone, kapalı ya da kısmen kapalı bir karışımda ateşlenmiş sıradan bir deflagrasyondan oluşabilir (Azatyan, vd., 2022).

## 2.2 Yanma Özelliğine Göre Hidrojenin Başlıca Kullanım Alanları

Hidrojen gazı, yüksek özgül itme kuvveti ve temiz yanması nedeniyle (sıvı  $H_2$  + sıvı  $O_2$ ) roket yakıtı olarak kullanılır; elektrik üretmek için  $H_2$  ve  $O_2$  yakıt hücrelerinde kimyasal olarak birleştirilir (yanmanın kontrollü versiyonu). Haber-Bosch prosesinde amonyak sentezi yöntemiyle gübre, patlayıcılar vb üretiminde kullanılır. Cam üretimi, metal işleme gibi yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel süreçlerde yakıt olarak kullanılır. Bitkisel yağlardan margarin yapımında, doymamış yağlara hidrojen eklenmesi sürecinde kullanılır. Ham petrol rafinasyon işleminde yakıtın kükürt içeriğini azaltmak için kullanılır (Türk ve Engin, 2024)

## 2.3 Referans Standartlar

Tablo 5, endüstriyel fırınların güvenli işletimi için kritik öneme sahip olan interlok devreleri, emniyet sistemleri ve fiziksel kilit mekanizmalarına dair uluslararası standartları ve teknik kaynakları özetlemektedir. İlgili referanslar; NFPA 86 ve EN 746-2 gibi temel normlar çerçevesinde sıcaklık, basınç ve akış denetimi sağlayan güvenlik protokollerinin yanı sıra sistem bileşenlerinin arıza durumundaki koruma ilkelerini kapsamlı bir şekilde tanımlamaktadır.

**Tablo 5. Konular – Referans Standartlar**

Konu	Standart / Kaynak	Ayrıntılar
Güvenlik interlok devreleri	NFPA 86	Fırın interlok sistemleri, aşırı sıcaklık limitleri ve emniyet devrelerine ilişkin ayrıntılı gereklilikler
Genel güvenlik interlock izleme (sıcaklık, akış, basınç vs.)	Lewco Ovens	Fırın interlock sistemleri, aşırı sıcaklık limitleri ve emniyet devrelerine ilişkin ayrıntılı gereklilikler
Endüstriyel fırınlar – ısı iletimi interlok	Isı iletim sistemlerinde güvenlik interloklarının olası arızaları ve koruma ilkeleri	<a href="http://www.heat-inc.com">www.heat-inc.com</a>
Kilit sistemleri ve bunların son kullanıcı fiziksel güvenlik programları için önemini anlaşılması.	Kilit sistemlerinde anahtar kontrollü güvenlik dizilimleri; elektrikli fırınlara adaptasyon	<a href="https://www.anixter.com/content/dam/Anixter/White%20Papers/12F0016X00-Anixter-Key-Systems-White-Paper-EN-US.pdf">https://www.anixter.com/content/dam/Anixter/White%20Papers/12F0016X00-Anixter-Key-Systems-White-Paper-EN-US.pdf</a>
Emniyet düzenekleri	NFPA 86, EN 746-2	Endüstriyel ısı işlem donatıları - Yanma ve yakıt işleme sistemleri için güvenlik gereksinimleri

## 2.3 Olgu Sunumu

2021 yılında, ülkemizin Marmara Bölgesinde tarım ve sanayinin ağırlıklı yer aldığı bir ilimizde yerleşmiş bulunan büyük bir emaye fabrikasının üretim bölümünde, bir öğütme fırınında patlama gerçekleşmiş, bunun sonucunda bir operatör yaşamını yitirmiş ve işyerinde maddi hasar oluşmuştur.

Edinilen bilgilere göre, vardiya bitimi yaklaşırken, öğütme fırınının soğutmaya alınmadan ve gaz giderme (gasfree) işlemi yapılmadan, operatör tarafından aceleyle sert ve kaba metal bir cisimle kapağa vurularak fırın açılmak istenmiş ve şiddetle açılan kapakla birlikte çıkan yanıcı ve patlayıcı gazlar (hidrojen, karbon monoksit, VOC) ortama yayılarak havanın oksijeniyle tehlikeli bir biçimde karışmış ve patlamaya neden olmuştur.

