



energies



Gözden geçirmek

Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi—İnceleme Metodolojiler ve Belirleyiciler

Dorota Buchart ve Iga Przytuła

Konu Koleksiyonu

Enerji, Çevre ve Refah Konulu Özel Makaleler

Düzenleyen

Dr. Marco Casazza, Dr. Pedro L. Lomas ve Prof. Dr. Sergio Ulgiati



<https://doi.org/10.3390/en17225667>

Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi—Metodolojilerin ve Belirleyicilerin İncelenmesi

Dorota Burchart  ve Iga Przytuła * 

Ulaştırma ve Havaçılık Mühendisliği Fakültesi, Silezya Teknoloji Üniversitesi, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polonya; dorota.burchart@polsl.pl

* Yazışma: iga.przytula@polsl.pl

Soyut: Bir ürün ve organizasyonun karbon ayak izi, ulaşım da dahil olmak üzere birçok sektörde en önemli çevresel göstergelerden biridir. Sonuç olarak, elektrikli araçlar (EV), karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmak için bir alternatif olarak tanıtılmaktadır. Bu makale, karbon ayak izinin yaşam döngüsüne dayalı kavramların, yöntemlerin, standartların ve hesaplama modellerinin bir incelemesi de dahil olmak üzere, elektrikli araçların karbon ayak izini değerlendirmek için metodolojilere genel bir bakış sunmaktadır. Makale ayrıca, EV karbon ayak izi analizlerinin sonuçlarının sistematik bir incelemesini de içermektedir. Karbon ayak izi hakkındaki mevcut bilginin analizi, karayolu taşımacılığı araçlarına odaklanmaktadır: Pil Elektrikli Araçlar (BEV), Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ve Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV). Ek olarak, elektrikli araçların tüm yaşam döngüleri dikkate alınarak karbon ayak izi değerlendirmesini belirleyen faktörlerin bir incelemesi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: karbon ayak izi; elektrikli araçlar; karayolu taşımacılığı; yaşam döngüsü değerlendirmesi; karbondan arındırma



Alıntı: Burchart, D.; Przytuła, I. Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi—Metodolojilerin ve Belirleyicilerin İncelenmesi. *Energies* **2024**, *17*, 5667. <https://doi.org/10.3390/en17225667>

Akademik Editör: Jose Gabriel Oliveira Pinto

Alındı: 17 Ekim 2024 Gözden geçirildi: 2 Kasım 2024 Kabul edildi: 8 Kasım 2024 Yayımlandı: 13 Kasım 2024



Telif Hakkı: © 2024 yazarlar tarafından. Lisans sahibi MDPI, Basel, İsviçre. Bu makale, Creative Commons Atıf (CC BY) lisansının (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makaledir.

1. Giriş

Artan yasal gereklilikler ve her şeyden önce, kurumsal faaliyetlerin ve ürün kullanımının çevresel etkisine ilişkin büyüyen anlayış, çeşitli değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Ürünlerin, teknolojilerin veya işletmelerin çevresel yüklerini belgelemeyi amaçlayan bu tür yöntemlerden biri karbon ayak izi değerlendirmesidir. İklim değişikliği şu anda sürdürülebilir kalkınmayla ilgili en önemli konulardan biri olarak kabul edilmektedir. İnsan faaliyetlerinin çevresel etkisini etkili bir şekilde değerlendirmek için çevresel ayak izleri olarak bilinen çevresel değerlendirme yöntemleri kullanılır. Bu ayak izleri, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) tekniğinden türetilmiştir. LCA, ürün ve hizmetlerin ham madde çıkarma ve mal üretimi için işleme, kullanım aşaması ve hizmet ömürlerinin sonunda bertarafına kadar yaşam döngüleri boyunca çevresel etkisini değerlendirmek için kullanılır. Çevresel ayak izi değerlendirmesi yürütmek birkaç aşamadan oluşur: analizin amacını ve kapsamını tanımlama, kaynakları ve emisyonları belirleme, çevresel etkiyi değerlendirme, sonuçları yorumlama ve bir rapor geliştirme. Ürünler ve işletmeler için çevresel ayak izlerinin değerlendirilmesi, alaka, eksiksizlik, tutarlılık, doğruluk ve şeffaflık ilkelerine uymalıdır. Karbon ayak izi, çevresel ayak izleri ailesi arasında en yaygın olanıdır. Günümüzde karbon ayak izi (CF) yalnızca bilim camiasının değil, somut faydalarını fark eden ve ESG (Çevresel, sosyal ve yönetim) raporlamasının benimsenmesiyle kanıtlandığı gibi, bu aracı iş operasyonlarının çevresel verimliliğini artırmada temel bir yaklaşım olarak kullanan iş liderlerinin de ilgisini çekmektedir.

Avrupa Komisyonu, Avrupa Birliği'nin (AB) 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma yolunu özetleyen belgeler geliştirdi. Bu iddialı hedef, AB'nin iklim değişikliğiyle mücadele ve enerji, endüstri, ulaşım ve tarım gibi çeşitli sektörlerin çevresel etkisini azaltma konusundaki kararlılığını yansıtıyor. İklim nötrlüğüne ulaşmak, sera gazı (GHG) emisyonlarında önemli azalmalar gerektirecek ve

ekonomik sektörler genelinde dönüştürücü değişimler. Avrupa Yeşil Mutabakatı [1], AB'yi 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonuyla modern, kaynak açısından verimli ve rekabetçi bir ekonomiye dönüştürmeyi amaçlayan Birlik için yeni bir büyüme stratejisidir. Bu strateji, sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmek ve yeşil teknolojilerde yeniliği desteklemek için gereken belirli girişimleri ve eylemleri ayrıntılarıyla açıklayan bir yol haritası görevi görür. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa Birliği içinde sürdürülebilir kalkınmayı ve yeşil ekonomiye geçişi teşvik ederek ekonomik büyümeyi kaynak kullanımından ve çevresel bozulmadan ayırmanın önemini vurgular.

Karbon ayak izi (CF) [2] şu anda en yaygın kullanılan çevresel göstergelerden biridir. Bir varlık, süreç veya ürünün yaşam döngüsü boyunca neden olduğu toplam sera gazı emisyonlarının bir ölçüsü olarak, karbon ayak izi çeşitli faaliyetlerin çevresel etkisine dair kritik bir içgörü sağlar. Basitleştirilmiş hesap makinelerinden yaşam döngüsü analizine dayalı daha bilimsel ve karmaşık yöntemlere kadar CF'yi değerlendirmek için çok sayıda yaklaşım, metodoloji ve araç geliştirilmiştir. Bu araçlar, kuruluşların karbon emisyonlarını ölçmelerini ve izlemelerini sağlayarak, genel karbon ayak izlerini azaltmak için hedefli eylemlere giden yolu açar. CF genellikle ürünlere ve kuruluşlara odaklanır, ancak CF kavramı sektörler, ülkelere, bireylere vb. de uygulanabilir ve çeşitli çevresel etki ölçekleri için bir gösterge olarak çok yönlülüğünü vurgular.

AB ülkelerindeki kuruluşlar için sürdürülebilirlik raporlaması (ESG) kapsamındaki CF analizine ilişkin yeni yasal yükümlülükler getiren temel belgelerden biri Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlaması Direktifi'dir (CSRD) [3]. CSRD, şirketlerin çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) uygulamalarıyla ilgili standart bilgileri ifşa etmesini zorunlu kılarak daha fazla şeffaflık ve hesap verebilirlik sağlar. CSRD, çevre (E), sosyal sorumluluk (S) ve kurumsal yönetim (G) alanlarında veri raporlaması zorunluluğu getirir - toplu olarak ESG raporlaması olarak bilinir. Bu direktif, paydaşların şirketlerin ESG performansını değerlendirmesine ve bilinçli kararlar almasına olanak tanıyan AB genelinde sürdürülebilirlik raporlaması için uyumlu bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır. İklimle ilgili sorunlar, şirketlerin karbon emisyonlarını nasıl ele aldıkları ve AB'nin iklim hedeflerine nasıl katkıda bulundukları konusunda özellikle vurgu yapılarak raporlanacak temel çevresel alanlardan biridir.

ESG, ulaştırma sektörü de dahil olmak üzere kurumsal sürdürülebilirliğin önemli bir unsurudur ve bu da Avrupa Komisyonu yönergeleri doğrultusunda hem kuruluşlar hem de ürünler için zorunlu analizlerin kurallarını ve kapsamalarını anlamak için giderek daha fazla önem taşımaktadır. Sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunan ulaştırma sektöründe, ESG raporlama standartlarının benimsenmesi enerji verimliliğinde iyileştirmeler, daha temiz teknolojilerin benimsenmesi ve lojistik ve tedarik zinciri süreçlerinin optimizasyonunu sağlayabilir. ESG, bir kuruluşun faaliyetleri ve çevre üzerindeki etkisi hakkında finansal olmayan raporlama için yeni bir standart haline gelmiştir. ESG raporlaması, net standartlar ve yönergeler belirleyerek şirketleri daha sorumlu uygulamalar benimsemeye, kurumsal itibarlarını artırmaya ve yatırımcılar, tüketiciler ve düzenleyiciler arasında güven oluşturmaya teşvik eder [4]. ESG raporlaması, CSRD'ye tabi tüm işletmeler için zorunlu olan Avrupa Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları'na (ESRS) dayanmaktadır [3]. Bu standartlar, AB'nin sürdürülebilir kalkınmaya ilişkin önceliklerini yansıtan geniş bir yelpazedeki çevresel, sosyal ve yönetim ölçütlerini kapsayan sürdürülebilirlikle ilgili bilgilerin açıklanmasına yönelik yapılandırılmış bir yaklaşım belirlemektedir.

Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) faktörleri hakkında finansal olmayan raporlama, son yıllarda sermaye piyasası katılımcılarının önemli ilgisini çeken hızla gelişen ve giderek daha önemli hale gelen bir konudur [5,6]. ESG'nin çevresel yönü, bir organizasyonun çevre üzerindeki etkisine odaklanır ve karbon ayak izini azaltma, doğal kaynakları sorumlu bir şekilde yönetme ve çevresel hasarı en aza indirme çabalarını kapsar [7,8]. Bu nedenle, ulaştırma sektöründe, hem lojistik-taşıma sistemi kuruluşlarının hem de çalıştırdıkları araçların çevresel etkisine en önemli şekilde katkıda bulunan faktörleri belirlemek için karbon ayak izini anlamak esastır. Bu makale, sera gazı emisyonlarını azaltmak için geleneksel yakıtlı araçlara bir alternatif sunan elektrikli araçların karbon ayak iziyle ilgili literatürü incelemeyi amaçlamaktadır.

