

Geleceğin Ulaşım Alternatifleri: Batarya ve Yakıt Hücresi Araçların Ekonomik ve Çevresel Değerlendirmesi

Emir SAKAOĞLU^{1*}, Tarık AKBAŞ², Muhammet AK³

Öz

Bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler), yakıt hücresi araçlar (FCV'ler), karışık elektrikli araç senaryoları (MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlar (ICV), sürdürülebilir ulaşım çözümleri açısından farklı çevresel ve ekonomik etkiler sunmaktadır. BEV ve FCV teknolojileri, geleneksel ICV'lere kıyasla sera gazı salınımını ve hava kirliliğini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu teknolojilerin çevresel ve ekonomik performansı, enerji kaynaklarının türüne ve üretim yöntemlerine bağlıdır. Çeşitli çalışmalar, BEV'lerin yaşam döngüsü boyunca genellikle FCV'lere göre daha düşük maliyetli ve çevreye daha az zararlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, hidrojen bazlı yakıt hücreleri, uzun mesafe taşımacılığı ve hızlı yakıt ikmali açısından avantajlar sağlayabilir. MIX senaryosu, farklı elektrikli araç türlerinin optimum kombinasyonunu değerlendirerek, en verimli karbon azaltım stratejilerini ortaya koymaktadır. ICV'ler ise hâlâ birçok ülkede baskın ulaşım yöntemi olsa da, çevresel etkileri ve artan yakıt maliyetleri nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır. Bu çalışmada, BEV, FCV, MIX ve ICV araç türlerinin yaşam döngüsü maliyetleri ve çevresel etkileri karşılaştırılarak, hangi teknolojinin gelecekte daha uygun bir seçenek olabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya Elektrikli Araçlar (BEV), Yakıt Hücresi Elektrikli Araçlar (FCEV), Karışık Elektrikli Araç Senaryosu (MIX), İçten Yanmalı Motorlu Araçlar (ICV), Sera Gazı Emisyonları, Yenilenebilir Enerji Kaynakları (RES).

Future Transport Alternatives: Economic and Environmental Assessment of Battery and Fuel Cell Vehicles

Abstract

The transition from fossil fuel-based transportation to sustainable mobility has become a priority due to increasing global greenhouse gas emissions and environmental concerns. Battery electric vehicles (BEVs), fuel cell vehicles (FCVs), mixed electric vehicle scenarios (MIX), and internal combustion vehicles (ICVs) offer different environmental and economic impacts in terms of sustainability. BEVs and FCVs are considered the most promising alternatives due to their potential to reduce greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels. However, the overall environmental and economic performance of these technologies depends significantly on energy production methods and infrastructure availability. This study compares BEVs, FCVs, MIX, and ICVs through a life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCC) to evaluate their environmental and economic feasibility. The results indicate that BEVs produce the lowest carbon emissions, whereas FCVs can be a viable alternative when hydrogen is produced using renewable energy sources. Meanwhile, ICVs remain the dominant transportation mode in many countries but are not a sustainable solution in the long term due to their high environmental footprint and increasing fuel costs. The study highlights the necessity of further advancements in battery technology, hydrogen production, and sustainable infrastructure investments to accelerate the adoption of low-emission vehicles.

Keywords: Battery Electric Vehicles (BEV), Fuel Cell Vehicles (FCV), Mixed Electric Vehicle Scenarios (MIX), Internal Combustion Vehicles (ICV), Greenhouse Gas Emissions, Renewable Energy Sources.

¹Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çorum, Türkiye, emirsakaoglu@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3177-8325>

²Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çorum, Türkiye, takbass03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3360-2671>

³Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çorum, Türkiye, muhammetak452@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-8591-7355>

1. Giriş

Ulaştırma sektörü, hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biri olup, küresel sera gazı (GHG) emisyonlarına en büyük oranda neden olan sektörlerden biridir. Dünya genelinde ulaşım, nihai enerji tüketiminin yaklaşık %27'sini oluştururken, fosil yakıtlara olan bağımlılığı nedeniyle dünya çapındaki karbon dioksit salınımlarının yaklaşık %25'ine neden olmaktadır (Chandra et al., 2010; Hawkins et al., 2013). Avrupa'da ise ulaştırma sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %33'ünden ve sera gazı emisyonlarının dörtte birinden sorumlu olup, bu emisyonların %72'si karayolu taşımacılığı ve çoğunlukla binek araçlardan kaynaklanmaktadır (Ajanovic & Haas, 2018). Diğer enerji sektörlerinden farklı olarak, ulaştırma sektörüne ait emisyonlar, alınan çeşitli politika önlemlerine rağmen artmaya devam etmektedir (Hall & Lutsey, 2017). Bu durum, sera gazı salınımlarını azaltmak adına ulaşım sistemlerinde köklü değişiklikleri zorunlu kılmaktadır.