İşçi sağlığı ve iş güvenliği yönünden bu olgunun bir iş kazası olduğu anlaşılmış olup hukuki süreç halen devam etmektedir. Bu kazanın nedeni, ilk bakışta operatör hatası olarak görünse de "Tartışma" bölümünde değinileceği üzere, ağırlıklı işveren kusuru olduğu görülmektedir.

## SONUÇ

Söz konusu tesiste seramik ve emaye friti (seramiklerde sır kompozisyonu ve emayelerde metal ürünlerin yüzeylerinin kaplandığı camsı yapıdaki silikat karışımları), oksit, cam emaye boyası ve yapışmaz kaplama üretimi yapılmakta olduğu bilgi dahilindedir. Tesisin, ekonomik aktivite bakımından 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Yasası uyarınca "Çok Tehlikeli" sınıfta yer almakta olduğu bilinmektedir.

Üretimde, verilen reçetelere göre karışımlar hazırlanarak özel fırınlarda uygun sıcaklıklarda, kimyasal tepkimeyle birlikte ergitildikten sonra soğutulmakta ve daha sonra davaya konu olan değirmenlerde istenilen boyuta kadar öğütülmektedir. Öğütme sırasında aynı zamanda kimyasal tepkimeler sonucunda yanıcı ve patlama riski bulunan çoklukla hidrojen gazı oluşarak öğütücü içinde yükleme ve boşaltmanın yapıldığı kapağa içten basınç yapmaktadır. Bunun için belirli bir süre sonunda fırın soğutulurak basınç altındaki öğütücünün kapağını açmadan önce en az 15 dakika kadar azot gazı gönderilerek hidrojen gazı ve iç basınç kimyasal olarak bertaraf edilmeli (gasfree işlemi yapılmalı) ve sıcaklığın yaklaşık 200 °C'ye düşmesi beklenerek ve gaz algılayıcılarından yanıcı ve patlayıcı gazların hacimsel miktarı okunarak, yeterli teknik ve güvenlik önlemleri alındıktan sonra, öğütücü fırınının kapağı basınç fırlatmasına ve patlamaya karşı güvenli bir şekilde açılmalıdır.

Bu konuda güvenlik önlemlerinin eksiksiz bir biçimde alınması, süreç adımlarına ve çalışma kurallarına ilişkin operatörün eğitim yoluyla

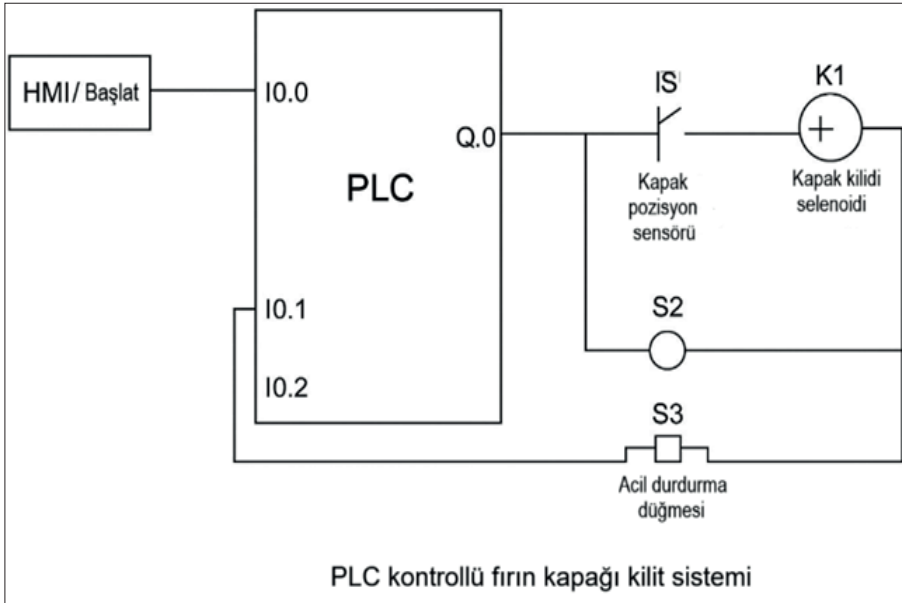
bilgilendirilmesi, nezaretçi amirlerin bu süreç adımlarını izlemesi gerekmektedir.