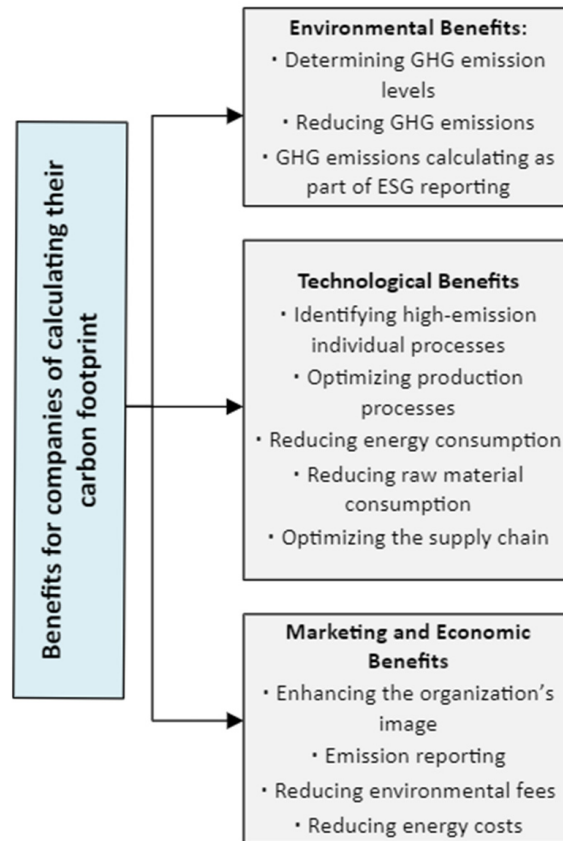
Makalede ayrıca ulaştırma sektöründeki kuruluşların ve ürünlerin karbon ayak izinin hesaplanmasına ilişkin temel yöntem ve standartlar anlatılıyor.

2. Lojistik ve Taşımacılık Sisteminde Karbon Ayak İzi Yönetimi

Karbon ayak izinin (CF) değerlendirilmesi, ulaştırma sektöründeki çevresel değerlendirmenin en kritik yönlerinden biridir. CF, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca doğrudan veya dolaylı olarak bir birey, şirket, ürün veya hizmet tarafından üretilen sera gazı emisyonlarının toplamı olarak tanımlanır. Karbon ayak izi, yaşam döngüsünün her aşamasında hem doğrudan hem de dolaylı emisyonları hesaba katarak yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının toplamını temsil eder. CF, karbondioksit eşdeğeri (CO₂e), bireysel sera gazlarının Küresel Isınma Potansiyelini (GWP) içerir. Diğerlerinin yanı sıra sera etkisine katkıda bulunan karbondioksit, metan, nitroz oksit veya kloroflorokarbonlar (CFC'ler) gibi gazların emisyonlarını içerir.

Bir kuruluşun karbon ayak izi, kuruluşun tesisleri ve süreçleri tarafından üretilen doğrudan emisyonların yanı sıra tedarikçilerden, ulaşımdan, enerji tüketiminden ve atık bertarafından kaynaklanan dolaylı emisyonları da kapsar. Karbon ayak izi analizi ve değerlendirmesi, karbondan arındırma yolunda ilk adımdır. Bir sonraki adım, çevresel etkileri azaltmak için olmazsa olmaz olan çevresel göstergelerin izlenmesi ve raporlanması yoluyla karbon ayak izi yönetimidir.

İklim değişikliği ve küresel ısınma üzerindeki antropojenik etki şu anda bilimsel tartışmaların başlıca konuları arasındadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) raporları, dünya çapındaki hükümetleri sera gazı emisyonlarını azaltmak için harekete geçmeye teşvik etti. Sera gazı emisyon değerlendirmeleri konusunda hükümetler arası iş birliğinin sonucu, bölgeye bağlı olarak çeşitli biçimler alan zorunlu emisyon raporlamasının oluşturulması olmuştur: Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) gibi emisyon ticaret sistemlerinden ulusal sera gazı raporlama programlarına. Karbon ayak izinin hesaplanması, Şekil 1'de gösterildiği gibi somut faydalar sunar.¹



Şekil 1. Karbon ayak izi değerlendirmesinin başlıca faydaları.

Karbon ayak izinin hesaplanmasının temel avantajları arasında, özellikle her ürünün üretim süreci boyunca sera gazı emisyonlarının ölçülmesini sağlayarak, kurumsal faaliyetlerin olumsuz çevresel etkisinin en aza indirilmesi yer almaktadır.[9]. Karbon ayak izi hesaplamasına aşamalı bir yaklaşım, süreç içinde çevresel bozulmaya en önemli ölçüde katkıda bulunan, "sıcak nokta" olarak bilinen belirli unsurun tanımlanmasını kolaylaştırır. Örneğin, tüm tedarik zinciri içindeki belirli bir süreç olan bu tür kritik noktaların tanımlanması, hedefli çevresel müdahalelere olanak tanır ve odaklanmış bir yaklaşım, hem çevresel hem de ekonomik verimlilik açısından optimum sonuçlar verir. Bu ayrıca üretim süreci optimizasyonunu da destekler. Temel eylemler arasında kaynak yönetimi, enerji kullanımı ve atık yönetimi uygulamalarının verimliliğinin artırılması yer alır. Lojistik ve taşıma sistemlerinde karbon ayak izini azaltmaya yönelik önlemlere örnek olarak, taşımada "boş seferlerin" ortadan kaldırılması (yani, az yüklü yolculuklar), taşınan mallar için ambalaj türlerinin değiştirilmesi ve yerel tedarikçilerin kullanılması verilebilir. Karbon ayak izi nicelemesinden kaynaklanan tüm çevresel iyileştirmeler, "yeşil" tasarım konseptlerinin geliştirilmesini, kaynak tüketiminin azaltılmasını, enerji taleplerinin düşürülmesini ve atık oluşumunun en aza indirilmesini sağlarken, düşük karbonlu tedarikçilerle ortaklıkların teşvik edilmesini ve böylece değerlendirilen ürünün veya kuruluşun ayak izinin dolaylı olarak azaltılmasını sağlar. Ulaştırma sektöründe karbon ayak izi değerlendirmesi, iklim politikası karar alma süreçlerine bilgi sağlıyor ve lojistik ve taşıma sistemlerinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasını amaçlayan girişimleri destekliyor.

Son yıllarda, Euro VI standartları gibi egzoz emisyonlarına ilişkin artan düzenleyici gereklilikler, içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılan teknolojilerin geliştirilmesini önemli ölçüde etkilemiştir. Milojevic ve ark. (2024) tarafından yazılan makale [10] yüksek basınçlı doğrudan yakıt enjeksiyon sistemleri ve egzoz gazı devridaimi (EGR) gibi gelişmiş teknik çözümlerin tanıtımının partikül madde (PM) ve nitrojen oksit (NOx) emisyonlarında önemli bir azalmaya katkıda bulunduğunu vurgulamaktadır. Dahası, seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemlerinin kullanımı, katı düzenleyici gereklilikleri karşılamak için hayati önem taşıyan NOx emisyonlarını etkili bir şekilde azaltır.

Önemli bir unsur, geleneksel laboratuvar testlerine önemli bir ek olan gerçek sürüş emisyonları (RDE) testlerinin kullanılmasıdır. PEMS (Taşınabilir Emisyon Ölçüm Sistemleri), gerçek yol sürüşü sırasında araçlardan gelen emisyonların ölçülmesini sağlayan cihazlardır. Bu testlerin tanıtımı, laboratuvar koşulları altında elde edilen sonuçlar ile gerçek yol emisyonları arasındaki tutarsızlıkları azaltmayı amaçlamaktadır. Bu, üreticilerin farklı hızlar, arazi eğimindeki değişiklikler ve değişen araç yükleri gibi değişen koşullarda bile emisyon standartlarına uyumu garanti etmesini sağlar.

Teknolojik yenilikler, ulaşımın çevresel etkisini azaltma ve giderek daha sıkı hale gelen emisyon düzenlemelerini karşılama ihtiyacının artmasına doğrudan bir yanıtır. Gelecekte, düzenlemelerin daha da sıkılaştırılması ve egzoz emisyonlarını ve kirleticileri daha da azaltmak için daha da gelişmiş teknolojik çözümlerin sunulması beklenebilir.

Masa1 1990-2023 dönemi için sektör bazında küresel sera gazı (GHG) emisyonlarını sunar ve 1990 ve 2005'e göre değişiklikleri gösterir. Veri analizi, taşıma sektörünün 1990'a kıyasla %78 ve 2005'e kıyasla %26 artışla emisyonlarda üçüncü en yüksek artışı kaydettiğini ortaya koymaktadır. Sadece enerji endüstrisi ve endüstriyel yanma ve işleme sektörleri daha büyük artışlar göstermiştir. Bu sonuçlar, taşımanın küresel GHG emisyonlarındaki önemli katkısını vurgulayarak bu sektörü karbondan arındırmanın zorluklarının altını çizmektedir. Tablolar1Ve2Ortak Araştırma Merkezi'nden alınan verilere dayanarak geliştirildi [11].

Masa2 1990'dan 2023'e kadar AB-27'deki sektörler genelindeki sera gazı emisyonlarını göstermektedir [10]. AB'deki diğer sektörlerin aksine, taşıma, 1990'a göre %19'luk bir artışla, dönem boyunca emisyonlarda artış kaydeden tek sektördür. Bu artış, AB'nin iklim politikası çerçevesindeki çabalara rağmen taşıma sektörünün önemli bir emisyon kaynağı olmaya devam ettiğini göstermektedir. 2005'e kıyasla, taşıma emisyonları %6 oranında azaldı; bu, uygulanan stratejilerin ilk etkisini yansıtabilir, ancak bunların etkinliği 1990 seviyelerine göre azalma sağlamada sınırlı kalmaktadır.

Tablo 1.1990-2023 döneminde sektörlere göre küresel sera gazı emisyonları.

Sektör	2023 ve 1990	2023 ve 2005
Güç Endüstrisi	+ %96	+ %36
Endüstriyel Yanma ve Prosesler	+ %91	+ %41
Binalar	+ 1%	+ 3%
Taşımacılık	+ 78%	+ %26
Yakıt Kullanımı	+ %48	+ %23
Tarım	+ %20	+ %15
Atık	+ 56%	+ 37%
Tüm sektörler	+ %62	+ %28

Tablo 2.1990-2023 döneminde sektörlere göre AB-27 sera gazı emisyonları.

