Hidrojen Yakıtlı Araçlar ya da Hidrojen Yakıt Hücreli Araçlar (HYHA), geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara (İYM) çevreci bir alternatif olarak geliştirilen, hidrojen enerjisiyle çalışan bir elektrikli araç türüdür. Bu araçlar, egzozlarından yalnızca su buharı ve ılık hava yaydıkları için **"sıfır emisyonlu araçlar" (ZEV'ler)** olarak kabul edilir.

Bu makaleyi Spotify'da sesli olarak dinlemek için podcast'ine bu linkten ulaşabilirsiniz.

1.1 Nasıl Çalışır?

HYHA'lar, kimyasal enerjiyi elektriğe dönüştüren bir yakıt hücresi kullanır. Çalışma prensibi şu şekildedir:

- **Hidrojen ve Oksijen Tepkimesi**: Aracın yakıt tankında depolanan hidrojen gazı (H2) ve havadan alınan oksijen (O2), yakıt hücresi içinde **elektrokimyasal bir reaksiyona** girer.
- **Yakıt Hücresi Yapısı**: Araçlarda en yaygın kullanılan yakıt hücresi türü **Proton Değişim Membranı Yakıt Hücresi (PEMFC)**'dir. Bu hücre bir anot, bir katot ve aralarında sadece hidrojen iyonlarının ve birkaç protonun geçişine izin veren asidik bir elektrolitten oluşur. PEMFC'ler, kompakt yapıları, düşük çalışma sıcaklıkları (80°C), hafiflikleri, taşınabilirlikleri, uzun çalışma ömürleri, hızlı başlatılabilirlikleri ve yüksek enerji dönüşüm oranları nedeniyle tercih edilir. Ancak, elektrotların imalatında platin gibi pahalı metallerin kullanılması ve Nafion membranlarının maliyeti sınırlayıcı bir faktör olmuştur.
- **Elektrik Üretimi**: Anotta hidrojen molekülleri protonlara ve elektronlara ayrılır. Elektronlar harici bir devre aracılığıyla elektrik akımı olarak dışarı çekilir ve araca güç sağlayan **elektrik motorunu** çalıştırır. Protonlar ise membrandan katoda doğru hareket eder. Katotta oksijen, protonlar ve elektronlarla reaksiyona girerek **su (H2O) ve ısı** oluşturur. Yakıt hücresi içinde yakıt yakma gerçekleşmediği için egzozdan sadece su ve ısı çıkar.
- **Yardımcı Batarya**: HYHA'lar genellikle yakıt hücresinden gelen gücü düzenlemek, frenleme enerjisini geri kazanmak (rejeneratif frenleme) ve hızlanma sırasında ekstra güç sağlamak için küçük bir batarya ile donatılmıştır. Bu batarya, saf elektrikli araçlardaki gibi harici olarak şarj edilme ihtiyacı duymaz, yakıt hücresi tarafından sürekli olarak şarj edilir.

Bu makaleyi Youtube'da görüntülü olarak izlemek için videosuna bu linkten ulaşabilirsiniz.

1.2 Performans ve Özellikler

HYHA'lar, geleneksel araçlara benzer bir deneyim sunan önemli performans ve özelliklere sahiptir:

- **Hızlı Yakıt İkmal Süresi**: Yakıt ikmali geleneksel benzinli araçlara benzer şekilde **3 ila 5 dakika** sürer. Bu, bataryalı elektrikli araçlara (BEV'ler) kıyasla çok daha hızlıdır.
- **Uzun Menzil**: Tek bir dolumla ortalama **500 km'ye yakın, hatta bazı modellerde 600 km'ye kadar veya 800 km'ye (500 mil) kadar** menzil sunabilirler. Bu, geleneksel içten yanmalı motorlu araçların menziline yakındır. Hidrojenin dış sıcaklıktan etkilenmeyen bir menzili vardır.
- **Yüksek Verimlilik**: Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlara göre daha yüksek verimliliğe sahiptir (yakıt hücreleri için %65, içten yanmalı motorlar için %35). HYHA'lar, benzinli bir araca göre yakıt enerjisini iki ila üç kat daha verimli dönüştürür. Aracın tekerleklerine aktarılan toplam verimlilik ise %30'a yakındır.
- **Sessiz Çalışma**: Elektrik motoruyla çalıştıkları için içten yanmalı motorlu araçlardan çok daha sessizdirler. Ortalama 50-60 desibelde çalışır, buzdolabı veya hafif bir esinti seviyesindedir.
- **Az Bakım İhtiyacı**: Daha az hareketli parçaya sahip oldukları için bakım gereksinimleri daha düşüktür.
- **Hızlı İvmelenme**: Sıfır mil/saatte maksimum torka sahip olmaları hızlı ivmelenme sağlar.
- **Yakıt Saflığı**: Otomotiv uygulamalarında kullanılan PEM yakıt hücreleri, karbon monoksit ve karbon dioksit zehirlenmesine hassas olduğundan **çok saf hidrojen** gerektirir.

1.3 Çevresel Etki

HYHA'ların çevre üzerindeki etkisi, hidrojenin nasıl üretildiğine bağlı olarak değişmekle birlikte, geleneksel araçlara kıyasla önemli çevresel faydalar sunar.

- **Sıfır Egzoz Emisyonu**: Yakıt hücresi içindeki elektrokimyasal süreç yakıt yakmayı içermediğinden, egzozdan sadece su buharı ve ısı çıkar. Zararlı kirleticiler veya sera gazları salmazlar. Bu durum kentsel hava kalitesini iyileştirir.
- **Hidrojen Üretiminin Etkisi (Kuyudan Tekere Emisyonlar)**: HYHA'ların genel çevresel performansı, hidrojenin nasıl üretildiğine bağlıdır.
    - **Doğal Gazdan Üretim**: Şu anda endüstriyel hidrojenin çoğu doğal gazın buhar reformasyonu (SMR) ile üretilmektedir. Bu yöntem, geleneksel benzinli araçlara kıyasla karbon dioksit emisyonlarını **%50 oranında azaltabilir**. Ancak bu süreçte üretim sırasında CO2 yayılımı oluşur.
    - **Yenilenebilir Kaynaklardan Üretim (Elektroliz)**: Güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal, nükleer enerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretilmesi durumunda, gerçek bir sıfır emisyon çözümü sunulur. Bu yöntem, karbon dioksit emisyonlarını **%90'a kadar azaltabilir**.
    - **Elektrik Şebekesinin Karbon Yoğunluğu**: Elektroliz yoluyla hidrojen üretildiğinde, HYHA'ların emisyonları kullanılan elektrik şebekesinin sera gazı emisyonlarına karşı yüksek hassasiyet gösterir. Yüksek fosil yakıt bağımlılığı olan şebekelerde, elektrolizle üretilen hidrojenle çalışan HYHA'ların sera gazı

emisyonları geleneksel araçlardan bile yüksek olabilirken, bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler) aynı şebekeden şarj edildiğinde daha düşük emisyonlara sahip olabilir.
- **Kaynak Bağımlılığı ve Enerji Güvenliği**: Hidrojenin çeşitli yurt içi kaynaklardan (rüzgar, güneş, biyokütle, jeotermal, doğal gaz, kömür, nükleer enerji) üretilebilmesi, ithal petrole bağımlılığı azaltır ve enerji kaynaklarını çeşitlendirir. Bölgesel üretim potansiyeli enerji güvenliğini artırır.
- **Diğer Çevresel Faydalar**: Atık pillerin çevresel zorlukları HYHA'larda kullanılan daha küçük bataryalarla azalır. Toksik olmayan emisyonlar ve hızlı dağılım, çevre kirliliğini azaltır.