Ulaştırma sektöründeki karbon salınımının azaltılması, sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişi zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, fosil yakıtlı araçların aşamalı olarak kullanım dışı bırakılması hedeflenmektedir. Norveç, Danimarka, Hollanda ve Slovenya gibi bazı Avrupa ülkeleri, bu yönde önemli kararlar almıştır (Cansino et al., 2010). Günümüzde, geleneksel araçlara en olgun ve hazır alternatifler arasında elektrikli araçlar (EV) yer almaktadır. Bataryalı elektrikli araçlar (BEV), yakıt hücreli araçlar (FCV) ve karışık elektrikli araç senaryoları (MIX), farklı kullanım alanları ve enerji verimlilikleri açısından çeşitli avantajlar sunmaktadır. Özellikle bataryalı elektrikli araçlara (BEV) geçiş, kentsel alanlarda hem yerel hava kirliliğini hem de gürültü kirliliğini azaltırken, enerji yenilenebilir kaynaklardan sağlandığında küresel sera gazı emisyonlarını da önemli ölçüde düşürebilir (Miotti et al., 2017). Elektrikli araçların yaygınlaşması, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin en önemli stratejilerinden biri olarak kabul edilmektedir ve birçok hükümet, EV kullanımını artırmayı amaçlayan hedefler belirlemiştir. Paris Deklarasyonu'na göre, 2030 yılı itibarıyla dünya genelindeki EV stoğunun 100 milyonu aşması öngörülmektedir (Offer et al., 2010).

Çevre dostu ve modern araç tasarımı, güç aktarım mekanizmaları ve yakıt üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte ilerlemeyi gerektirmektedir. Araçların çevresel etkilerini değerlendirirken, doğal kaynakların çıkarılmasından yakıt üretimine, yakıtın motorda mekanik enerjiye dönüştürülmesine kadar olan yaşam döngüsü aşamalarını dikkate almak önemlidir. Bu süreçlerdeki verimlilik ve çevresel etkiler, hem motor performansı hem de yakıtın üretim aşamalarındaki etkilerle yakından ilişkilidir (Lucas et al., 2012). Ayrıca, araç üretimi ve kullanım ömrü sonundaki geri dönüşüm aşamaları da çevresel etkilerin kapsamına dahil edilmektedir (Chandra et al., 2010).

Sürdürülebilir ulaşım teknolojilerine geçiş, ekonomik açıdan da rasyonel ve maliyet etkin olmalıdır. Taşımacılık sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının %13'ünden sorumlu olduğu için Paris Anlaşması hedeflerine ulaşılması adına bu emisyonların azaltılması şarttır (Haugneland et al., 2017b). İçten yanmalı motorlu araçlardan (ICV) elektrikli araçlara (EV), özellikle BEV, FCV ve MIX senaryolarına geçiş, taşımacılığın karbon ayak izini azaltmada büyük bir potansiyele sahiptir (Ajanovic & Haas, 2018). Literatür çalışmaları, yenilenebilir enerji kaynakları kullanıldığında EV'lerin, ICV'lere kıyasla sera gazı salınımlarını %72'ye kadar azaltabileceğini göstermektedir (Burkhardt et al., 2016). Ancak, EV'lerin farklı çevresel etkileri artırabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır (Haddadian et al., 2015).

Bu çalışmada, BEV, FCV, MIX ve ICV'lerin çevresel etkileri ile yaşam döngüsü maliyetleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı araç teknolojilerinin maliyet-optimal senaryolarını değerlendirerek, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine en uygun alternatifleri belirlemektir. Bu doğrultuda, elektrikli araçların yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu, karbon salınımını azaltma potansiyelleri ve uzun vadeli maliyet analizleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın özgün katkılarından biri, farklı elektrikli araç senaryolarını (BEV, FCV, MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlarla (ICV) olan rekabetlerini birlikte ele alarak, çevresel ve ekonomik performanslarını yaşam döngüsü perspektifinde karşılaştırmasıdır. Ayrıca, modelleme ve simülasyon yaklaşımlarının kullanılmasıyla, gelecekteki enerji dönüşüm stratejileri için öneriler sunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, bataryalı elektrikli araçlar (BEV), yakıt hücreli araçlar (FCV), karışık elektrikli araç senaryoları (MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlar (ICV) olmak üzere dört farklı araç teknolojisinin çevresel ve ekonomik performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma, yaşam döngüsü analizi (LCA) ve yaşam döngüsü maliyetlendirme (LCC) yaklaşımlarına dayanmaktadır ve ISO 14040 ile ISO 14044 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Robinius et al., 2018).

2.1. Veri Kaynakları ve Modelleme Yöntemi

Çalışmada kullanılan veriler, uluslararası literatürden, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporlarından derlenmiştir. Elektrikli ve içten yanmalı araçların çevresel etkilerini modellemek için SimaPro yazılımı kullanılmıştır (Hawkins et al., 2013). Modelleme sürecinde farklı enerji üretim kaynakları (kömür, doğal gaz, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji bazlı senaryolar) dikkate alınmıştır (Miotti et al., 2017).

LCA yöntemi kapsamında araçların tüm yaşam döngüsü şu bileşenler üzerinden değerlendirilmiştir (Notter et al., 2015a):

- Hammadde çıkarımı ve üretimi (batarya üretimi, hidrojen üretimi, içten yanmalı motor üretimi vb.),
- Kullanım aşaması (yakıt tüketimi, elektrik tüketimi, doğrudan ve dolaylı emisyonlar),
- Geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri (batarya geri dönüşümü, hidrojen yakıt sistemleri vb.).