Sektör	2023 ve 1990	2023 ve 2005
Güç Endüstrisi	– %51	– %50
Endüstriyel Yanma ve Prosesler	– %42	– %30
Binalar	– %37	– %31
Taşımacılık	+ %19	– %6
Yakıt Kullanımı	– %46	– %27
Tarım	– %27	– %6
Atık	– %35	– %26
Tüm sektörler	– %34	– %29

Bu sonuçların yorumlanması, iddialı iklim hedeflerine ulaşmak için özellikle küresel düzeyde ulaştırma sektöründeki çabaları yoğunlaştırmanın acil ihtiyacını vurgulamaktadır. AB, diğer sektörlerde önemli emisyon azaltımlarıyla önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da, ulaştırma daha fazla eylem gerektiren kritik bir alan olmaya devam etmektedir. AB'nin karbonsuzlaştırma yolunda attığı adımlar, hedefli politikaların ve teknolojik ilerlemelerin potansiyel etkinliğini göstererek, dünya çapında benzer taahhütlerin gerekliliğini vurgulayan bir örnek oluşturmaktadır. Küresel ölçekte, teknolojik yenilik, enerji verimliliği ve politika uygulamasındaki daha güçlü girişimler, ulaştırma emisyonlarını etkili bir şekilde ele almak ve kapsamlı iklim eylemini desteklemek için elzemdir.

Bu bağlamda EN 16258 [12] standardı, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından geliştirilen, ulaşımda enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını doğru bir şekilde ölçmek ve raporlamak için de önemlidir. Bir aracın yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarındaki emisyonları değerlendirmek için kapsamlı bir metodoloji sunarak ayrıntılı çevresel analize olanak tanır. Bu, yalnızca çalışma sırasında değil, pil üretimi ve enerji kaynağı da dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsü boyunca emisyonları hesaba kattığı için özellikle Pil Elektrikli Araçlar (BEV'ler) için önemlidir ve elektrikli, hibrit ve geleneksel araçlar arasında daha hassas karşılaştırmalar yapılmasını sağlar. EN 16258 standardını Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) veya GHG protokolleri gibi karbon ayak izi hesaplama metodolojileriyle entegre etmek, mevcut çevresel değerlendirme araçlarına değerli bir katkı sağlayarak sonuçların uyumlu hale getirilmesini ve ESG yönergelerine uygun raporlama kalitesinin iyileştirilmesini sağlar.

Skr'nin çalışması gibi araştırmaların yapılabilmesi ve diğerleri (2019) [13], EN 16258 çerçevesinde değerlendirilen Orta Avrupa ülkelerinde elektrikli araçların uygulanmasının çevresel etkisini vurgular. Bu çalışma, bireysel ülkelerdeki enerji karışımına ve güç üretiminin verimliliğine bağlı olarak elektrik üretimiyle ilişkili sera gazı (GHG) emisyonlarındaki değişkenliğe işaret eder. Yazarlar, kuyudan tekerleğe (WtW) yaklaşımını uygulayarak, elektrikli araç kullanmanın ekolojik faydalarının şarj için kullanılan enerji kaynağına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarının baskın olduğu Avusturya'da, elektrikli araçlar için WtW GHG emisyonları 19,74 ila 29,47 gCO arasında önemli ölçüde daha düşüktür/km. Buna karşılık, enerji karışımının ağırlıklı olarak kömür bazlı olduğu Polonya'da emisyonlar 114,31 ile 114,31 arasında olabilir.

170,66 gCO₃2e/km. Bu bulgular, elektromobilitenin sürdürülebilirliğini değerlendirirken tam yaşam döngüsü analizinin (LCA) gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu görüşler, ülkelerin daha temiz enerji kaynaklarına geçiş yapmaları ve elektrikli araçların çevresel faydalarından gerçek anlamda yararlanmak için kapsamlı Yaşam Döngüsü Değerlendirmeleri benimsemeleri yönündeki kritik ihtiyacın altını çiziyor.

3. Ulaştırma Sektöründe Karbon Ayak İzinin Hesaplanması Metodolojisi

Dünya çapında sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmaya yönelik artan vurgu, ulaşım da dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde karbon ayak izinin doğru bir şekilde ölçülmesi ve yönetilmesinin önemini vurgulamaktadır. Ulaşım, önemli bir GHG emisyonu kaynağıdır ve karbon ayak izini hesaplamak için etkili metodolojilerin geliştirilmesi, çevresel etkisini izlemek ve en aza indirmek için hayati öneme sahiptir. Bu bölüm, ulaşım sektöründe karbon ayak izini hesaplamak için mevcut metodolojilerin bir analizini sunarak, bunların ilkelerini, uygulamalarını ve karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmadaki alakalarını vurgulamaktadır. Ulaşım sektöründe metodoloji seçimi, yakıt çıkarmadan araçlarda nihai kullanımına kadar emisyon kaynaklarının yaşam döngüsü tarafından belirlenir. Tablo3 Taşımacılık sektöründe uygulanabilecek kuruluş ve ürünlerin karbon ayak izinin hesaplanmasına ilişkin yöntem ve standartlara ilişkin, bunların özellikleri ve uygulama alanları dikkate alınarak genel bir bakış sunulmaktadır.

Tablo 3.Ulaştırma Sektöründe Uygulanabilir Kuruluş ve Ürünlerin Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntem ve Standartları.

Yöntem/Standart	Tanım
PAS2050	PAS 2050, İngiliz Standartları Enstitüsü tarafından geliştirilen bir standarttır. Odak noktası Ürün ve hizmetlerin karbon ayak izinin hesaplanmasında. Bu standart, ham madde ediniminden üretime kadar ürün yaşam döngüsünü dikkate alır. dağıtım ve kullanımdan elden çıkarmaya kadar [14].
IPCC Yöntemi—Hükümetlerarası Panel İklim Değişikliği Üzerine	IPCC yöntemi, özellikle karbon ayak izini hesaplamak için kullanılır ürünler ve teknolojiler [15].
GHG Protokolü	GHG Protokolü, karbon ayak izinin değerlendirilmesi ve izlenmesiyle ilgilidir. Kuruluşlar içinde sürdürülebilir kalkınma için ESG raporlamasına hizmet eder. GHG Protokolüne göre, sera gazı emisyonları üç kapsama ayrılmıştır [16].
LCA Yöntemi—Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	LCA çerçevesi, etkiyi hesaba katarak farklı LCIA (yaşam döngüsü etki değerlendirmesi) yöntemlerini uygulayarak CF'nin hesaplanmasına olanak tanır kategoriler [17,18].
WtW—Kuyudan Tekerleğe	WtW yöntemi yalnızca ulaşım yakıtlarının değerlendirilmesine adanmıştır. Araç değerlendirmesinde yalnızca enerji tüketimiyle ilgili kategorileri dikkate alır ve Yakıt yaşam döngüsüyle ilişkili sera gazı emisyonları [19].
ISO 14067:2018	ISO 14067:2018, karbon ayak iziyle ilgili terimleri ve bir ürünün karbon ayak izini nicel olarak belirlemeye yönelik yönergeleri tanımlar. Bu uluslararası standart, ürün karbon ayak izlerinin hesaplanmasıyla ilgilidir [20].
ISO 14064-1:2018	ISO 14064-1:2018, emisyonların niceliksel olarak belirlenmesini ve raporlanmasını sağlamak için kuruluş düzeyinde sera gazı emisyonlarının raporlanmasına ilişkin yönergeler sağlar. planlama, raporlama ve yönetim amaçları [21].

Karbon ayak izini (CF) hesaplamak için ilk ve en yaygın kullanılan yöntem, Kamuya Açık Spesifikasyon 2050'dir (PAS 2050) [22] British Standards Institute tarafından geliştirilmiştir. Bu şartname, ürün ve hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca sera gazı emisyonlarının hesaplanması yöntemlerini standartlaştırmak için oluşturulmuştur. PAS 2050, BSI tarafından en son teknolojik gelişmeler ve birikmiş deneyim doğrultusunda ürün ve hizmet yaşam döngüleri boyunca sera gazı emisyonlarının nicel değerlendirmelerini güncellemek için kullanılır [23]. Ürün ve hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin ölçülmesini sağladığı için PAS 2050, aşağıdakilerin hazırlanması için temel görevi görür:

Şirketlerin ürün yaşam döngüsü boyunca sera gazı emisyonlarını azaltabilmeleri için gerekli olan güvenilir raporlar.

Şu anda en yaygın olarak benimsenen karbon ayak izi hesaplama yöntemlerinden biri, özellikle ürün ve teknoloji düzeyinde karbon ayak izini hesaplamak için yararlı bir araç görevi gören IPCC yöntemidir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen bu yöntem, yalnızca CO₂'yi değil, emisyonları, ancak aynı zamanda diğer sera gazlarının emisyonları da. Eğer sadece CO₂ emisyonları analize dahil edildiğinde, sonuçlar kg CO biriminde sunulur. Ancak diğer sera gazları da dahil edildiğinde sonuçlar kg CO cinsinden ifade edilir. CO₂'nin kütlelerini temsil eden denklemde eşdeğerler. Bu eşdeğerler, gazın gerçek kütlelerinin küresel ısınma potansiyeli (GWP) ile çarpılmasıyla hesaplanır ve farklı sera gazlarının küresel ısınma etkilerinin karşılaştırılabilir ve katkısız olmasını sağlar. Yakın zamanda yayınlanan altıncı IPCC raporu, küresel ısınma koşulları hakkında güncellenmiş bir referans sağlar [15].

Karbon ayak izi değerlendirmesi ve izlemesi için, özellikle de kuruluşlar için en önemli belge şu anda Sera Gazı Protokolü'dür (GHG Protokolü). GHG Protokolü, sera gazı emisyonlarının raporlanması için kullanılır ve Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ile Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) arasındaki bir iş birliğinin sonucudur. GHG Protokolü şu bileşenleri içerir: GHG Protokolü Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı, Kapsam 2 Kılavuzu ve Kurumsal Değer Zinciri (Kapsam 3) Muhasebe ve Raporlama Standardı. GHG Protokolü'ne göre CF raporlaması kapsamında altı sera gazı dikkate alınır.

GHG Protokolüne göre, CF raporlaması şu ilkelere dayanmalıdır: kullanıcılar için alaka, eksiksizlik, tutarlılık, şeffaflık ve doğruluk. GHG Protokolü, kuruluşun karbon ayak izini üç kapsama ayırır:

- Kapsam 1—kuruluşun sahip olduğu ve kontrol ettiği kaynaklardan kaynaklanan doğrudan emisyonları kapsar; buna kuruluş tarafından kullanılan klima ekipmanından kaynaklanan soğutucu sıvılarıyla ilgili emisyonlar da dahildir;
- Kapsam 2—kuruluşun satın aldığı elektrik, ısı, buhar ve soğutma ile ilişkili dolaylı emisyonları içerir. Bunlar, kuruluşun dışında üretilen emisyonlardır;
- Kapsam 3—Kapsam 2'ye benzer, kuruluş dışında meydana gelen dolaylı emisyonları içerir, ancak Kapsam 2'de yer alanları hariç tutar. Bu emisyonlar satın alınan ham maddeler, hizmetler veya ürünlerle ilişkilidir ve ayrıca kiralanan varlıklarla, kuruluş tarafından üretilen ürünlerin kullanımıyla, atık yönetimiyle ve çalışanların iş seyahatleriyle ilgilidir. Kapsam 3, 15 belirli emisyon kategorisini içerir.