Kapak kilit sistemi, normalde bir adet ana kilit (örneğin elektromekanik interlock) ve bir adet yardımcı algılayıcı eşgüdümlü kilit şeklinde çift güvenli sistem olarak tasarlanır. Bu sistem, kilidin yalnızca fiziksel değil aynı zamanda süreç verilerine bağlı olarak çalışmasını sağlar.

Pişirme fırınları (özellikle tünel veya büyük hacimli tiplerde) nın az iki adet güvenlik kilidi bulunur; bunlardan ilki mekanik kilit ve ikincisi ise interlock güvenlik algılayıcısı ya da elektriksel kilit olmaktadır. Aynı zamanda “proof of closure” aygıtı (kapının kapalı olduğunu doğrulayan algılayıcı) da sisteme dahil edilebilir – Standarda göre bu tür bir doğrulama zorunludur (ISO, 2023a).

Hazırlama fırınlarında, işlem sıcaklığı görece düşük olduğundan, kilit açılma eşiği genelde  $\leq 50$  °C olarak belirlenir. Pişirme fırınlarında ise, yüksek sıcaklıklarda çalışma nedeniyle, kilit sistemi 80–120 °C aralığına değin düşmeden açılmaz; ATEX bölgelerinde bu limit kimi kez 60 °C olarak daha konservatif belirlenir. Bu sınırlamalar, Standardın “proof of closure” ve interlock devrelerine ilişkin gerekliliklerine uygundur (ISO, 2023a).

Genelde atmosfer basıncında çalışan fırınlarda, kilit sistemi ancak iç basınç yaklaşık 50–100 mbar (0,05–0,1 bar) düzeyine indiğinde açılabilir. Bu tip basınç algılayıcıları, PLC ile eşgüdümlü olarak kilidin açılmasını katı bir şekilde kontrol eder.



**Şekil 3.** PLC kontrollü fırın kapağı kilit sistemi (NFPA 86:2023)

Mekanik ve elektromekanik kilitler doğrudan 120 °C'yi aşan sıcaklıklardan etkilenmemelidir. Bu nedenle kilitler, genellikle fırın dış yüzeylerinde, izolasyon arkalarında bulunur. Basınca dayanım: Kilit düzenekleri, iç basınçta fazla olmayan aralıkta güvenli çalışacak şekilde hidrostatik olarak tasarlanır (0,3–0,5 bar basınç farkına değin dayanabilir). Algılayıcı bağımlılığı ve güvenlik: “Fail-safe” tasarım gereği, algılayıcı arızası durumunda sistem güvenlik protokolü devreye girer; kilit sistemleri açılmaz. Standartta belirtildiği üzere, “open-circuit failure” durumu aşırı sıcaklık alarmı gibi değerlendirilir. Mekanik aşınma: Sürekli çalışmalarda kilit düzeneklerinin bakım gerekliliği öngörülme zorundadır (NFPA, 2023).