2.2. Analiz İçin Belirlenen Sınır Şartları

Bu çalışmada yapılan LCA ve LCC analizleri için belirlenen sınır şartları şunlardır:

- Sistem Sınırları: Analiz, araçların tüm yaşam döngüsünü (Well-to-Wheel - WTW) kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Yani, araçların üretim, kullanım ve bertaraf aşamaları incelenmiştir (Miotti et al., 2017).
- Zaman Çerçevesi: Değerlendirme, 2025 ve 2035 yıllarına yönelik projeksiyonlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.
- Coğrafi Kapsam: Çalışma, Avrupa enerji sistemleri ve politikaları baz alınarak modellenmiştir.
- Enerji Senaryoları: 4 farklı enerji üretim senaryosu kullanılmıştır:
 1. Kömür bazlı enerji üretimi,
 2. Doğal gaz bazlı enerji üretimi,
 3. Hidroelektrik enerji ağırlıklı üretim,
 4. Tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim (güneş, rüzgar vb.).
- Araç Kullanım Ömrü: Her araç türü için ortalama kullanım süresi 15 yıl ve 200.000 km olarak belirlenmiştir (Lucas et al., 2012).
- Emisyon Faktörleri: Kullanılan emisyon değerleri, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine dayanmaktadır (Ajanovic & Haas, 2018).

Bu sınır şartları, modellemenin doğruluğunu sağlamak için dikkate alınmıştır.

2.3. Karşılaştırma Senaryoları ve Parametreler

Modelleme çalışmasında, BEV, FCV, MIX ve ICV araç türlerinin maliyet-optimal senaryoları oluşturulmuştur. Senaryolar şu şekilde yapılandırılmıştır:

- BEV Senaryosu: Batarya elektrikli araçların baskın olduğu bir sistem.
- MIX Senaryosu: BEV ve FCV'lerin dengeli olarak kullanıldığı bir senaryo.
- FCV Senaryosu: Hidrojen yakıt hücresi araçların daha yaygın olduğu bir sistem.

- ICV Referans Senaryosu: İçten yanmalı motorlu araçların hâlâ yaygın olduğu bir sistem.

Her senaryo için karbon emisyonları, enerji tüketimi ve maliyet hesaplamaları yapılmış, LCA ve LCC verileri karşılaştırılmıştır (Robinius et al., 2018).

2.4. Modelleme ve Simülasyon Araçları

Çalışmada, ulaşım sektörünün enerji tüketimi ve çevresel etkilerini modellemek için Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) ve CPLEX çözücülerini kullanılmıştır (Miotti et al., 2017).

Ek olarak:

- LCA analizleri için SimaPro yazılımı,
- LCC analizleri için finansal optimizasyon modelleri kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, bataryalı elektrikli araçlar (BEV), yakıt hücresel araçlar (FCV), karışık elektrikli araç senaryoları (MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlar (ICV) için yapılan LCA ve LCC analizleri karşılaştırılmıştır. Karbon emisyonları, enerji tüketimi ve toplam sahip olma maliyetleri temelinde değerlendirme yapılmıştır.

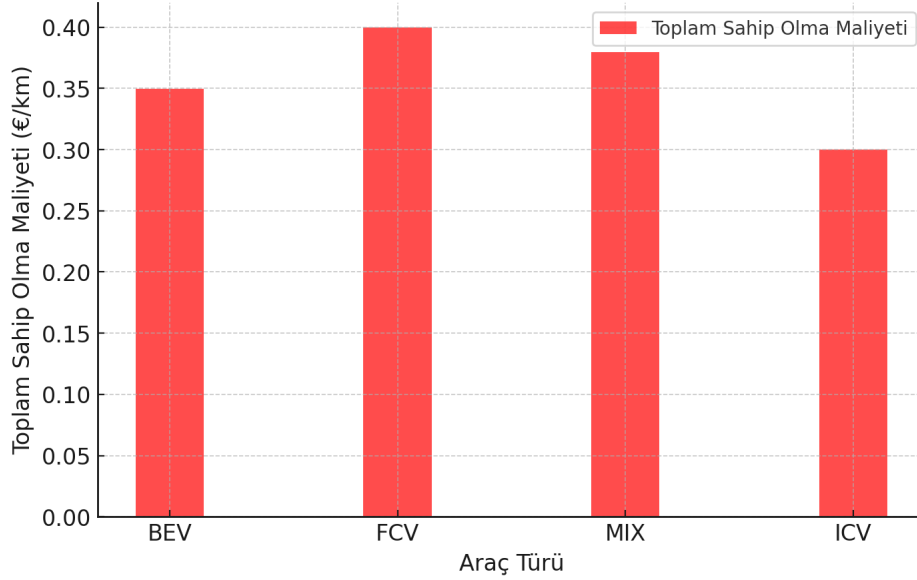
3.1. Karbon Emisyonu Karşılaştırması (LCA Sonuçları)

LCA analizleri, BEV'lerin en düşük karbon salınımına sahip araç türü olduğunu göstermektedir. Ancak, batarya üretimi kaynaklı emisyonlar göz önüne alındığında, FCV'lerin bazı durumlarda avantaj sağlayabileceği görülmüştür. ICV'ler ise en yüksek karbon emisyonuna sahip araç türü olarak öne çıkmaktadır. Bunun temel sebebi, fosil yakıtların doğrudan yanması ve araç kullanım süresince sürekli olarak karbon salınımına sebep olmasıdır (Hawkins et al., 2013; Robinius et al., 2018).