Bir organizasyonun tüm değer zincirinde, ulaştırma sektörü de dahil olmak üzere, karbon ayak izinin yönetilmesi için her üç kapsamda da zorunlu karbon ayak izi analizlerinin getirilmesi esastır.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) metodolojisi, ham maddelerin çıkarılmasından başlayarak, kullanım aşaması boyunca ve nihai bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca potansiyel çevresel etkinin değerlendirilmesini sağlar. LCA, hem çeşitli ürünlerin hem de teknolojik çözümlerin çevresel yönlerinin karşılaştırılmasını sağlayarak, tüm yaşam döngüsü boyunca en düşük çevresel etkiye sahip ürün veya çözümlerin seçilmesini kolaylaştırır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, ISO 14040 [çevre yönetim sistemleriyle ilgili uluslararası standartlar tarafından yönetilir17] ve ISO 14044 [18].

Otomotiv sektöründe, yakıt yaşam döngüsünü (WtW, Kuyudan Tekerleğe) dikkate alan çevresel değerlendirme yöntemleri uygulanmakta olup, iki faz analiz edilmektedir:

- WtT, Kuyudan Tanka—bu aşamada, yakıt üretimi için ham maddelerin çıkarılmasıyla ilişkili çevresel yükler dikkate alınır. Ayrıca yakıt üretimi, nakliyesi ve depolanması da hesaba katılır;
- TtW, Depodan Tekerleğe—Bu aşamada, araçlarda yakıt kullanımına bağlı çevresel yükler, araç çalışması sırasında yakıt ikmali ve yakıt yanması dahil olmak üzere dikkate alınır.

LCA ile karşılaştırıldığında, araç değerlendirmelerindeki WtW yöntemi yalnızca yakıt yaşam döngüsüyle ilişkili enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarıyla ilgili etki kategorilerini dikkate alır. LCA'da, araç üretim sürecinde kullanılan malzemeler ve araç yaşam döngüsünün birçok başka aşaması da çevresel etki kategorileriyle birlikte dikkate alınır.

Karbon ayak izi değerlendirmesine yönelik metodoloji diğer ISO standartlarında da sunulmaktadır. Bir şirketin GHG envanteriyle ilişkili tasarım, geliştirme, yönetim, raporlama ve doğrulama ile ilgili yönergeler ve gereklilikler ISO 14064'te yer almaktadır [21], üç bölümden oluşmaktadır. Bu arada, CF hesaplama önerisi ISO 14067'de sunulmaktadır [20]. Bu standart, ürünün karbon ayak izinin niceliklendirilmesi ve iletilmesi için gereklilikler ve yönergeleri içerir. PAS 2050, ISO 14067:2018'e benzer şekilde [20] bir ürünün tüm yaşam döngüsüne odaklanır. Ancak bu standart, hesaplamaların ve ölçüm metodolojilerinin bireysel aşamaları hakkında daha ayrıntılı yönergeler sağlar. PAS 2050'nin aksine, bu standart dünyanın çeşitli ülkelerini temsil eden üyelere sahip uluslararası bir ekip tarafından geliştirilmiştir. Karbon ayak izini belirlemek için net, tutarlı ve evrensel ilkeler oluşturma ve bu hesaplamaların sonuçlarını raporlama ve geniş çapta erişilebilir hale getirme yönergelerini tanımlama gerekliliği nedeniyle oluşturulmuştur. ISO 14067'ye göre, PAS 2050'ye benzer şekilde karbon ayak izi hesaplama süreci yaşam döngüsü kavramını dikkate almalıdır. Bu nedenle, yalnızca doğrudan iş faaliyetlerinden değil, aynı zamanda dolaylı emisyonlardan kaynaklanan sera gazı emisyonları da analizlere dahil edilir. ISO 14067'de sera gazı emisyonları üç düzeyde gruplandırılır:

- Kapsam 1—Şirketin sahip olduğu veya kontrol ettiği sera gazı kaynaklarından kaynaklanan emisyonlar (doğrudan emisyonlar);
- Kapsam 2—Şirketin tükettiği elektrik, ısı veya buharın üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları (dolaylı enerji kaynaklı sera gazı emisyonları);
- Kapsam 3—Şirketin faaliyetlerinden kaynaklanan ancak diğer şirketlerin sahip olduğu veya kontrol ettiği tesislerde oluşan dolaylı enerjiyle ilgili sera gazı emisyonları dışındaki emisyonlar.

Bu, hesaplamaların yalnızca kuruluş içindeki doğrudan emisyonları değil, aynı zamanda tedarik zinciri içinde meydana gelen emisyonları da hesaba kattığı anlamına gelir; bu da veri analiz sürecini zaman alıcı, emek yoğun ve uzmanlaşmış bilgi gerektiren hale getirir. CF analizi aşağıdaki kapsamaları içerir:

- Beşikten mezara kadar—ham maddenin çıkarılmasından bertarafına kadar tüm aşamaları göz önünde bulundurarak;
- Beşikten kapıya kadar—Hamaddenin çıkarılmasından bitmiş ürünün müşteriye teslimine kadar olan aşamalar, müşteriye ulaşım süreci de dahil olmak üzere hesaplanır.

Masa4ISO 14060 standartları ailesi ile organizasyon ve ürün karbon ayak izi analizi arasındaki bağlantıları açıklar. ISO 14060 standart serisi, sera gazı (GHG) emisyonlarının nicelleştirilmesi, izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına yönelik tutarlı bir yaklaşım sağlayan bir dizi kılavuz sunar. Bu standartlar, hem çevresel hem de organizasyonel faydalar sunarak sürdürülebilir kalkınmayı ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi desteklemeyi amaçlamaktadır. ISO 14060 standartlarının uygulanması, şirketlerin seviyelerini hassas bir şekilde belirleyerek emisyonları etkili bir şekilde yönetmelerini sağlar ve bu da daha bilinçli stratejik planlamayı kolaylaştırır. Sonuç olarak, şirketler emisyonlarını sistematik olarak izleyebilir, kaynaklarını ve çevresel etkilerini analiz edebilir ve ilerlemeyi doğru bir şekilde raporlayabilir. Bu standartlar ayrıca çevresel hedeflere ulaşılmasını destekleyerek şirketlerin GHG yönetimiyle ilgili gelecekteki yasal ve toplumsal gerekliliklere hazırlanmalarına yardımcı olurken, paydaşlar ve tüketiciler nezdindeki güvenilirliklerini artırır.

Tablo 4. Kuruluş ve ürün karbon ayak izi analizi için ISO 14060 standartları ailesine genel bir bakış.

Standart	Tanım
ISO 14064-1 [21]	Kuruluşlar için sera gazı envanterlerini tasarlayın ve geliştirin. Çıktı: Sera gazı envanteri ve raporu.
ISO 14064-2 [24]	Emisyon azaltımını ve giderim iyileştirmesini nicelleştirin, izleyin ve raporlayın. Çıktı: GHG proje dokümantasyonu ve raporları.
ISO 14067 [20]	Fonksiyonel veya beyan edilen birim başına CFP geliştirin. Çıktı: CFP çalışma raporu.
ISO 14064-3 [25]	Sera gazı beyanlarının doğrulanması ve geçerliliğinin onaylanması için rehberlik sağlar.
ISO 14065 [26]	Doğrulama ve tetkik kuruluşları için gereklilikleri belirtir.

4. Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi Analizi - Yöntemlerin ve Belirleyicilerin İncelenmesi

Elektrikli araçların (EV) karbon ayak izinin analizi, sürdürülebilir ulaşım üzerine çağdaş araştırmaların hayati bir yönüdür. Çevre dostu araçlara yönelik artan talep ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel taahhütler karşısında, EV'ler geleneksel yanmalı araçlara bir alternatif olarak popülerlik kazanmaktadır. Karbondioksiti (CO₂) azaltma potansiyellerine rağmen emisyonlarının kullanım aşamasında azaltılması için, elektrikli araçların karbon ayak izinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, bu araçların üretim ve hammadde ediniminden, kullanıma, geri dönüşüme ve bertarafına kadar tüm yaşam döngüsünün dikkate alınmasını gerektirir.

Bilimsel literatürde, EV'lerin karbon ayak izini analiz etmek için yaklaşım ve analiz kapsamı bakımından farklılık gösteren çeşitli metodolojiler vardır. Metodoloji seçimi, araştırma varsayımlarına ve tanımlanmış sistem sınırlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilen elde edilen sonuçları etkiler. Bu farklılıklar ayrıca, araç şarjı için kullanılan bölgesel enerji kaynakları (yenilenebilir veya geleneksel), şarj altyapısı ve piller de dahil olmak üzere bileşenler için geri dönüşüm olanakları gibi çeşitli belirleyicilerin dikkate alınmasından da kaynaklanır.

Bu bölümde elektrikli araçların karbon ayak izinin analizinde kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması ele alınacak ve nihai değerlendirme sonuçları üzerinde önemli etkisi olan temel belirleyiciler sunulacaktır.

4.1. Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi Analizine İlişkin Çalışmaların İncelenmesi

Masa5 elektrikli araçlar (Akü Elektrikli Araçlar—BEV), hibritler (Hibrit Elektrikli Araçlar—HEV), içten yanmalı motorlu araçlar (İçten Yanmalı Motorlu Araçlar—ICEV), fişli hibritler (Fişli Hibrit Elektrikli Araçlar—PHEV) ve yakıt hücreli araçlar (Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar—FCEV) dahil olmak üzere çeşitli araç tipleriyle ilişkili sera gazı (GHG) emisyonlarının analizine ilişkin 24 çalışmaya genel bir bakış sunmaktadır. Genel bakış, binek otomobilleri, otobüsleri, minibüsleri ve kamyonları içermektedir. Bu araçların tüm yaşam döngüleri boyunca toplam çevresel etkisini tahmin etmeyi amaçlayan çok çeşitli metodolojik yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Bu çalışmalar, yalnızca binek araçlara değil, aynı zamanda küresel emisyonları azaltmada ve sürdürülebilir ulaşımın doğru ilerlemede önemli bir rol oynayan toplu taşıma ve yük taşımacılığına olan artan ilgiyi vurgulamaktadır.