### **Genel Özet**

Endüstriyel fırınların güvenli çalışması için gerekli olan kilit mekanizmaları ve operasyonel sınırlar, NFPA 86 (2023) standartları doğrultusunda belirli teknik kriterlere tabidir. Bu çerçevede, hazırlama fırınlarında ana ve algılayıcı olmak üzere çift kilit sistemi bulunması gerekirken; pişirme fırınlarında en az iki kilit sistemine ek olarak “proof of closure” (kapanma onayı) algılayıcısının kullanımı zorunludur. Sistemlerin açılma koşulları, hazırlama fırınları için 50 °C ve altı, pişirme fırınları için ise 80–120 °C arası sıcaklık değerleri ile sınırlandırılmış olup, iç basıncın 50–100 mbar eşiğinin altında olması ve güvenlik devresinin aktif olarak süreklilik sağlaması şarttır. Yüksek sıcaklık ve düşük basınç gibi zorlayıcı ortam koşullarında mekanik ve elektriksel sistemlerin performans kapasitesi korunmalı; olası bir algılayıcı hatası durumunda ise sistemin otomatik olarak güvenli moda geçmesini sağlayan “fail-safe” (hata durumunda güvenlik) prensibi uygulanmalıdır.

Burada, büyük bir olasılıkla denetim ve gözetim eksikliğinin, tehlikeye ilişkin önleme stratejisinin dikkate alınmamasının, güvenli çalışma yönergelerinin yetersiz olmasının, Üst Yönetimin güvenlik politika ve taahhüdünün yetersiz olmasının, hatalı davranışların saptanmasını sağlayacak denetim sisteminin olmamasının, Üst Yönetimin İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği konusunda taahhüdünün yetersiz olmasının, uygun bir organizasyon kurulmamasının bu ölümlü iş kazasının oluşmasındaki en önemli etkenler olduğu değerlendirilmektedir.

“İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği (RG. 29/12/2012–28512)” Madde 5, “İşveren; çalışma ortamının ve çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlama, sürdürme ve geliştirme amacı ile iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk değerlendirmesi yapar veya yaptırır. Risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmiş olması; işverenin, işyerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması yükümlülüğünü ortadan kaldırmaz. İşveren, risk değerlendirmesi çalışmalarında görevlendirilen kişi veya kişilere risk değerlendirmesi ile ilgili ihtiyaç duydukları her türlü bilgi ve belgeyi temin eder”.

Aynı Yönetmelik Madde 7 ise, “Risk değerlendirmesi; tüm işyerleri için tasarım veya kuruluş aşamasından başlamak üzere tehlikeleri tanımlama, riskleri belirleme ve analiz etme, risk kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması, dokümantasyon, yapılan çalışmaların güncellenmesi ve gerektiğinde yenileme

aşamaları izlenerek gerçekleştirilir. Çalışanların risk değerlendirmesi çalışması yapılırken ihtiyaç duyulan her aşamada sürece katılarak görüşlerinin alınması sağlanır” hükümleri getirmiştir.

Öte yandan İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği (RG. 25/04/2013 – 28628) “İşverenlerin Yükümlülükleri” başlığı altında Madde 5’te: “işverenin, işyerinde kullanılacak iş ekipmanının yapılacak işe uygun olması ve bu ekipmanın çalışanlara sağlık ve güvenlik yönünden zarar vermemesi için gerekli tüm tedbirleri alması; işverence iş ekipmanını seçilirken işyerindeki özel çalışma şartlarının, sağlık ve güvenlik yönünden tehlikelerin göz önünde bulundurarak, bu ekipmanın kullanımının ek bir tehlike oluşturmamasına dikkat edilmesi gerektiği; iş ekipmanının, çalışanların sağlık ve güvenliği yönünden tamamen tehlikesiz olması sağlanamıyorsa, kabul edilebilir risk seviyesine indirecek uygun önlemlerin alınması; (Ek: RG-18/2/2022-31754) iş ekipmanının geçici süreyle kullanılacak olunması, kiralanması veya benzeri durumlar işverenin genel yükümlülüklerini etkilemeyeceği” hükümleri getirilmiştir.