Tablo 1. Farklı Araç Türleri İçin Karbon Emisyonları (g CO₂/km) (Miotti et al., 2017; Ajanovic & Haas, 2018)

Araç Türü	Üretim Emisyonu (g CO ₂ /km)	Kullanım Emisyonu (g CO ₂ /km)	Toplam Emisyon (g CO ₂ /km)
BEV	60	20	80
FCV	50	40	90
MIX	55	30	85
ICV	40	140	180

- BEV’ler düşük karbon emisyonuna sahiptir ancak batarya üretimi nedeniyle hala belirli seviyede emisyon oluşturmaktadır (Notter et al., 2015a).
- FCV’ler hidrojen üretimi nedeniyle daha yüksek kullanım emisyonuna sahiptir (Lombardi et al., 2017).
- ICV’ler en yüksek karbon emisyonuna sahiptir (Chandra et al., 2010).



Şekil 1. Araç Türlerine Göre Karbon Emisyonları (Burkhardt et al., 2016)

3.2. Toplam Sahip Olma Maliyeti (LCC Sonuçları)

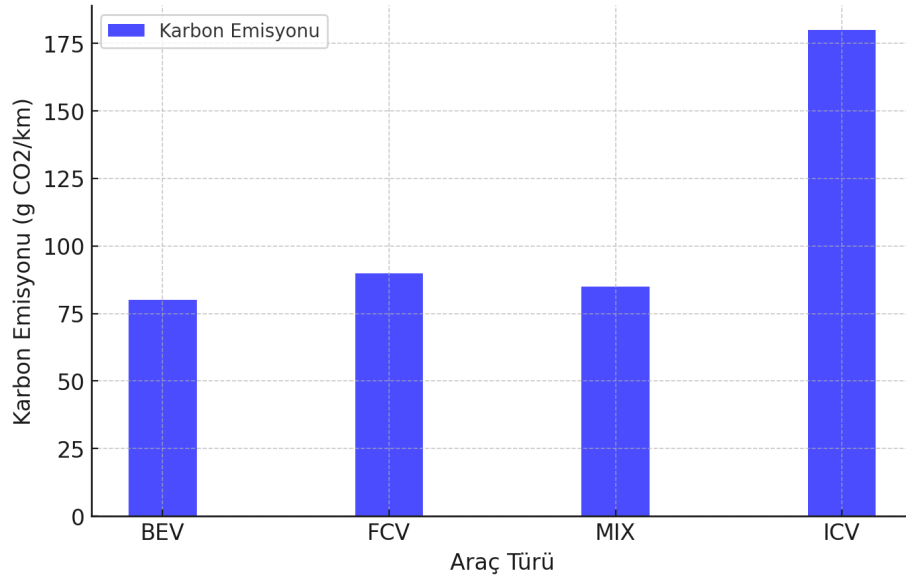
Elektrikli araçların yüksek satın alma maliyetlerine rağmen, uzun vadede yakıt ve bakım maliyetleri açısından ekonomik avantaj sunduğu görülmektedir. Özellikle BEV’ler, düşük yakıt tüketimi ve basit motor yapısı nedeniyle bakım maliyetlerinin düşük olmasıyla avantajlıdır. FCV’ler, hidrojen üretimi ve dolun altyapısının maliyetli olması nedeniyle daha pahalı bir çözüm sunmaktadır (Miotti et al., 2017; Robinius et al., 2018).

Tablo 2. Farklı Araç Türleri İçin Toplam Sahip Olma Maliyeti (€/km) (Ajanovic & Haas, 2020)

Araç Türü	Satın Alma Maaliyeti (€/km)	Yakıt Maaliyeti (€/km)	Bakım Maaliyeti (€/km)	Toplam Maaliyet (€/km)
BEV	0.20	0.08	0.07	0.35
FCV	0.22	0.10	0.08	0.40
MIX	0.21	0.09	0.08	0.38
ICV	0.15	0.12	0.03	0.30

- ICV'ler düşük satın alma maliyetine sahip, ancak uzun vadede yakıt giderleri yüksek olduğu için ekonomik avantaj kayboluyor (Lucas et al., 2012).
- BEV'ler yüksek başlangıç maliyetine sahip olsa da, düşük yakıt ve bakım maliyetleri nedeniyle rekabetçi hale geliyor (Haugneland et al., 2017b).

Tablolar açık çerçeveli tercih edilebilir. Tablo yazısı tablonun üst kısmına yazılmalıdır. Hem tablo hem de tablo yazısı sayfanın soluna hizalanmalıdır. Tablo yazısı ile üst metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo ile alt metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo yazıları tercihen 11 punto ile ya da 10 punto ile yazılmalıdır ve tek satır aralığı seçilmelidir. Tablo yazılarına atıfta bulunulmalıdır.