Her yazar, karbon ayak izi analizlerini belirli yerel koşullar bağlamında ve elde edilen sonuçları önemli ölçüde etkileyebilecek benzersiz metodolojik varsayımlara dayanarak yürüttü. Yerel koşullar, diğerlerinin yanı sıra, enerji karışımının özellikleri, elektrikli araç şarj altyapısının bulunabilirliği ve türü, yerel emisyon standartları ve çevre düzenlemelerini içeriyordu. Örneğin, elektriğin çoğunlukla yenilenebilir kaynaklardan geldiği bazı İskandinav ülkeleri gibi bölgelerde, elektrikli araçların sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi, enerjileri için fosil yakıtlara güvenen Çin gibi ülkelere göre önemli ölçüde daha düşük olacaktır. Çin'de, elektrik üretiminin çoğu hala fosil yakıtlardan, özellikle kömürden geliyor ve bu da elektrikli araçların karbon ayak izini önemli ölçüde artırıyor. Gao L. ve diğerleri (2012) [27] ICEV'ler, HEV'ler ve PHEV'ler için GHG emisyonları üzerindeki en büyük etkinin araç işletiminden kaynaklandığını, BEV'ler ve FCEV'ler için ise enerji tedarikinin önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Ayrıca, Lie K.

W. ve diğerleri (2021) [28] biyoyakıt ve elektrikli otobüslerin tanıtımıyla bir otobüs filosunun karbon ayak izinin %37 oranında azaltıldığını belirtti. Ayrıca, İskandinav enerji karışımı kullanılarak tam elektrikleştirmeyle ek %52 oranında bir azalma sağlanabileceğini belirterek, araç şarjı için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının önemli çevresel faydalarını vurguladılar.

Araç markaları göz önünde bulundurulduğunda, Toyota Corolla, Toyota Prius, Nissan Leaf, VW Golf ve Tesla Model 3 gibi popüler modeller analiz edilmektedir. Ancak, tüm yazarların çalışmalarına belirli araç markalarını dahil etmediğini, bunun yerine genellikle genel teknolojik kategorilere odaklandığını belirtmek önemlidir. Bu modeller çeşitli üreticilerden gelmektedir ve bu da araştırmanın otomotiv pazarının ve teknolojik çeşitliliğinin geniş bir kesitini temsil etmeyi amaçladığını göstermektedir. Analizler farklı bölgeler bağlamında yürütülmekte ve yerel enerji koşullarının ve düzenlemelerin araç emisyonları ve yaşam döngüsü analizleriyle ilgili çalışmaların sonuçları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Araç türü, karbon ayak izi analizlerinde önemli bir rol oynar, çünkü farklı araç kategorilerinin GHG emisyonları üzerinde farklı etkileri vardır. Binek otomobiller, yaygın kullanımları ve sera gazı emisyonlarındaki önemli payları nedeniyle bu araçlara ayrılmış 17 makale ile en sık analiz edilenlerdir. Hem elektrikli hem de içten yanmalı otobüsler, özellikle şehirlerde toplu taşıma sistemlerinin önemli bir parçasıdır ve çevresel etkileri önemli bir araştırma konusu haline gelir; altı yayında yansıtılmıştır. Lojistik ve teslimatlar için olmazsa olmaz olan kamyonlar ve minibüsler, yoğun yakıt tüketimleri nedeniyle yüksek karbon ayak izine sahiptir. Bu da yoğun bir çalışma alanı olmuştur, ancak bu araç türlerinin her birine yalnızca bir makale ayrılmıştır.

Tablo 5. Elektrikli binek otomobiller, otobüsler, kamyonlar ve minibüslerden kaynaklanan karbon ayak izi analizine ilişkin literatür taraması.

Nº	Yazarlar	Araç Tipi	Araç Modelleri	Pitme Tip	İşlevsel Birim	Değerlendirme Yöntemler	Bölge
1	Gao L. ve diğerleri. (2012) [27]	Yolcu arabalar	Toyota Corolla, Nissan Yaprak, GM Volt, Toyota Prius, Toyota Prius Eklenti, Honda Clarity	ICEV, BEV, Yüksek Hızlı Ev, Yüksek Hızlı Ev, FCEV	160.000 mil	CML2001	Çin
2	Hawkins TR ve diğerleri. (2012) [29]	Yolcu arabalar	Mercedes A-Serisi, Nissan Yaprak	ICEV, BEV	1 km	SELAMLAŞMAK	Avrupa Birlik
3	Cooney G. ve diğerleri. (2013) [30]	Otobüsler	-	ICEV, BEV	1 araç-kilometre bir üzerinde 12 yıllık ömür boyu.	ETKİ2002	Amerika
4	Girardi P. ve diğerleri. (2015) [31]	Yolcu arabalar	Volkswagen Golf, Volkswagen e-Golf	ICEV, BEV	150.000 km	IPCC	İtalya
5	Onat NC ve diğerleri. (2015) [32]	Yolcu arabalar	Toyota Corolla, Nissan Yaprak, Toyota Prius, Toyota Prius-Tak ve çalıştır, Chevrolet Volt	ICEV, BEV, Yüksek hızlı, yüksek hızlı	1 km	SELAMLAŞMAK	Amerika
6	Tagliaferri C. ve diğerleri. (2016) [33]	Yolcu arabalar	Toyota Yaris, Nissan Yaprak, Toyota Yaris Hibrit, Toyota Prius, Toyota Prius Eklentisi	ICEV, BEV, HEV	1 km	KML 2001	Avrupa Birlik

Tablo 5.Devamı

N°	Yazarlar	Araç Tipi	Araç Modelleri	Tahrik Tip	İşlevsel Birim	Değerlendirme Yöntemler	Bölge
7	Zhao Y. ve diğerleri. (2016) [34]	Teslimat kamyonlar	Yük gemisi P700, Yük gemisi P70H, Grumman Olson, Navistar E-Yıldız Sınıfı 3, Smith Newton Sınıf 5	ICEV, HEV, CNG, BEV	Araç Milleri Seyahat	Hibrit LCA	Amerika
9	Qiao Q. ve diğerleri. (2017) [35]	Yolcu arabalar	Mercedes S400, Mercedes S400 Hibrit	ICEV, BEV	Araç başına	SELAMLAŞMAK	Çin
8	Mierlo Ortak Girişimi ve diğerleri. (2017) [36]	Yolcu arabalar	Volkswagen Golf, Fiat Punto, Nissan Leaf, Opel Ampera, Toyota Prius	ICEV, BEV, Yüksek hızlı, yüksek hızlı	1 km	Yemek tarifi	Belçika
10	Haris A. ve diğerleri. (2018) [37]	Otobüsler	-	BEV, ICEV	1 km	EIO-LCA	İngiltere
11	Rosenfeld D. C. ve diğerleri. (2019) [38]	Yolcu arabalar	-	ICEV, BEV, PHEV, HEV, FCEV	1 paket km	KML 2001	Avrupa Birlik
12	Juršova S. ve diğerleri. (2019) [9]	Yolcu arabalar	-	ICEV, BEV	100 km	IPCC2013	Çek Cumhuriyet
13	Qiao Q. ve diğerleri. (2019) [39]	Yolcu arabalar	BAIC EC-Serisi	ICEV, BEV	150.000 km	SELAMLAŞMAK	Çin
14	Bekel K. ve Pauliuk S. (2019) [40]	Yolcu arabalar	Volkswagen e-Golf, Toyota Mirai	BEV, FCEV	1 km	Yemek tarifi	Almanya
15	Chang C. ve diğerleri. (2019) [41]	Otobüsler	-	ICEV, LNG, LPG, FCEV, PEV	1 paket km	LCA ISO/TS 14067:2013 ve PAS2050	Tayvan
16	Petrauskienė K. ve diğerleri. (2020) [42]	Yolcu arabalar	Fiat Tipo, Nissan Leaf	ICEV, BEV	1 km	Yemek tarifi	Litvanya
17	Wong EYC ve diğerleri. (2020) [43]	Yolcu arabalar	Tesla Model 3, Toyota Mirai, Hyundai ix35, Honda Clarity Yakıt Hücresi, Mercedes GLC F-Hücresi	FCEV, BEV	1 km	SELAMLAŞMAK	Çeşitli ülkeler
18	Şamdanlaresi D. ve diğerleri. (2021) [44]	Yolcu arabalar	-	FCEV, H2-ICE, HEV H2-IC,E CNG, HEV Sıkıştırılmış Doğalgaz, Hythane, H2-Benzin	1 km	SELAMLAŞMAK	Küresel
19	Pipiton E. ve diğerleri. (2021) [45]	Yolcu arabalar	Verilen 15 modelden örnek bir seçki: Volkswagen Polo, Peugeot e-208, Renault Clio Hybrid	ICEV, BEV, HEV	150.000 km	Yemek tarifi, SELAMLAŞMAK	AB
20	Yang L. ve diğerleri. (2021) [46]	Yolcu arabalar	Toyota Corolla, Nissan Yaprak, Toyota Corolla Eklenti	ICEV, BEV, PHEV	150.000 km	SELAMLAŞMAK	Çin

Tablo 5.Devamı

N°	Yazarlar	Araç Tipi	Araç Modelleri	Tahrik Tip	İşlevsel Birim	Değerlendirme Yöntemler	Bölge
21	Yalan KW ve diğerleri. (2021) [28]	Otobüsler	Volvo 7900 Elektrik	BEV, HEV, PHEV	1 paket km	Giriş-Çıkış temelli (G/Ç-LCA)	Norveç
22	García A. ve diğerleri. (2021) [47]	Otobüsler	MAN Aslan Şehri, Volvo 7900 Hibrit, BYD 12 m Elektrikli	ICEV, BEV, HEV	1 paket km	SELAMLAŞMAK	İspanya
23	Ellingsen L. ve diğerleri. (2022) [48]	Otobüsler	-	BEV, ICEV	1 km	KML-IA	Norveç
24	Farzane F. ve Jung S. (2023) [49]	Kamyonet	Ford Transit, Ford E-Transit, Mercedes Koşucu 2500, Yıldırım ZEV3	ICEV, BEV	1 km	Sahip olmak algoritma CF katsayılı.	Amerika

Metodolojik varsayımlar da çalışma sonuçlarında önemli bir rol oynadı, çünkü analizlerde ele alınan araçların sistem sınırlarını, işlevsel birimleri ve yaşam döngüsü aşamalarını tanımlamaya yönelik çeşitli yaklaşımları içeriyordu. Tablo'da sunulan literatür incelemesine göre5, binek araçlar için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi'nde (LCA) en yaygın kullanılan işlevsel birim, kat edilen kilometre veya 100 km'dir. Daha fazla yolcu taşıyan otobüsler için, tek bir yolcunun kat ettiği mesafeyi yansıtan 1 pkm (yolcu-kilometre) birimi kullanılır. Bu yaklaşım, daha fazla sayıda insanı taşımamanın verimliliğini hesaba katarak çevresel etkinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlar. Kamyonlar için, araştırma amacına bağlı olarak çeşitli işlevsel birimler kullanılır ve genellikle hem kargo ağırlığını hem de kat edilen mesafeyi içerir.