Aynı Yönetmelik İş Ekipmanının Periyodik Kontrolü başlığı altında: Madde 7 – (Başlığı ile Birlikte Değişik: RG-18/2/2022-31754) maddesinde, işverenin, işyerinde kullanılan iş ekipmanının periyodik kontrolü ile ilgili olarak, iş ekipmanının güvenliğinin kurulma ve montaj şartlarına bağlı olduğu durumlarda, ekipmanın kurulmasından sonra ve ilk defa kullanılmadan önce, önemli bakım ve onarımlardan sonra ve her yer değişikliğinde ekipmanın, periyodik kontrolleri yapmaya yetkili kişiler tarafından periyodik kontrolü yapılması; iskeleler, sütunlu çalışma platformları veya kule krenler gibi ilk kurulumdan sonra yükseltilebilen veya değişikliğe uğratılabilen iş ekipmanları, yükseltilmesi veya değişikliğe uğratılması sonrasında iş ekipmanının yapılan değişiklikleri içerecek şekilde periyodik kontrolleri yapmaya yetkili kişiler tarafından periyodik kontrolü yapılması; işverence, arızaya sebep olabilecek etkilere maruz kalarak tehlike yaratabilecek iş ekipmanının, periyodik kontrolleri yapmaya yetkili kişilerce periyodik kontrollerinin yapılması; çalışma şeklinde değişiklikler, kazalar, doğal olaylar veya ekipmanın uzun süre kullanılmaması gibi iş ekipmanındaki güvenliğin bozulmasına neden olabilecek durumlardan sonra, arızanın zamanında belirlenip giderilmesi ve sağlık ve güvenlik koşullarının korunması için periyodik kontrolleri yapmaya yetkili kişilerce gerekli periyodik kontrollerin yapılmasının sağlanması; yine işverence, periyodik kontrol sonuçları ıslak imzalı şekilde kayıt altına alınması ve yetkililer her istediğinde gösterilmek üzere uygun şekilde saklanması; bunun yanı sıra 15/1/2004 tarihli ve 5070 sayılı Elektronik İmza Kanununa uygun olarak güvenli elektronik imza ile imzalanmış ve elektronik ortamda saklanan kayıtların da geçerli olması” gibi konular hüküm altına alınmıştır.

Tesise ilişkin Patlamadan Korunma Dokümanı’nın “1.15 Seramik Fırınları, Sıra Nr. 2” başlığı altında alanda bulunan manometrenin arızalı olduğunun tespit edilerek, basınç ölçümünün doğru ve eksiksiz bir şekilde kontrol altında tutulabilmesi için manometre arızasının giderilmesinin önerildiği görülmüştür.

Bunun yanı sıra, anılan PKD'nin "1.19 Toz Alanı-1" başlığı altında alanda bulunan donanımların patlatmaz (ex-proof) olmadığı belirtilmiş ve aydınlatma düğmesine giden kablonun sabitlenmediği ve topraklamasının olmadığı tespit edildiği ve tüm bunlarla birlikte, alanda aydınlatma, aydınlatma armatürü, kesici valf ve basınç sviçlerinin patlatmaz (ex-proof) özellikte olmadığı, yanıcı ve parlayıcı kimyasalların bulunduğu alanda yer alan tüm aygıtların en az belirlenen tehlikeli bölge sınıfına uygun olarak seçilmesi ya da bölge sınırları dışına çıkarılması gerektiği belirtilmiştir.

Tesise ait PKD'nin "1.16 Pigment Fırını" başlığı altında fırınlardan birinin ve doğal gaz hatlarının çok yakınlarında sıcak yüzey bulunduğu, alanda gaz algılayıcısının yer almadığı, gaz kaçaklarını algılayıp alarm verecek ya da alarm sonucu sistemi otomatik olarak durduracak süreç ve mühendislik kontrol önlemlerinin alınması gerektiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak, hidrojen gazının patlamasıyla oluşan bu iş kazasında, bu makalenin yazarının kanısına göre, kısmen operatör hatasının bulunmasına karşın, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Yasasının ilgili maddelerine dayanarak işveren / işveren vekilinin %90 ağırlıkla asli kusurlu olduğu değerlendirilmektedir.