1.4 Güvenlik

Hidrojenin yanıcılığıyla ilgili kamuoyu endişelerine rağmen, yapılan araştırmalar ve testler, günümüzdeki hidrojen araçlarının diğer yakıtlarla çalışan araçlar kadar güvenli olduğunu göstermektedir. Hatta bazı yönleriyle geleneksel yakıtlardan daha güvenli olduğu değerlendirilmektedir.

- **Hidrojenin Fiziksel Özellikleri**:
  - **Havadan Daha Hafif**: Hidrojen, havadan yaklaşık 14 ila 14.4 kat daha hafiftir. Sızıntı durumunda hızla yükselir ve dağılır, bu da kapalı bir alanda tehlikeli konsantrasyonlarda birikme olasılığını azaltır.
  - **Toksik Değildir**: Hidrojen toksik veya zehirli değildir, toprağı veya suyu kirletmez.
  - **Yüksek Oto-ateşleme Sıcaklığı**: Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (575°C'nin üzerinde) dizel (345°C) veya benzin (500°C) gibi diğer yaygın yakıtlardan önemli ölçüde daha yüksektir.
  - **Düşük Patlayıcılık Riski**: Açık atmosferde hidrojen patlaması son derece düşüktür. Kapalı bir hacimde aynı miktarda yakıt enerjisi ile karşılaştırıldığında, belirli bir hacimdeki hidrojenin patlayıcı enerjisi, aynı hacim benzin buharıyla dolu olsaydıkinden **22 kat daha düşüktür**.
  - **Görünmez Alev**: Hidrojen alevi neredeyse görünmez olabilir, bu da bir tehlike arz edebilir; ancak kimyasallar eklenerek veya gelişmiş algılama sistemleri ile giderilebilir.
- **Araçlardaki Güvenlik Tasarımları**:
  - **Dayanıklı Yakıt Depoları**: HYHA'lardaki yakıt depoları, çelikten on kat daha güçlü olan **karbon fiber takviyeli plastikten** yapılmıştır. Bu depolar, darbeler, yangınlar ve delinmeler dahil olmak üzere çok sayıda teste tabi tutulur. Yaklaşık 700 bar (10.000 psi) yüksek basınçları güvenli bir şekilde içerirler.
  - **Güvenlik Valfleri ve Kontrollü Salınım**: Yangına maruz kalmaları durumunda, güvenlik valfleri iç basıncı hızla tahliye eder, bu da patlama yerine hidrojenin hızlı bir şekilde dağılmasına yol açar. Sistemler, hidrojeni kontrollü bir şekilde serbest bırakacak şekilde tasarlanabilir.
  - **Kaçak Tespiti**: HYHA'lar, hidrojen sızıntılarını tespit etmek için hidrojen

sensörleri ve kaçak tespit teknolojileri ile donatılmıştır.

- **Güvenlik Karşılaştırmaları ve Testler**: HYHA'lar, geleneksel araçlar için gerekli olan aynı sıkı güvenlik standartlarına ve testlerine tabi tutulur (örn. çarpışma testleri). ABD Enerji Bakanlığı (DOE), hidrojenin bazı özelliklerinin onu benzin, doğal gaz ve dizel gibi yaygın olarak kullanılan yakıtlara göre daha güvenli hale getirdiğini belirtmiştir. Bir deneyde, delinmiş benzin hattından çıkan yangın test aracını yok ederken, arızalı hidrojen bağlantısından kaynaklanan hidrojen yangını iki dakikada sona ermiş ve aracı neredeyse hasarsız bırakmıştır.
- **Yakıt İkmal Altyapısının Güvenliği**: Hidrojen yakıt ikmal istasyonlarındaki ekipman, güvenlik kodları ve standartlarına uygun olarak tasarlanmış, inşa edilmiş ve kurulmuştur. Dolum sırasında meydana gelen ısınmayı önlemek için, hidrojen dağıtıcıları, alıcı tankın sıcaklığının tipik maksimum izin verilen 85°C sıcaklığının üzerine çıkmasını engellemek için güvenlik özellikleriyle donatılmıştır (-40°C'ye kadar ön soğutma gereklidir).
- **Kamu Algısı**: HYHA'lara yönelik kamuoyu endişeleri genellikle Hindenburg felaketi veya hidrojen bombasıyla ilişkilendirme gibi tarihi olaylardan kaynaklanmaktadır. Ancak, modern hidrojen teknolojisinin bu tür olaylarla hiçbir ilgisi yoktur ve önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