En sık kullanılan yöntem dokuz makalede uygulanan GREET'ti. ReCiPe ve CML2001 yöntemleri dört çalışmada kullanıldı. Diğer yöntemler arasında IPCC, IMPACT2002, LCA ISO/TS 14067:2018 ve PAS 2050 yer alır. Her yöntemin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine yönelik belirli varsayımları ve yaklaşımları vardır ve bunlar elde edilen sonuçları ve farklı bölgelerdeki uygulanabilirliğini etkiler.

Araç karbon ayak izi analizi üzerine çalışmalar, belirli çevresel, düzenleyici ve enerjiyle ilgili koşulları dikkate alınarak çeşitli bölgelerde yürütülmüştür. Yüksek emisyon seviyelerine ve yanmalı araçların yoğun kullanımına sahip olan Çin ve ABD'de, bu çalışmalar genellikle artan araç sayısına ve bunların hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki etkilerine yanıt olarak emisyonları azaltma ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, emisyon azaltma ve sürdürülebilir kalkınma konusunda ayrıntılı düzenlemelerin yürürlükte olduğu Avrupa Birliği'nde, birçok çalışma taşımacılığın elektrikleştirilmesine ve bunun sera gazı emisyonları üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Özellikle Avrupa, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın hedeflerini destekleyen düşük emisyonlu taşımacılık teknolojilerinin uygulanmasını vurgulamaktadır.

4.2. Aracın Tüm Yaşam Döngüsü Dikkate Alınarak Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzinin Değerlendirilmesinde Belirleyiciler

Tablolar6Ve7Elektrikli araçlar için karbon ayak izinin belirleyicilerine ve GHG emisyon analizlerinin ana sonuçlarına ilişkin ayrıntılı bir genel bakış sunar. Tabloların iki bölüme ayrılması (binek araçlar ve kamyonlar, otobüsler ve minibüsler için ayrı ayrı) bu araçların kullanım özellikleri, işlevleri ve çevresel etkilerindeki farklılıkları yansıtır.

Masa6Elektrikli binek araçların karbon ayak izine ilişkin çalışmaların sonuçlarına ilişkin ayrıntılı bir genel bakış sunarak, sera gazı emisyonlarının ana belirleyicilerine ve analizlerde dikkate alınan sistem sınırlarına odaklanmaktadır. Bu çalışmaların bulguları, BEV'lerin toplam karbon ayak izini etkileyen en önemli faktörün, özellikle elektrik üretmek için kullanılan enerji kaynaklarına bağlı olan batarya şarjıyla ilgili emisyonlar olmak üzere aracın kullanım aşaması olduğunu vurgulamaktadır.

Araç kullanımı sırasında şarj aşaması, emisyonların doğrudan belirli bir bölgenin enerji karışımına bağlı olması nedeniyle BEV'lerin karbon ayak izi üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bazı çalışmalar (örneğin, Girardi P. ve diğerleri, 2015 [31]) enerji karışımında nispeten yüksek oranda fosil yakıt bulursa bile, BEV'lerin ICEV'lere kıyasla daha düşük karbon ayak izi oluşturabileceğini göstermektedir.

Pil Elektrikli Araçların (BEV) üretimi, özellikle pil üretim süreci, toplam sera gazı emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Metallerin (örneğin lityum, nikel, kobalt) çıkarılması ve işlenmesi gibi üretim süreçleri emisyon açısından yoğun olup çevreye yük bindirir. Örneğin, Qiao Q. ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada [35], NCM (nikel-kobalt-manganez) pillerle elektrikli araç üretiminin yaklaşık 14,6 ton CO ürettiği gösterildi, ICEV'lerden %59 daha yüksektir. Bu daha yüksek ayak izi, esas olarak bu metallerin çıkarılması ve rafine edilmesinde yer alan enerji yoğun süreçlerden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, aracın menzilinı uzatmak için pil kapasitesi arttıkça, üretim sırasında hammadde ve enerji talebi artar ve emisyonları daha da yükseltir. Bu emisyonları azaltmak, hem kritik metalleri yeniden kullanmak için pil geri dönüşümünde ilerlemeler hem de üretim sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş gerektirecektir.

Tablodaki çalışmaların çoğu, üretimden kullanıma ve kullanım ömrü sonunda elden çıkarmaya kadar tüm aşamaların dikkate alınmasına olanak tanıyan aracın tam bir yaşam döngüsü analizini içerir. Ek olarak, yedi yayın, tüm yakıt yaşam döngüsünün analiz edilmesinin önemini vurgulayarak kuyudan tekerleğe yaklaşıma odaklanır.

Masa7kamyon, otobüs ve minibüs gibi ticari araçlar için karbon ayak izinin belirleyicilerini ve sera gazı emisyon analizlerinin ana sonuçlarını açıklar. Bu araçlar için, toplam emisyonları etkileyen ana faktörler, belirli kullanım özellikleri ve daha yüksek çevresel yükleri nedeniyle binek araçlardan farklıdır.

Otobüsler, özellikle elektrikli olanlar için, şarj aşaması ve elektrik kaynakları toplam karbon ayak izi için çok önemlidir. Örneğin, Harris A. ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada [37], elektrikli otobüslerin, bölgenin enerji karışımına bağlı olarak, geleneksel dizel otobüslere kıyasla sera gazı emisyonlarını %10-58 oranında azaltabileceği gösterildi. Şebekelerinde yenilenebilir enerji payı daha yüksek olan bölgeler, elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar önemli ölçüde daha düşük olduğundan en büyük azalmaları görüyor. Ancak, pahalı pil üretimi ve altyapı gereksinimleri nedeniyle elektrikli otobüslerin yaşam döngüsü maliyetleri önemli ölçüde daha yüksek olabilir ve bu, sürdürülebilirliklerini ve büyük ölçekli benimseme için uygulanabilirliklerini değerlendirmede önemli bir ekonomik faktör haline gelir.

Tablo 6. Elektrikli binek araçların karbon ayak izi değerlendirmesinin belirleyicileri.

N°	Yazarlar	Tahrik Tipi	Analiz Sonuçları	Karbon Ayak İzi Belirleyiciler	Sistem Sınırı
1	Gao L. ve diğerleri. (2012) [27]	ICEV, BEV, HEV, PHEV, FCEV	Elektrikli araçlar (EV'ler), hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) ve Yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV'ler) emisyonunda azalmaya olanak tanıyan enerji tüketimi ve emisyonları tüm yaşam döngüsü.	ICEV'ler, HEV'ler ve PHEV'ler için sera gazı emisyonları üzerindeki en büyük etki araç işletiminden, BEV'ler ve FCEV'ler için yakıt tedariki rol oynuyor önemli bir rol.	Kuyudan tekerleğe, Beşikten mezara
2	Hawkins TR ve diğerleri (2012) [29]	ICEV, BEV	BEV'ler, benzinli (ICEV'ler) araçlara kıyasla GWP'yi %20-24 ve elektrikli araçlara kıyasla %10-14 oranında azaltır. Dizel ICEV'ler, aracın ömrünün 150.000 km olduğunu varsayarsak.	Fazı doğrudan kullan yakıt yanması yoluyla veya dolaylı olarak elektrik üretimi.	Beşikten mezara

Tablo 6.Devamı

N°	Yazarlar	Tahrik Tipi	Analiz Sonuçları	Karbon Ayak İzi Belirleyiciler	Sistem Sınırı
3	Girardi P. ve diğerleri. (2015) [31]	ICEV, BEV	İtalya'da elektrik fosil yakıtlardan gelse de BEV'ler sera gazlarını azaltma yeteneğine sahiptir.	Pil üretimi için BEV'ler büyük bir katkıda bulunan Sera gazı emisyonları.	Beşikten mezara
4	Onat NC ve ark. (2015) [32]	ICEV, BEV, HEV, PHEV	Ortalama enerji karışımına dayalı bir senaryoda, EV'ler 24 eyalette en az karbon yoğunluğuna sahip araç seçeneği iken, HEV'ler en fazla enerji verimliliğine sahip olanlardır 45 eyalet.	Operasyon aşaması tüm bunlar arasında sera gazı emisyonları üzerindeki en büyük etki Araçlar incelendi.	Beşikten mezara
5	Tagliaferri C. ve diğerleri (2016) [33]	ICEV, BEV, HEV	ICEV'lerin kullanım aşamasında sera gazı emisyonları BEV'lere göre %50 daha fazladır.	Kullanım aşaması, sömürü değerli metaller ve kimyasal üretimi Pil üretim aşamasında kullanılır.	Beşikten mezara
6	Qiao Q. ve diğerleri. (2017) [35]	ICEV, BEV	Ortakz bir EV için araç üretiminden kaynaklanan emisyonlar NCM pilleri etrafta 14,6 ton, bir ICEV için 9,2 tondan %59 daha fazladır. LFP bataryalı bir EV için emisyonlar biraz daha yüksektir 14,7 ton, %60'lık bir artış ICEV'e kıyasla artış.	Ortakzaktif emisyonlar maddi üretim en etkili hem LFP hem de NCM pilleri.	Beşikten mezara
7	Mierlo JV ve diğerleri. (2017) [36]	BEV, HEV, PHEV, EREV	Elektrifikasyon seviyesi arttıkça (hibritlerden (HEV'ler)) Plug-in hibritlere (PHEV'ler), uzun menzilli elektrikli araçlara (EREV'ler) ve tamamen elektrikli araçlar (BEV'ler) - yaşam döngüsü CO ₂ Bu araçların emisyonları sistematik olarak azaltmak.	Elektrik üretimi araçlar. PHEV için, yakıtta nükleer, kömür ve fosil yakıtların madenciliği tedarik zincirleri.	Beşikten mezara
8	Rosenfeld DC ve diğerleri (2019) [38]	ICEV, BEV, PHEV, HEV, FCEV	FCEV'lerin ve EV'lerin üretim süreci %50 kadar yüksek bir GWP'ye sahip olabilir, ancak 200.000 km'lik bir kullanım ömrü boyunca, GWP'leri EV'ler için %45 daha düşüktür ve FCEV'lerde ICEV'lere göre %35 daha düşük.	Hibrid elektrikli araçlar (HEV) ve benzinli içten yanmalı araçlar (ICEV) için kullanım aşaması en yüksek sera gazı etkisine sahiptir; FCEV'ler için yakıt üretimi ve PHEV'ler, araç üretim hakim.	Kuyudan tekerleğe
9	Jursova S. ve diğerleri. (2019) [9]	ICEV, BEV	Çek Cumhuriyeti'nde elektrikli araçların karbon ayak izi değerinin 2015 ile 2050 yılları arasında azalması bekleniyor. Elektrikli Çek Cumhuriyeti'nde karma elektrik kaynaklarından araç şarjı, azalmalara yol açtı karbon ayak izlerinde ve su ayak izlerinde artışlar.	BEV için elektrik.	Beşikten mezara