## KAYNAKÇA

- ArcelorMittal Europe, Steel for enamelling and enamelled steel – User manual (2015). [https://constructalia.arcelormittal.com/files/A103\\_Steelforenamelling\\_usermanual\\_EN\\_pdf3--7d70d8cc257b1d95905bed6c02743fa5.pdf](https://constructalia.arcelormittal.com/files/A103_Steelforenamelling_usermanual_EN_pdf3--7d70d8cc257b1d95905bed6c02743fa5.pdf)
- ASTM A424 / A424M – 18. (2021). Standard Specification for Steel, Sheet for Porcelain Enameling, Art. 4.1 Classification Types, ©ASTM International.
- Azatyán, V.V., Prokopenko, V. M., Timerbulatov, T.R. (2022). Physicochemical Mechanisms and Kinetic Laws Influencing the Extreme Rate of Reactions in the Combustion and Detonation of Gases, Russian Journal of Physical Chemistry A, 96.10: 2069-2081.
- Bachara, A., Mabrouka, A., Meneses, D.D.S., Verona, E., Sadallahd Y., Echeguta P., Bentisse F., (2017). Effect of Thermal Treatment on The Property of Enamel Coating on Steel Substrate, JMES 8 (11), 3884-3891.
- Cirrone D, Makarov D, Proust C, Molkov V, (2023). Minimum ignition energy of hydrogen-air mixtures at ambient and cryogenic temperatures, Int. J. of Hydrogen Energy, 48, 43: 16530-16544.
- Demirhan, E. (2015). Alüminyum yüzey üzerindeki emaye kaplamalara titanyum dioksit katkısı ile fotokatalitik özellik kazandırılması (Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi). <http://hdl.handle.net/11527/15406>
- Ditmer Trading & Consulting BV. (n.d.). Industrial enameling technology and equipment. <https://ditmer.nl/index.html>

- Griessen, R., Andreas, Z. (2003). Science and Technology of Hydrogen in Metals “Chapter X: Safety”, Table X.4, p.11.
- ICSC (International Chemical Safety Cards), Hydrogen, ICSC: 0001, (2025). [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=1&p\\_version=1](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1&p_version=1)
- IEC 61131-2 (2017). Industrial-process measurement and control – Programmable controllers – Part 2: Equipment requirements and tests.
- International Electrotechnical Commission. (2020). *IEC 60079-29-1: Gas detectors*. Performance requirements of detectors for flammable gases, Table A.1 – Performance requirements.
- International Organization for Standardization. (2023a). ISO 14119: Safety of machinery—Interlocking devices.
- International Organization for Standardization. (2023b). ISO 19496-1 (2017). Vitreous and porcelain enamels – Terminology – Part 1: Terms and definitions.
- Jiao F, Wang Z ve Zhen Y, (2017). Experimental Research on The Characteristics of Hydrogen-Air Explosion Pressure in Spherical Vessel-Pipe, 8th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering.
- Kara, Melda Köksel, (2014). Sürekli Tavlama Yöntemi ile Yeni Kalite Bir Emaye Çeliği Üretimi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi, s. Xix
- Karasu B, Saçkan İ, ve Taplı, M C. (2020). Emayenin Dünü ve Bugünü. El Cezeri Journal of Science, Cilt: 7 Sayı: 2, 923 – 939.
- Liu, M.-L., Tang, H.-Q., Yan, W., Subramanian, S. V. (2022). The effect of the second phase on the anti-scaling property of enamel steel. *Metallography, Microstructure and Analysis*, 11, 595–602. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00846-4>
- Lu Wang, Zhijun Jin, Guanping Wang, Xiaowei Huang, Yutong Su ve Qian Zhang. (2024). Hydrogen Gas Adsorption of the Triassic Chang 7 Shale Member in the Ordos Basin, China. *Sustainability* 2024, 16, 1960. <https://doi.org/10.3390/su16051960>.
- LZ 129 Hindenburg. (2026). In Wikipedia. Retrieved April 8, 2026, from [https://tr.wikipedia.org/wiki/LZ\\_129\\_Hindenburg](https://tr.wikipedia.org/wiki/LZ_129_Hindenburg)
- Manufacture nationale de Sèvres. (n.d.). Saggar. <https://www.sevresciteceramique.fr>
- Mason E A ve Kronstadt B, (1967). Graham’s Laws of diffusion and effusion, *J. Chem. Educ*, 44, 12:740.
- Max Appl. (1997). The Haber–Bosch Heritage: The Ammonia Production Technology, 50th Anniversary of the IFA Technical Conference, Sevilla, Spain.