- **Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV) ile Karşılaştırma**

HYHA'lar ve BEV'ler, ulaşımda sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedefleyen iki önemli tamamlayıcı teknolojidir.

1.5 Güç Üretimi ve Depolama:

    - **HYHA'lar**: Kendi elektriklerini bir yakıt hücresi kullanarak üretir ve hidrojeni yakıt tanklarında depolarlar.
    - **BEV'ler**: Elektriği bataryalarında depolarlar ve bataryaları harici bir kaynaktan şarj edilmesi gerekir.
- **Yakıt Dolum/Şarj Süresi**:
    - **HYHA'lar**: Ortalama **3 ila 5 dakika** sürer.
    - **BEV'ler**: Şarj süreleri önemli ölçüde daha uzundur (30 dakikadan 20 saatin üzerine çıkabilir).
- **Menzil**:
    - **HYHA'lar**: Ortalama **500 km civarında (300-400 mil)** menzile sahiptir ve dış sıcaklıktan etkilenmeyen bir menzili vardır.
    - **BEV'ler**: Menzil modeller arasında büyük farklılık gösterir, bazı uzun menzilli modeller 500 km'nin üzerine çıkabilir, ancak **"menzil endişesi"ne** yol açabilir.
- **Maliyet**:
    - **HYHA'lar**: Halihazırda yüksek satın alma fiyatlarına sahiptir (ortalama **58.300-70.000 ABD Doları**). Yakıt maliyetleri de daha yüksektir (mil başına 22.1 sent veya kg başına 12.85-16 ABD Doları).
    - **BEV'ler**: Satın alma fiyatları genellikle HYHA'lardan düşüktür. Yakıt maliyetleri (elektrik) ise çok daha düşüktür (mil başına 4.3 sent).

- **Altyapı**:
  - **HYHA'lar**: Yaygın bir hidrojen yakıt ikmal altyapısı gerektirir, bu da şu anda sınırlıdır.
  - **BEV'ler**: Mevcut elektrik şebekesinden faydalanır, ancak yaygın şarj altyapısına ihtiyaç duyar.
- **Güvenlik**: Her iki araç türü de katı güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır ve geleneksel araçlar kadar güvenli kabul edilirler. BEV bataryaları ciddi kazalarda kendiliğinden tutuşabilir ve söndürülmesi zor olabilir. Kullanılmış BEV bataryalarının geri dönüştürülmesi bir zorluk teşkil eder.

1.6 Ağır Hizmet Araçlarında Uygulanabilirlik:

  - **HYHA'lar**: Yüksek enerji yoğunlukları ve hızlı yakıt ikmal kapasiteleri nedeniyle ağır hizmet araçları (kamyonlar, otobüsler, trenler, feribotlar, forkliftler) için daha uygundur.
  - **BEV'ler**: Batarya ağırlığı, şarj süreleri ve menzil sınırlamaları nedeniyle ağır hizmet toplu taşıma çözümleri için daha az uygulanabilirdir.
- **Gelişim Aşaması**: BEV'lerin ticari benimsenmeleri HYHA satışlarını çok geride bırakmıştır ve daha olgun bir teknolojidir. İlk yakıt hücreli araç 1959'da geliştirilmiş, ticari olarak 2014'te (Toyota) piyasaya sürülmüştür.