Şekil 2. Araç Türlerine Göre Toplam Sahip Olma Maliyeti (€/km) (Miotti et al., 2017)

3.3. Şarj ve Hidrojen İkmal Altyapısının Etkileri

- BEV'ler için şarj altyapısının yaygınlaştırılması, kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Hall & Lutsey, 2017).
- FCV'ler için hidrojen dolum altyapısının oluşturulması, yaygınlaşmalarının önündeki en büyük engellerden biridir (Robinius et al., 2018).

3.4. Araçların Menzil Karşılaştırması

Araç menzili, kullanıcı deneyimi açısından önemli bir faktördür.

- FCV'ler BEV'lere kıyasla daha uzun menzile sahiptir, ancak hidrojen dolum istasyonlarının yetersizliği nedeniyle bu avantaj tam anlamıyla kullanılamamaktadır (Felgenhauer et al., 2016). Günümüzde, ticari olarak satılan yakıt hücreli araçlar (örneğin Toyota Mirai, Hyundai Nexo) 500 ila 800 km arasında bir menzil sunmaktadır.

- BEV'lerin menzili batarya kapasitesine bağlıdır ve son yıllarda gelişen batarya teknolojileriyle 500 km'yi aşan modeller piyasaya çıkmıştır (Tesla Model S, Lucid Air gibi). Ancak, hızlı şarj altyapısının yetersizliği ve uzun şarj süreleri, bu araçların uzun mesafe kullanımını sınırlamaktadır (Hall & Lutsey, 2017).

Bu nedenle, kısa mesafelerde BEV'ler, uzun mesafelerde ise FCV'ler daha avantajlıdır.

Tablo 3. Araç Türlerine Göre Menzil Karşılaştırması (Lombardi et al., 2017)

Araç Türü	Ortama Menzil (km)	Şarj / Yakıt Dolum Süresi
BEV	300-500	30-60 dakika (hızlı şarj)
FCV	500-800	5-10 dakika
MIX	700-1000	3-5 dakika

3.5. Batarya Üretimi ve Geri Dönüşüm Süreci

BEV'lerde kullanılan lityum-iyon bataryaların geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

- Lityum, nikel ve kobalt gibi hammaddelerin madenciliği çevresel olarak yoğun bir süreçtir. Madencilik faaliyetleri, özellikle Güney Amerika'daki lityum üretim tesislerinde su tüketimini artırmakta ve ekosistemleri olumsuz etkilemektedir (Notter et al., 2015a).

- BEV'lerde kullanılan bataryaların geri dönüşüm süreci, araçların çevresel etkisini azaltmada büyük önem taşımaktadır. Modern geri dönüşüm tesisleri, bataryaların %80'ine kadarını geri kazanabilmektedir (Luo et al., 2009). Ancak, bu süreç hala maliyetlidir ve daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Özetle, BEV'lerin çevresel etkisini en aza indirmek için geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır.

3.6. Geleceğe Yönelik Politika Önerileri

Karbon bazlı yakıtların vergilendirilmesi ve elektrikli araç sübvansiyonları, BEV'lerin ekonomik avantajlarını artıracaktır.

- Avrupa Birliği ve ABD, BEV satın alımlarını teşvik etmek için sübvansiyonlar ve vergi avantajları sunmaktadır. (Cansino et al., 2010).

- Elektrikli araçlara yönelik teşviklerin artırılması ve şarj altyapısının geliştirilmesi, dönüşüm sürecini hızlandıracaktır.

FCV'lerin yaygınlaşması için hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji ile entegre edilmesi gerekmektedir (Robinius et al., 2018).

3.7. Enerji Verimliliği ve Kullanım Süresi Karşılaştırması

BEV'ler enerjiyi en verimli şekilde kullanan araçlardır.

- BEV'lerin enerji verimliliği %80 civarındayken, FCV'lerde hidrojen üretimi ve yakıt hücresi dönüşüm süreçlerindeki kayıplar nedeniyle bu oran %30-40 seviyelerine düşmektedir (McDonald & Schrattenholzer, 2002).**

Bu nedenle, BEV'ler daha düşük enerji tüketimine sahiptir ve uzun vadede daha sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

3.8. Hava Kirliliği ve Yerel Emisyonlar

BEV'ler sıfır egzoz emisyonuna sahip olduğu için hava kalitesini artırmaktadır.

- ICV'ler şehir içi hava kirliliğine en fazla neden olan araçlardır, çünkü NOx ve partikül madde (PM) salınımı yapmaktadırlar (Lombardi et al., 2017).
- FCV'ler egzozdan yalnızca su buharı salmaktadır, bu nedenle hava kirliliğine etkileri minimaldir.

Şehir içi ulaşımında BEV'lerin yaygınlaştırılması, hava kalitesini artırmada en etkili yöntemlerden biridir.

3.9. Hükümet Teşvikleri ve Destek Programları

Devlet destekleri, EV pazarının büyümesini hızlandırmaktadır.