- Molkov V, Makarov D ve Schneider H, (2006). LES modelling of an unconfined large-scale hydrogen–air deflagration, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39: 4366–4376.
- MSA, The Safety Co. (2007). *Gas Detection Handbook, Key Concepts & Reference Material for Installed Gas Monitoring Systems*, 9th ed.
- Nannan Yang, Jun Deng, Caiping Wang, Zujing Bai, Jiao Qu (2024). High pressure hydrogen leakage diffusion: Research progress, *Int. J. of Hydrogen En.* V.50, Part A. 1029 – 1046.
- National Fire Protection Association. (2023a). *NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code*, Art. A.29.7.
- National Fire Protection Association. (2023b). *NFPA 86: Standard for ovens and furnaces*. Chapter 8 – Safety Equipment and Application, Art. 6.4.4.
- SRJ Steel LLC, (2024). *The Enamelling Process*. <https://srjsteel.com/the-enameling-process/>
- Thompson Enamel, (2025). *Enameling Help and Information*.
- Türk, S., Engin, Y. (2024). *Hidrojen ve Kullanım Potansiyeli*, Türkçimento, [https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Hidrojen\\_ve\\_Kullanim\\_Potansiyeli.pdf](https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Hidrojen_ve_Kullanim_Potansiyeli.pdf)
- US EPA, *Porcelain Enameling Effluent Guidelines and Standards (40 CFR Part 466)*, <https://www.epa.gov/eg/porcelain-enameling-effluent-guidelines>
- WestAir Gases and Equipment. (2025). *Does Hydrogen Conduct Electricity?* <http://westairgases.com/blog/hydrogen-electrical-conductivity/>
- Zaghoo M ve Silvera I F, (2017). *Conductivity and dissociation in liquid metallic hydrogen and implications for planetary interiors*, Vladimir E. Fortov (edtr), *PNAS*, Rusya Bilimler Akademisi, Moskova, Rusya Federasyonu.

ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ

---

# İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ E-KİTAP SERİSİ

---



# İSG SERİSİ - 1



## II. ULUSAL İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ÖĞRENCİ KONGRESİ BİLDİRİ KİTABI

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



*Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>*

# İSG SERİSİ - 2



## İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ TEZ KÜLLİYATI (2015-2021)

DR. ÖĞR. ÜYESİ RÜŞTÜ UÇAN

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



*Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>*

# İSG SERİSİ - 3



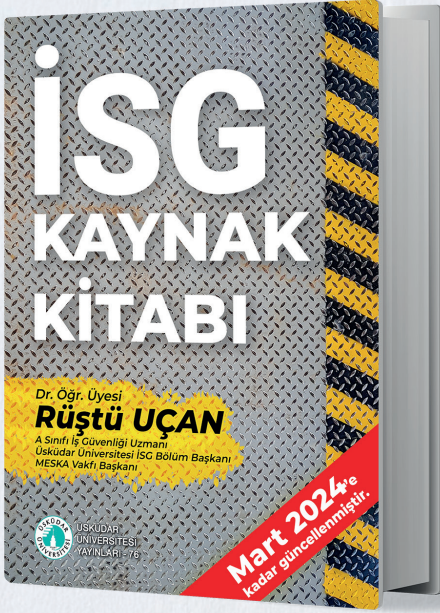
## VI. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınlari web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>

# İSG SERİSİ - 4



## İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KAYNAK KİTABI

DR. ÖĞR. ÜYESİ RÜŞTÜ UÇAN

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>



## PATLAYICI MADDELERİN TAŞINMASINDA VE DEPOLANMASINDA İŞ GÜVENLİĞİ UYGULAMALARI

**BURHAN İRGAT**  
DR. ÖĞR. ÜYESİ **RÜŞTÜ UÇAN**  
DOÇ. DR. **MÜGE ENSARİ ÖZAY**

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>

# İSG SERİSİ - 6



## VII. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



*Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>*

# İSG SERİSİ - 7



VIII. TÜRKİYE'DE  
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ  
ALANINDA YAŞANILAN  
SORUNLAR VE ÇÖZÜM  
ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınlari web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>