Tablo 6.Devamı

N°	Yazarlar	Tahrik Tipi	Analiz Sonuçları	Karbon Ayak İzi Belirleyiciler	Sistem Sınırı
10	Qiao ve diğerleri. (2019) [39]	ICEV, BEV	2015 yılında bir EV'nin yaşam döngüsü GHG'si emisyonlar yaklaşık 41,0 t CO ₂ idizeq, bir ICEV'den %18 daha düşük. Bunun 34,1 t'ye düşmesi bekleniyor Ortak2Elektrik kaynaklı sera gazı emisyonlarının azalması nedeniyle 2020 yılına kadar eşdeğer enerjiye ulaşması hedefleniyor.	Elektrikli araçların sera gazı emisyonları üzerindeki en büyük etki, elektrik üretim aşamasından (WtW) kaynaklanmaktadır.	Kuyudan tekerleğe, Beşikten mezara
11	Bekel K. ve Pauliuk S. (2019) [40]	ICEV, BEV, FCEV	BEV'ler, BEV'lerden daha düşük GWP'ye ulaşır FCEV'ler (örneğin, BEV: 1,40E-01 kg CO ₂ -eq/km, FCEV: 1,68E-01 kg CO ₂ -eşdeğer/km)	Yakıt tedarik altyapısı BEV ve FCEV için.	Kuyudan tekerleğe, Beşikten mezara
12	Petrauskienė K. ve diğerleri (2020) [42]	ICEV, BEV	2015 yılında, BEV'ler güç kaynağı olarak Mevcut elektrik karışımı, benzinli ICEV'lerden %26 daha fazla sera gazı emisyonu üretti ve %47 daha fazla dizel ICEV'ler.	BEV için fazı kullanın.	Kuyudan tekerleğe, Beşikten mezara
13	Wong EYC ve diğerleri (2020) [43]	ICEV, FCEV, BEV	En fazla karbon yoğunluğuna sahip yöntem, dağıtılmış şebeke elektriğinden üretilen hidrojenidir, en az karbon yoğunluğuna sahip yöntem ise yöntem, sıvı kamyon teslimatı ve gaz dağıtımı ile merkezi biyokütleden hidrojenidir. Merkezi rüzgar elektroliz ayrıca düşük emisyonlar sunar ve bu da onu diğer elektroliz türlerine kıyasla daha sürdürülebilir bir seçenek haline getirir. şebeke elektriği.	Yakıt tüketim aşaması ICEV için.	Kuyudan tekerleğe
14	Candelaresi D. ve diğerleri (2021) [44]	FCEV, H2-ICE, HEV H2-IC,E CNG, HEV CNG, Hythane, H2-Benzin	Hidrojenle çalışan araçlar karbonsuzlaştırma sürecine en çok katkıda bulunanlar, ancak Çevresel etkinin birincil kaynağının araç altyapısı olduğu vurgulandı.	Hidrojenle çalışan araçlar, araç altyapısı vardı en büyük etki.	Kuyudan tekerleğe
15	Pipitone E. ve diğerleri. (2021) [45]	ICEV, BEV, HEV	Yaşam döngüsü boyunca bir BEV, eşdeğer bir ICEV'e kıyasla küresel ısınma emisyonlarının yaklaşık %60'ını üretir, ancak asitleştirici ve partikül madde emisyonları iki kat daha yüksek.	ICEV'ler ve HEV'ler için, yakıt nedeniyle kullanım aşaması en yüksek sera gazı etkisine sahiptir yanma. BEV'ler için, üretim, özellikle pil üretimi, hakimdir Sera gazı emisyonları.	Beşikten mezara
16	Yang L. ve diğerleri. (2021) [46]	ICEV, BEV, PHEV	Dahili ile karşılaştırıldığında yanmalı motorlu araçlar (ICEV'ler), akülü elektrikli araçlar (BEV'ler) ve şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler) azaltma potansiyeli Ortak2emisyonlar.	ICEV için yakıt üretimi ve PHEV. Elektrik BEV için nesil.	Beşikten mezara

Tablo 7. Elektrikli otobüs, kamyon ve minibüslerin karbon ayak izi değerlendirilmesinin belirleyicileri.

N°	Yazarlar	Tahrik Tip	Analiz Sonuçları	Karbon Ayak İzi Belirleyiciler	Sistem Sınır
1	Cooney G. ve diğerleri. (2013) [30]	ICEV, BEV	Çalışma, kullanım aşamasının, geleneksel otobüsler ve elektrik için dizel yanma içeren Elektrikli otobüs üretimi en çok etki yaratan kategorilere hakim olurken, pil üretimi önemli ölçüde küresel ısınmaya, kanserojen emisyonlara, ozona katkıda bulunur tükenme ve ekotoksiste.	ICEV için fazı kullan ve BEV için elektrik.	Beşikten mezara
2	Zhao Y. ve diğerleri. (2016) [34]	ICEV, HEV, CNG, BEV	Ülke çapındaki ortalama elektrik karışımına göre, akülü elektrikli kamyonlar daha fazla sera gazı emisyonu üretiyor egzoz emisyonları olmamasına rağmen, diğer kamyonlardan daha uzun ömürlüdür. Dizel, hibrit, CNG ve Elektrikli araçlar ve hibrit kamyonlar en az sera gazı emisyonu üretiyor.	Yakıt Tüketimi BEV.	Kuyudan tekerleğe
3	Harris A. ve diğerleri. (2018) [37]	BEV, ICEV	Pil elektrikli otobüsleri içeren bir senaryoda, yaşam döngüsü sera gazı emisyonunun %80 olma olasılığı vardır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında gaz (GHG) emisyonları %10-58 oranında azalır dizel otobüsler. Bununla birlikte, yaşam döngüsü maliyetlerin tahmin edildiği gibi %129-247 daha yüksektir.	GHG emisyonu bağlı olarak elektrik üretimi kaynak.	Beşikten mezara
4	Chang C. ve diğerleri. (2019) [41]	ICEV, LNG, LPG, FCEV, PHEV	Dizel otobüslerin LNG ile değiştirilmesi karbon ayak izini %16 artırırken, sıvılaştırılmış petrol gazı kullanımı %13 azaltır. Hidrojen yakıt hücreli otobüsler karbon ayak izini %47 azaltır, ve plug-in elektrikli otobüsler %31 oranında. Sadece hidrojen ve plug-in elektrikli otobüsler sera gazıyla uyumlu azaltma hedefleri. Tayvan'ın tüm şehir otobüslerini hidrojen yakıtına dönüştürmek 227.832 ton CO2 emisyonunu azaltabilir 2ve yıllık.	Yakıt üretimi FCEV ve PHEV için sahne. Otobüs servis sahnesi ICEV, LNG otobüsleri için ve LPG'li otobüsler.	Beşikten mezara
5	Lie KW ve ark. (2021) [28]	BEV, HEV, PHEV	Biyoyakıt ve elektrikli otobüslerin tanıtımıyla bir otobüs filosunun karbon ayak izi %37 oranında azaltıldı. Ek %52 oranında azalma İskandinav'da tam elektrikleştirme ile elde edilebilir şarj enerjisi karışımı.	GHG emisyonu bağlı olarak elektrik üretimi kaynak.	Kuyudan tekerleğe
6	Garcia A. ve diğerleri. (2021) [47]	ICEV, BEV, HEV	Hibrit otobüsler CO2 emisyonunu azaltıyor 2 emisyonlarını %40 oranında azaltırken, elektrikli otobüsler Her ikisi de yolcu-kilometre başına ölçülen %60 azalma.	TtW (tanktan tekerleğe) ICEV ve HEV için faz. WtT (kuyudan tanka) BEV için aşama.	Beşikten mezara

Tablo 7.Devamı

N°	Yazarlar	Tahrik Tip	Analiz Sonuçları	Karbon Ayak İzi Belirleyiciler	Sistem Sınır
7	Ellingsen L. ve diğerleri. (2022) [48]	BEV, ICEV	400 kWh lityum demir fosfat (LFP) bataryaya sahip tak-çalıştır otobüs, tüm araçlar arasında en yüksek etkiyi gösteriyor Otobüsün kendisi de dahil olmak üzere kategoriler, pil, bakım, pil değişimi, elektrik ve kullanım ömrü sonu aşamaları. BEV'i genişletme 10 ila 20 yıl arasında değişen yaşam süreleri hem çevresel performansları hem de kullanım sürelerini değiştiriyor.	En yüksek emisyonlar büyük akülü otobüsler içindir (lityum demir fosfat 400 kWh), ve aşamalar ile en yüksek emisyonlar kullanım ve değiştirme özellikle pillerin genişletilmiş yaşam döngüleri.	Beşikten mezara
8	Farzaneh F. ve Jung S. (2023) [49]	ICEV, BEV	Vanlar için yapılan analiz, Florida'daki elektrikliendirmenin araç başına karbon ayak izini %22,6 oranında azalttığını gösteriyor. Elektrikli araçlar için ham madde üretimi en büyük yayıcıken, ICEV'ler için bu, operasyon aşamasıdır. Ömür boyu duyarlılık çalışması, 350.000 km'lik bir ömürle elektrikli araçların %48,1 daha verimli ICEV'lerle karşılaştırıldığında.	Hammadleden bakireye BEV için giriş.	Beşikten mezara

Kamyonlar ayrıca, özellikle yakıt tüketiminin emisyonların ana kaynağı olduğu kullanım aşamasında önemli emisyonlar üretir. Zhao Y. ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışma [34] Elektrikli kamyonların, egzoz emisyonları olmamasına rağmen, bazı enerji karışımlarında pil üretimi ve elektrik üretimiyle ilişkili yüksek karbon ayak izi nedeniyle, yanmalı motorlara sahip benzerlerinden daha yüksek toplam karbon ayak izine sahip olabileceğini buldu.