- Norveç ve Almanya gibi ülkeler, BEV kullanımını artırmak için yüksek vergi indirimleri ve teşvik programları uygulamaktadır (Lucas et al., 2012).
- Hidrojen altyapısının yaygınlaştırılması için Japonya, geniş çaplı teşvik paketleri sunmaktadır.

Bu tür teşvikler, düşük karbonlu ulaşım sistemlerine geçişi hızlandırmaktadır.

3.10. Elektrikli Araçların Şebeke Üzerindeki Etkileri

BEV'lerin yaygınlaşması, elektrik şebekesi üzerindeki yükü artırabilir.

- Yoğun saatlerde şarj taleplerinin yönetilmesi için akıllı şebeke çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Reddi et al., 2014).

Şebeke dengesi sağlanamazsa, elektrik talebindeki dalgalanmalar enerji krizlerine yol açabilir.

3.11. Teknolojik Gelişmeler ve Gelecek Beklentileri

BEV ve FCEV'lerin gelecekteki gelişimi, teknolojik ilerlemelere ve altyapı yatırımlarına bağlıdır. Batarya teknolojisindeki yenilikler, BEV'lerin menzilini artırırken maliyetlerini

düşürebilir. Hidrojen üretimi ve depolama teknolojilerindeki gelişmeler ise, FCEV'lerin ekonomik ve çevresel avantajlarını artırabilir (Offer et al., 2010).

Gelecekte, bu iki araç türünün rekabeti, enerji kaynaklarının karışımı ve altyapı yatırımlarına göre şekillenecektir. BEV'lerin düşük maliyetleri ve enerji verimliliği, çevresel açıdan daha cazip hale gelmelerine yardımcı olurken, FCEV'lerin uzun mesafe avantajı belirli kullanım senaryolarında üstünlük sağlayabilir (Cansino et al., 2010).

3.12. Tartışma

Bu çalışma, bataryalı elektrikli araçlar (BEV), yakıt hücresel araçlar (FCV), karışık elektrikli araç senaryoları (MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlar (ICV) arasında karbon emisyonları, enerji tüketimi ve toplam sahip olma maliyetleri açısından kapsamlı bir karşılaştırma sunmaktadır. Sonuçlar, elektrikli araç teknolojilerinin geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara (ICV) kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olduğunu göstermektedir. Ancak, BEV ve FCV teknolojilerinin her birinin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır.

3.12.1. Karbon Emisyonları Açısından Değerlendirme

LCA sonuçları, ICV'lerin en yüksek karbon emisyonuna sahip araç türü olduğunu ve bunun temel nedeninin fosil yakıt tüketimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (Hawkins et al., 2013). BEV'ler, enerji kaynağına bağlı olarak değişen karbon emisyonlarıyla en çevre dostu seçeneklerden biri olarak öne çıkmaktadır (Miotti et al., 2017).

Bununla birlikte, batarya üretimi sürecinde ortaya çıkan emisyonlar göz ardı edilmemelidir. BEV'lerin batarya üretim sürecindeki karbon ayak izi, batarya geri dönüşüm teknolojileri geliştikçe ve yenilenebilir enerji kullanımı arttıkça azalmaktadır (Notter et al., 2015a). FCV'lerin emisyon seviyeleri, hidrojen üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Fosil yakıt bazlı hidrojen üretiminde (SMR yöntemi), toplam karbon emisyonları BEV'lerden yüksek olabilirken, yenilenebilir enerjiyle üretilen hidrojen (elektroliz yöntemi) bu değerleri önemli ölçüde düşürebilmektedir (Robinius et al., 2018).

Özetle, BEV'lerin karbon emisyonu açısından en sürdürülebilir çözüm olduğu görülmektedir. Ancak, hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi durumunda FCV'lerin de rekabetçi bir alternatif olabileceği söylenebilir.

3.12.2 Ekonomik Açısından Değerlendirme

Çalışma kapsamında yapılan LCC analizleri, ICV'lerin kısa vadede en düşük maliyetli seçenek olduğunu, ancak uzun vadede BEV'lerin yakıt ve bakım maliyetlerindeki düşüklük sayesinde daha ekonomik hale geldiğini ortaya koymuştur (Ajanovic & Haas, 2018). BEV'ler,

yakıt maliyetleri açısından FCV'lere kıyasla daha avantajlıdır, çünkü hidrojen üretim ve depolama maliyetleri halen yüksektir (McDonald & Schrattenholzer, 2002).

FCV'ler, özellikle uzun mesafe taşımacılığı açısından avantajlar sunsa da şu an için BEV'lerin maliyet etkinliği nedeniyle geride kalmaktadır (Lombardi et al., 2017). Ancak, hidrojen üretimi için elektroliz süreçlerinin maliyetinin düşmesi ve yakıt hücresi üretimindeki teknolojik gelişmelerin hızlanması durumunda, FCV'ler daha rekabetçi hale gelebilir (Felgenhauer et al., 2016).

Sonuç olarak, BEV'ler şu an için en ekonomik sürdürülebilir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ancak, FCV'lerin hidrojen üretimi ve altyapı geliştikçe ekonomik olarak rekabetçi hale gelmesi mümkündür.