1.7 Hidrojen Üretim Yolları ve Altyapı

Hidrojen, birincil enerji kaynağı değil, enerji girişi gerektiren bir enerji taşıyıcısıdır.

- **Hidrojen Üretim Yolları**:
  - **Buhar Metan Reformasyonu (SMR)**: Dünya genelindeki ticari hidrojen üretiminin yaklaşık **%95'ini oluşturan** en yaygın yöntemdir. Doğal gazdan hidrojen, 75 yılı aşkın süredir üretilmektedir. Tesis kapısı maliyeti 1-2 $/kg olarak tahmin edilmektedir.
  - **Elektroliz**: Suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için elektrik akımı kullanan bir işlemdir. Toplam hidrojen üretiminin yaklaşık %4'ünü oluşturur. Yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar vb.) kullanıldığında **"yeşil hidrojen"** olarak adlandırılır ve sıfır emisyonlu bir çözüm olabilir. Elektrolizle hidrojen üretim maliyetleri SMR'ye göre daha yüksektir (4-6 $/kg).
  - **Diğer Kaynaklar**: Petrol rafinasyonu (%30), kömür gazlaştırması (%18), biyogaz, biyokütle, belediye katı atıkları (MSW) gazlaştırması ve çöp gazı gibi kaynaklardan da hidrojen üretilebilir.

1.8 Hidrojen Depolama ve Dağıtım:

  - **Araç İçi Depolama**: Araçta yeterli sürüş menzili sağlamak için hidrojenin genellikle **700 bar yüksek basınçta** silindirik tanklarda depolanması gerekir. Bu tanklar darbelere, yangına ve delinmelere karşı dayanıklı olacak şekilde

tasarlanmıştır.
    - **Dağıtım Yöntemleri**: Boru hatları (en ucuz), yüksek basınçlı tüp römorkları (kamyonla) ve sıvılaştırılmış hidrojen tankerleri (süper soğutulmuş) ile dağıtım yapılabilir.
- **Yakıt İkmal Altyapısı (HRS)**: HYHA'ların yaygınlaşması için hidrojen yakıt ikmal altyapısı zorunludur.
    - **Mevcut Durum**: 2017 itibarıyla dünya genelinde 330, 2018'de 36 (Kaliforniya'da), 2024 itibarıyla ABD'de yaklaşık 60 halka açık HRS bulunmaktadır. Avrupa genelinde yaklaşık 150 HRS vardır, çoğu Almanya'dadır. Birleşik Krallık'ta 12 HRS bulunmaktadır.
    - **İstasyon Tipleri**: Bir HRS, hidrojeni yerinde üretebilir (yerinde üretim, genellikle elektrolizle) veya merkezi bir üretim tesisinden sevk edilen hidrojeni alabilir (merkezi üretim). Yerinde üretim taşıma maliyetlerini ortadan kaldırır.
    - **Maliyet ve Zorluklar**: HRS altyapısının kurulmasının araç başına yaklaşık 400-900 ABD Doları ek maliyet getireceği tahmin edilmektedir. Yakıt istasyonlarının sermaye maliyetleri de yüksektir. Yakıt ikmali sırasında hidrojen gazının -40°C'ye kadar ön soğutulması (T40 dolumu) gereklidir. Kompresörler, istasyon arızalarının birincil kaynağıdır.