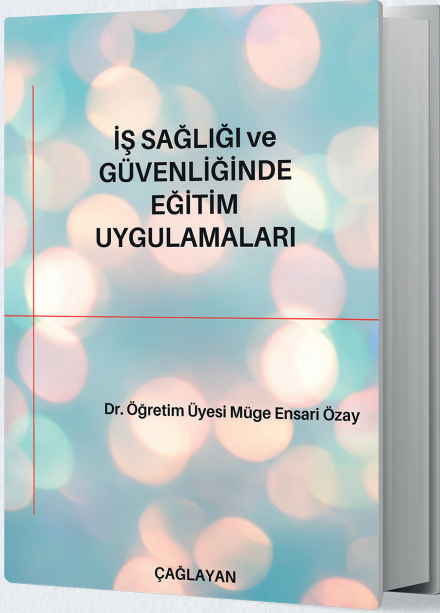
## ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA GÜVENLİ ÇALIŞMAYA İLİŞKİN ESASLAR VE UYGULAMALAR

DR. ÖĞR. ÜYESİ **RÜŞTÜ UÇAN**  
**ALİ ORHAN KARACIĞAN**  
**ERHAN ESKİCUMALI**

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



*Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>*



## İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNDE EĞİTİM UYGULAMALARI

DOÇ. DR. MÜGE ENSARİ ÖZAY

**KİTABI  
İNDİRMEK İÇİN  
QR KODUNU  
TARATIN!**



*Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi  
Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.  
<https://uuyayinlari.com/>*



### **DOÇ. DR. MÜGE ENSARİ ÖZAY**

İzmir doğumludur. 1997 yılında Boğaziçi Üniversitesi Kimya Bölümü'nden lisans mezunu olmuştur. 2000 yılında yine Boğaziçi niversitesi'nde evre Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2005 yılında Kimya Anabilim Dalı'nda doktora eğitimini tamamlamıştır. 2018 yılından bu yana Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü'nde oğretim yesi ve 2024 yılından itibaren AR-GE ve Yenilik Politikaları Direktörü olarak görev yapmaktadır, Ulusal ve uluslararası indeksli dergilerde yayımlanmış 29 bilimsel makalesi, 6 kitabı, 12 kitap bölümü bulunmaktadır. Ayrıca çeşitli kongrelerde sunumlar yapmış; organizasyon ve bilimsel kurul yelikleri üstlenmiş, devam eden ve tamamlanmış 5 TÜBİTAK projesinde danışmanlık ve araştırmacı görevleri yürütmüştür. Bu kitap, doktora dersleri kapsamında oğrenciler tarafından hazırlanan bilimsel kitap bölümleriyle başlamış; sürece alanında uzman akademisyen hocalarımızın kaleme aldığı bölümlerin eklenmesiyle kapsamlı ve bütünlüklü bir akademik eser niteliği kazanmıştır.



### **DR. TUğçE ORAL**

Lisans eğitimini İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde, yan dal eğitimini Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği alanında tamamlamıştır. İş Sağlığı ve Güvenliği alanında doktora derecesine sahiptir. Akademik çalışmalarını mühendislik, enerji sistemleri ve iş sağlığı ve güvenliği disiplinlerini bir araya getiren multidisipliner bir perspektifle yürütmektedir. A sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı ve baş denetçilik belgelerine sahip olan Oral'ın çalışma alanları; tehlikeli maddelerle çalışma, endüstriyel risk analizi, enerji sektöründe İSG uygulamaları ve özellikle hidrojen gibi yeni nesil enerji taşıyıcılarının güvenli yönetimi üzerine odaklanmaktadır. Halen Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.



**ÜSKÜDAR  
ÜNİVERSİTESİ  
YAYINLARI - 118  
İSG SERİSİ - 8**