3.12.3. Altyapı ve Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirme

BEV'lerin en büyük dezavantajlarından biri şarj altyapısının halen yetersiz olmasıdır. Hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması ve şarj sürelerinin kısaltılması, BEV'lerin daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmesini sağlayacaktır (Hall & Lutsey, 2017).

Öte yandan, FCV'lerin şarj süresi açısından avantajlı olması, özellikle ticari ve uzun yol taşımacılığı için önemli bir faktördür. Ancak, hidrojen yakıt dolum altyapısı henüz yeterince gelişmemiştir ve bu durum FCV'lerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır (Robinius et al., 2018).

Ayrıca, enerji verimliliği açısından bakıldığında, BEV'ler FCV'lerden çok daha avantajlıdır. BEV'ler enerjinin yaklaşık %80'ini mekanik enerjiye dönüştürebilirken, FCV'lerde hidrojen üretimi ve dönüşüm süreçleri nedeniyle bu oran %30-40 seviyelerine düşmektedir (McDonald & Schrattenholzer, 2002).

Bu veriler ışığında, BEV'lerin kısa ve orta mesafe kullanım için en verimli çözüm olduğu, FCV'lerin ise özellikle uzun mesafe taşımacılığı için hidrojen altyapısı geliştikçe önemli bir alternatif haline gelebileceği söylenebilir.

3.12.4. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlamaları

Bu çalışmada BEV, FCV ve ICV'lerin karşılaştırılması yapılmış olsa da, batarya kimyasallarındaki farklılıklar ve hidrojen üretim süreçlerindeki değişkenlikler daha detaylı analiz gerektirmektedir. Ayrıca, gelecekteki enerji senaryoları ve politikalar doğrultusunda elektrikli araçların çevresel ve ekonomik etkileri değişebilir.

Bu nedenle, BEV ve FCV teknolojilerinin gelişimi devam ettikçe, yeni modellemeler ve saha çalışmalarına dayalı analizlerin yapılması gerekmektedir.

3.12.5. Genel Değerlendirme ve Geleceğe Yönelik Çıkarımlar

Elektrikli araçlar, uzun vadede fosil yakıtlı araçların yerini alacak en önemli alternatiflerdir.

- BEV’ler, düşük karbon emisyonları ve maliyet etkinlikleri ile ön plandadır.
- FCV’ler, özellikle uzun mesafeli ulaşım ve ticari araçlar için önemli bir potansiyele sahiptir.
- ICV’lerin ise karbon ayak izlerini azaltacak şekilde hibrit sistemlerle entegre edilmesi, geçiş sürecinde sürdürülebilir bir seçenek olabilir.

Sonuç olarak, BEV’ler şu an için en uygun çözüm gibi görünse de, hidrojen ekonomisinin gelişmesiyle birlikte FCV’ler de gelecek için umut vaat eden bir alternatif olabilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, bataryalı elektrikli araçlar (BEV), yakıt hücresel araçlar (FCV), karışık elektrikli araç senaryoları (MIX) ve içten yanmalı motorlu araçlar (ICV) arasında çevresel ve ekonomik performans açısından kapsamlı bir karşılaştırma yapmıştır. Çalışmanın temel bulguları, ulaşım sektöründe karbon salınımını azaltmak ve sürdürülebilir bir enerji dönüşümü sağlamak açısından BEV’lerin şu an için en uygun alternatif olduğunu göstermektedir.

4.1. Genel Değerlendirme

Çalışmada yapılan LCA (Yaşam Döngüsü Analizi) ve LCC (Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme) analizleri, ICV’lerin çevresel etkiler açısından en yüksek karbon emisyonuna sahip olduğunu ve uzun vadede ekonomik açıdan sürdürülebilir olmadığını ortaya koymuştur (Hawkins et al., 2013; Miotti et al., 2017).

BEV’ler, düşük karbon emisyonları ve maliyet etkinlikleri ile en çevre dostu çözüm olarak ön plana çıkmaktadır (Ajanovic & Haas, 2018). Ancak, BEV’lerin batarya üretimi nedeniyle hala belirli düzeyde emisyonlara neden olduğu unutulmamalıdır (Notter et al., 2015a). FCV’lerin emisyon seviyeleri, hidrojen üretim yöntemine bağlı olarak büyük değişiklik göstermektedir; yenilenebilir enerjiyle üretilen hidrojen kullanılması durumunda FCV’ler rekabetçi bir alternatif olabilir (Robinius et al., 2018).

Özetle:

- ICV’ler, yüksek karbon emisyonları nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir değildir.
- BEV’ler, düşük karbon salınımı ve maliyet avantajlarıyla şu an için en uygun çözümdür.
- FCV’ler, hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi halinde önemli bir alternatif olabilir.

4.2. Uygulama Açısından Öneriler

Elektrikli araç altyapısının genişletilmesi:

- Hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması, BEV'lerin daha geniş kullanıcı kitlesine ulaşmasını sağlayacaktır (Hall & Lutsey, 2017).

- FCV'lerin daha rekabetçi hale gelebilmesi için hidrojen dolum altyapısının geliştirilmesi gerekmektedir (Robinius et al., 2018).

Batarya üretiminde geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi:

- Batarya üretiminin çevresel etkisini azaltmak için geri dönüşüm süreçlerine yönelik Ar-Ge yatırımları artırılmalıdır (Notter et al., 2015a).