1.9 Maliyetler ve Piyasaya Sürülme

- **Yüksek Maliyetler**: HYHA'lar hala göreceli olarak pahalıdır. 2019 itibarıyla, HYHA modellerinin ortalama maliyeti **68.309 ila 70.000 ABD Doları** arasında değişmekteydi. Bu, benzer sınıftaki geleneksel araçların maliyetinin neredeyse iki katıdır (25.000-33.000 ABD Doları). Yakıt maliyetleri de geleneksel araçlardan iki kat, BEV'lerden beş kat daha fazladır. Platin gibi pahalı katalizörler ve Nafion membranlarının yüksek maliyeti sınırlayıcı bir faktördür.
- **Maliyet Düşüş Potansiyeli**: Yakıt hücresi yığınlarının üretim maliyetleri 2002'den bu yana **%80 oranında düşürülmüştür**. ABD Enerji Bakanlığı (USDOE) tahminlerine göre, yakıt hücresi yığını üretimi 25.000 adedi aştığında, maliyetlerde **%50'den fazla ek düşüş** beklenmektedir. Argonne Ulusal Laboratuvarı analizine göre, HYHA'ların 2030 yılına kadar geleneksel araçlarla maliyet açısından karşılaştırılabilir hale gelmesi muhtemeldir.

1.10 Pazar Durumu ve Hedefler:

    - **Mevcut Durum**: 2018 itibarıyla dünya genelinde 11.200 HYHA bulunmaktaydı. 2024'te bu sayı yaklaşık 15.000'e ulaşmıştır.
    - **Hedefler**: Birçok ülke iddialı hedefler belirlemiştir:
        - **ABD**: 2030'a kadar 40.000 HYHA ve 100 HRS. Kaliforniya'nın hedefi 2030'a kadar 1.000 HRS ve 1.000.000 HYHA'dır.
        - **Japonya**: 2030'a kadar 800.000 HYHA ve 900 HRS.
        - **Çin**: 2030'a kadar 1.000.000 HYHA ve 500 HRS.
        - **Almanya**: 2030'a kadar 1.000 HRS.

        - **Avrupa Birliği**: 2025'e kadar 100.000 araç ve 250 şarj istasyonu.
    - **Piyasa Büyüme Tahminleri**: Juniper Research, küresel hidrojenle çalışan araç sayısının 2022'deki 60.000'den **2027'de 1 milyonu aşacağını** öngörmektedir.
- **"Tavuk-Yumurta" Problemi**: Yeterli yakıt istasyonları olmadan otomobil üreticileri seri üretime yatırım yapmaktan çekinirken, müşteri eksikliği nedeniyle enerji şirketleri de HRS altyapısını kurmaktan çekinmektedir. Bu durum, hükümet desteği olmadan çözülmesi zor bir eşgüdüm sorunudur.
- **Hükümet Desteği**: ABD, Japonya, Çin, Güney Kore, Almanya ve Fransa gibi ülkeler, HYHA'ların ve HRS'lerin yaygınlaşmasını teşvik etmek için çeşitli programlar ve teşvikler (Ar-Ge, satın alma teşvikleri, altyapı geliştirme) uygulamaktadır. Hükümetler, hidrojen ve yakıt hücresi programlarına yıllık yaklaşık 850 milyon dolar harcamaktadır.

1.11 Uygulama Alanları

HYHA'lar, binek araçlarının ötesinde, çeşitli ulaşım ve endüstriyel alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir:

- **Yol Taşımacılığı**:
    - **Toplu Taşıma Otobüsleri**: Hızlı yakıt ikmali ve uzun menzil kapasiteleri sayesinde otobüsler için uygun bir çözümdür. ABD, Avrupa, Japonya ve Çin'de 450'den fazla HYHA otobüsü halihazırda kullanılmaktadır. Güney Kore, 2030 yılına kadar 26.000 sıkıştırılmış doğal gaz otobüsünü hidrojen yakıt hücreli otobüslerle değiştirmeyi planlamaktadır.
    - **Taksi ve Paylaşımlı Araç Sistemleri**: Kentsel ulaşımda sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Paris'teki Hype, 2015 yılında kurulan, dünyanın ilk hidrojenle çalışan taksi filosudur.
    - **Kamyonlar**: Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı yakıt ikmal kapasitesi, orta ve ağır hizmet kamyonları için umut vadeden bir potansiyel sunmaktadır.
    - **Vanlar ve Belediye Araçları**: Vanlar ve süpürme araçları gibi filo uygulamaları için de kullanılmaktadır.
    - **Otonom Araçlar**: Gelecekte otonom araçlarda baskın olabileceği öngörülmektedir.
- **Endüstriyel ve Ticari Uygulamalar (Yol Dışı)**:
    - **Forkliftler**: Hidrojenle çalışan forkliftler, bataryalı elektrikli forkliftlere göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve daha hızlı yakıt ikmali yapabilirler. Amazon ve Walmart gibi firmaların depoları da dahil olmak üzere, halihazırda **25.000'den fazla hidrojenli forklift** kullanılmaktadır.
    - **Diğer Uygulamalar**: Dronlar, trenler, feribotlar, deniz taşıtları ve sabit/taşınabilir güç sistemleri (evler, işletmeler, veri merkezleri, telekomünikasyon kuleleri, hastaneler, askeri uygulamalar) için de yakıt hücreleri araştırılmaktadır.