- Yeni nesil katı hal bataryalar, lityum-iyon bataryalara kıyasla daha düşük çevresel etkiye sahip olabilir.

Sürdürülebilir enerji kaynaklarına entegrasyon:

- BEV'lerin şebeke üzerindeki yükünü azaltmak için akıllı şarj sistemleri teşvik edilmelidir (Reddi et al., 2014).

- Hidrojen üretiminin fosil yakıt yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandırılması, FCV'lerin çevresel sürdürülebilirliğini artıracaktır.

Teşvik politikalarının artırılması:

- Vergi indirimleri ve devlet sübvansiyonları, BEV ve FCV'lerin yaygınlaşmasını hızlandırabilir (Lucas et al., 2012).

- Bazı ülkelerde olduğu gibi, fosil yakıtlı araçlara yönelik ek karbon vergileri uygulanabilir.

4.3. Çalışmanın Sınırlamaları ve Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada, BEV ve FCV teknolojileri karşılaştırılmış ancak enerji üretim senaryoları ayrıntılı olarak ele alınmamıştır.

- Gelecekte, BEV ve FCV'lerin farklı enerji karışımları (örneğin kömür bazlı, doğal gaz bazlı ve tamamen yenilenebilir enerji bazlı senaryolar) altında nasıl performans gösterdiği daha ayrıntılı incelenmelidir.

- Ayrıca, hidrojen üretiminde elektroliz teknolojilerinin maliyet etkinliği ve karbon yakalama teknolojilerinin potansiyeli gibi konular daha detaylı araştırılmalıdır.

- Lityum-iyon batarya teknolojisinin gelecekteki gelişimi ve katı hal bataryaların elektrikli araç pazarına etkileri konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

4.4. Genel Sonuç ve Çıkarımlar

Bu çalışma, elektrikli araç teknolojilerinin çevresel ve ekonomik performansını detaylı bir şekilde incelemiş ve mevcut teknolojiler arasında BEV'lerin en sürdürülebilir çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, BEV'lerin sınırlamaları ve FCV'lerin hidrojen altyapısıyla birlikte gelecekte rekabet edebilir hale gelebileceği unutulmamalıdır.

- Kısa vadede BEV'ler, düşük karbon emisyonları ve maliyet avantajlarıyla ön plandadır.
- Uzun vadede FCV'ler, hidrojen altyapısının gelişmesiyle rekabetçi bir alternatif olabilir.
- ICV'lerin fosil yakıt bağımlılığı ve yüksek karbon emisyonları nedeniyle gelecekte sürdürülebilir bir seçenek olmadığı açıktır.

Bu nedenle, karbonsuz ulaşım sistemleri oluşturmak için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen BEV ve FCV çözümlerine odaklanılması gerekmektedir.

Yazarların Katkısı

1. Yazar : %35
2. Yazar: %35
3. Yazar: %30

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Ajanovic, A., & Haas, R. (2018). Economic and environmental prospects for battery electric- and fuel cell vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 964–980. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.052>

Burkhardt, U., Peters, K., & Noppel, F. (2016). Impact of alternative fuels on the atmospheric composition and climate – The case of hydrogen-powered aircraft. *Atmospheric Environment*, 126, 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.047>

Cansino, J. M., Pablo-Romero, M. del P., Román, R., & Yñiguez, R. (2010). Promoting renewable energy sources for heating and cooling in EU-27 countries. *Energy Policy*, 38(11), 6211–6220. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.033>

Felgenhauer, M., Ohi, J., & Shapiro, J. N. (2016). Transitioning to hydrogen: A comparison of startup cost across energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7254–7263. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.034>

Hall, D., & Lutsey, N. (2017). Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. International Council on Clean Transportation (ICCT) Report. <https://theicct.org/publications/emerging-best-practices-electric-vehicle-charging-infrastructure>

Hawkins, T. R., Gausen, O. M., & Strømman, A. H. (2013). Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 183–200. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0440-9>

Lombardi, L., Tribioli, L., Cozzolino, R., & Bella, G. (2017). Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 143, 528–541. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.064>

Lucas, A., Silva, C. A., & Neto, R. C. (2012). Life cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of electric vehicles in Europe. *Energy Policy*, 49, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.054>

McDonald, A., & Schrattenholzer, L. (2002). Learning rates for energy technologies. *Energy Policy*, 29(4), 255–261. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00122-1)

Miotti, M., Hofer, J., & Bauer, C. (2017). Life cycle environmental impacts of electric mobility: A comparison between battery electric, plug-in hybrid, and fuel cell vehicles. *Environmental Science & Technology*, 51(5), 3119–3128. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00177>

Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P. A., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2015a). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), 6550–6556. <https://doi.org/10.1021/es903729a>

Reddi, K., Elgowainy, A., Wang, M., & Rustagi, N. (2014). Current status and future growth of hydrogen production for light-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20467–20475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.041>

Robinius, M., Otto, A., Syranidis, K., Riedel, T., & Stolten, D. (2018). Linking the power and transport sectors—Part 1: The principle of sector coupling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38), 17616–17630. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.051>