1.12 Zorluklar ve Gelecek Beklentileri

HYHA'ların yaygınlaşması önünde hala aşılması gereken önemli zorluklar bulunmaktadır.

- **Altyapı Eksikliği**: Yeterli yakıt ikmal altyapısının bulunmaması, en temel nedenlerden biridir. Ayrıca, geleneksel araç servislerinin yüksek patlama riski nedeniyle hidrojen araçlarına hizmet verememesi ve özel servis merkezleri ihtiyacı da mevcuttur.
- **Yüksek Maliyetler**: Hem araçların satın alma maliyetleri hem de hidrojen yakıt maliyetleri hala yüksektir. Platin gibi pahalı katalizörler ve membran malzemeleri maliyeti artırmaktadır.
- **Güvenlik Endişeleri ve Yanlış Algılar**: Halk arasında hidrojen teknolojisinin tehlikeli olduğu ve hidrojen bombasıyla benzer olduğu yönünde yaygın bir korku bulunmaktadır. Hidrojen alevinin neredeyse görünmez olması da bir tehlike arz edebilir.
- **Teknik ve Operasyonel Zorluklar**: Hidrojenin depolama verimliliği düşüktür ve yüksek basınç altında depolanması gerekmektedir. Yakıt ikmali sırasında hidrojen gazının -40°C'ye kadar ön soğutulması (T40 ikmal) gerekmektedir, çünkü hidrojen genleşirken ısınma eğilimindedir. Bu ön soğutma, yakıt ikmal istasyonlarındaki arızaların ana nedenlerinden biridir.
- **Çevresel Etkiler (Üretim Kaynaklı)**: Hidrojenin üretim yöntemi, "kaynaktan tekerleğe" (well-to-wheel) emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yenilenebilir kaynaklardan üretim sıfıra yakın emisyon sağlarken, karbon yoğun elektrik şebekelerinden elektroliz yoluyla hidrojen üretimi ICE'lerden daha fazla emisyona neden olabilir.
- **BEV'lerle Rekabet**: BEV'ler pazar payında önemli bir avantaj elde etmiştir ve batarya teknolojileri menzil ve şarj süreleri açısından gelişmeye devam etmektedir.

Gelecek Beklentileri: HYHA'lar, uzun menzilleri ve hızlı yakıt ikmal süreleri sayesinde geleneksel içten yanmalı araçlara benzer bir deneyim sunarak BEV'lerin bazı sınırlamalarını aşma potansiyeline sahiptir. Küresel olarak büyüme beklenmektedir. Teknolojik gelişmeler (maliyet azalımı, dayanıklılık artışı, yeşil hidrojen üretimi, daha iyi depolama çözümleri) ve güçlü hükümet destekleri, bu teknolojinin tam potansiyeline ulaşabilmesi için kritik öneme sahiptir. Filo uygulamaları gibi merkezi kullanımlar, bu teknolojinin ilk ticarileşme alanları olma potansiyeli taşımaktadır.