Farzaneh F. ve Jung S. (2023) tarafından yapılan çalışmada vurgulandığı gibi, minibüsler için [49], emisyon analizi, Florida eyaletindeki elektrikliendirmenin araç başına karbon ayak izini %22,6 oranında azalttığını gösterdi. Bu azalma, artan oranda yenilenebilir enerji içeren Florida'nın gelişen enerji karışımından etkileniyor ve bu da araç şarjı için kullanılan elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yardımcı oluyor. Elektrikli araçlarda, emisyonlar üzerindeki en büyük etki, özellikle hem kaynak hem de enerji yoğun olan lityum, nikel ve kobalt gibi metallerin madenciliği ve işlenmesi nedeniyle piller için hammadde üretiminden kaynaklanıyor. Bu arada, yanmalı araçlarda, baskın emisyon aşaması, fosil yakıtların sürekli yakılmasının doğrudan CO₂'ya katkıda bulunduğu kullanım aşamasıdır ve diğer sera gazı emisyonları. Bu fark, özellikle yenilenebilir enerji altyapılarını genişletmeye devam eden bölgelerde elektrikli kamyonetlere geçişin potansiyel faydalarını vurgular.

Pil geri dönüşüm süreci, elektrikli araçların (EV) yaşam döngüsünün sonunda karbon ayak izini (CF) azaltmada önemli bir rol oynar. Li ve diğerlerine göre (2022) [50], geri dönüşüm yönteminin seçimi genel CF'yi önemli ölçüde etkiler. Daha düşük enerji talepleri olan hidrometalurjik prosesler, yüksek sıcaklık gereksinimleri nedeniyle daha yüksek emisyonlar üreten pirometalurjik yöntemlere kıyasla önemli çevresel faydalar sunar. Hidrometalurji gibi verimli geri dönüşüm yöntemleri, EV'lerin genel CF'sini büyük ölçüde azaltabilir ve sürdürülebilirliği artırabilir.

Şah ve Kaka (2022) [51] sodyum iyon ve redoks akış (RF) pilleri gibi alternatif pil teknolojilerinin daha sürdürülebilir üretim ve kaynak bulunabilirliği nedeniyle karbon ayak izini daha da düşürebileceğini vurgulamaktadır. Yenilikçi pil teknolojilerini gelişmiş geri dönüşüm yöntemleriyle birleştirmek, EV'lerin yaşam döngüsü boyunca CF'sini önemli ölçüde azaltabilir.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, yaşam döngüsü yaklaşımına dayalı kavramların, yöntemlerin ve standartların bir incelemesi de dahil olmak üzere karbon ayak izi değerlendirmesi için metodolojilere genel bir bakış sunmaktadır. İnceleme, bugüne kadar çeşitli karbon ayak izi değerlendirme yöntemlerinin geliştirildiğini ve bu nedenle farklı yöntemlerle elde edilen sonuçların standartlaştırılmasının zor olduğunu vurgulamaktadır. Şu anda, ESG raporlama yönergelerinin perspektifinden, ulaştırma sektöründe de, karbon ayak izi değerlendirmesi için birincil yöntem GHG Protokolüdür.

Birçok ülkede, iklim değişikliği etkilerini azaltmak için alternatif yakıtlar tanıtılıyor. Bu çalışma, çeşitli elektrikli araçların yaşam döngüsü karbon ayak izine ilişkin literatürü inceleyerek, elektrikli araçların karbon ayak izini etkileyen birincil faktörün araç akülerini şarj etmek için kullanılan elektriğin üretimi olduğunu gösteriyor. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektriğin önemli bir bölümünü oluşturduğu ülkelerde, elektrikli araçların çevresel etkisi önemli ölçüde daha düşüktür. Bu tür ülkelerde, elektrikli araçlar için karbon ayak izi belirleyicisi, akünün üretimi ve aracın kendisidir. Özellikle otobüsler ve kamyonlar gibi daha büyük araçlar için akü üretimi, önemli miktarda CO₂ üretir. Metallerin çıkarılması ve işlenmesi sırasında enerji yoğun süreçlerden kaynaklanan emisyonlar, üretim aşamasını bu araçlar için kritik bir aşama haline getiriyor.

Otobüsler gibi ticari araçlar için, "yolcu kilometresi" veya "kilometre" gibi farklı işlevsel birimler, belirli işlevlerine göre çevresel etkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılır. Ekolojik faydalarına rağmen, elektrikli araçların yaşam döngüsü maliyetleri, yanmalı araçlardan daha yüksek olabilir; bu da sürdürülebilirliklerini değerlendirirken bir maliyet-fayda analizini gerekli kılar.

Bu inceleme, gerçek çevresel etkiyi değerlendirirken tam yaşam döngüsü ve kullanım özelliklerinin dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulayarak, ulaştırma sektöründe standartlaştırılmış analitik yöntemlerin gerekliliğini göstermektedir. Gerçekleştirilen incelemeye dayanarak, tam çevresel faydalar elde etmek için, çabaların, elektrikli araçları şarj etmek için kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmak da dahil olmak üzere enerji sektörünün karbondan arındırılmasına odaklanması önerilmektedir. Burchart-Korol ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen analize dayanarak [52], elektrikli araçları şarj etmek için kullanılan elektrik kaynağının toplam sera gazı (GHG) emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Çalışma, 2015 yılında elektriğin %84,76'sının fosil yakıtlardan geldiği Polonya'da elektrikli araçların karbon ayak izinin yenilenebilir enerji kaynakları kullanan bölgelere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu gösterdi. Bu sonuçlar, enerji sektörünün karbondan arındırılmasının ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılmasının, elektrikli araç kullanımının tüm çevresel faydalarına ulaşmak için elzem olduğunu göstermektedir. Rüzgar veya güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yaparak, CO₂'yi önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Elektrikli araçların işletimiyle ilişkili emisyonlar. Bu nedenle, enerji karışımını yenilenebilir kaynaklara doğru değiştirmek, elektrikli taşımacılığın karbon ayak izini düşürmenin en etkili yollarından biri olabilir.

Elektrikli araçlarda enerji tüketimini azaltabilecek çözümler de mevcuttur, örneğin araç hafifletme ve araçta enerji yönetimini optimize etme stratejileri. Sandrini ve diğerleri (2023) [53] hafifletmenin enerji tüketimi üzerindeki etkisini analiz etti ve aracın kütlesini azaltmanın, özellikle elektrikli araçlarda enerji tüketimini sınırlama bağlamında, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırdığını buldu. Candela ve diğerleri (2024) [54] daha hafif malzeme ve yapıların kullanılmasının, operasyonel aşamada enerji tüketimini düşürerek araçların toplam karbon ayak izini azalttığını vurguladı.

Ayrıca, rejeneratif frenleme stratejilerinin uygulanması enerji geri kazanımını önemli ölçüde artırabilir ve araçlarda daha verimli enerji yönetimine katkıda bulunabilir. Sandrini ve diğerleri (2023) [55], düzgün uygulandığında WLTC sürüş çevrimi sırasında bu sisteme sahip olmayan bir araçla karşılaştırıldığında %30'a kadar enerji geri kazanımı sağlayan ve aynı zamanda güvenlik açısından hayati önem taşıyan frenleme sırasında aracın dengesini artıran rejeneratif frenleme mantığını sundu.

Geleneksel araçlar için yakıt istasyonu altyapısının ve elektrikli araçlar (EV) için şarj istasyonlarının karbon ayak izi (CF), yaşam döngüsü analizinin temel bir unsurudur. Beloev ve diğerleri (2017) [56] akaryakıt istasyonlarında fotovoltaik parkların kullanımının

CO₂'yu azaltabilirsenen senaryoya bağlı olarak emisyonları %37'ye kadar azaltabilir. Benzer şekilde, Faisal ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada gösterildiği gibi [57], fotovoltaik veya hibrit tesisler gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin EV şarj istasyonlarına güç sağlamak için kullanılması, karbon ayak izini %89,8 oranında azaltabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını şarj istasyonu altyapısına entegre etmek yalnızca çevresel etkiyi önemli ölçüde en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda işletme maliyetlerini de düşürerek bu çözümü uzun vadede ekonomik olarak daha uygulanabilir hale getirir. Bulgular, enerji altyapısıyla ilişkili emisyonları azaltmak için sürdürülebilir enerji teknolojilerine daha fazla yatırım yapılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Temiz enerji kaynaklarının payını artırmak ve şarj altyapısını iyileştirmek, ulaşım sektöründe ulaşım elektrifikasyonunu teşvik etmek ve karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmak için çok önemli olacak ve hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayacaktır.

Yazar Katkıları:Kavramsallaştırma, DB ve IP; metodoloji, DB; biçimsel analiz, DB; araştırma, IP; kaynaklar, DB ve IP; yazma - orijinal taslak hazırlama, DB ve IP; yazma, inceleme ve düzenleme, DB; görselleştirme, IP; denetim, DB Tüm yazarlar, makalenin yayınlanmış versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Finansman:Bu araştırma için herhangi bir dış finansman sağlanmamıştır.

Veri Kullanılabilirliği Beyanı:Tüm veriler makalede yer almaktadır.

Çıkar Çatışmaları:Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Referanslar

1. Avrupa Komisyonu. Avrupa Yeşil Mutabakatı. Avrupa Komisyonu. Çevrimiçi olarak mevcuttur:https://commission.europa.eu/strateji-ve-politika/öncelikler-2019-2024/avrupa-yesil-anlasmasi_tr(29 Ağustos 2024'te erişildi).
2. Scrucca, F.; Barberio, G.; Fantin, V.; Porta, PL; Barbanera, M. Karbon Ayak İzi: Kavram, Metodoloji ve Hesaplama. *Çevresel Ayak İzleri ve Ürün ve Proseslerin Eko-Tasarımı*, Springer: Berlin/Heidelberg, Almanya, 2020; s. 1–31. [ÇaprazRef]
3. Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlamasına İlişkin 537/2014 sayılı Tüzüğü, 2004/109/EC sayılı Direktifi, 2006/43/EC sayılı Direktifi ve 2013/34/EU sayılı Direktifi Değiştiren Direktifi (AB). 2022. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/TR/TXT/?uri=CELEX:32022L2464>(2 Eylül 2024'te erişildi).
4. Nenavani, J.; Prasuna, A.; Siva Kumar, SNV; Kasturi, A. ESG Ölçümleri ve Lojistik Şirketlerinin Finansal Performansı. *Lett. Spat. Kaynak. Bilim*.**2024**, *17*, 5. [ÇaprazRef]
5. Tsang, A.; Frost, T.; Cao, H. Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) Açıklaması: Bir Literatür İncelemesi.*Br. Hesap. Rev.* **2022**, *55*, 101149. [ÇaprazRef]
6. Pinheiro, AB; Panza, GB; Berhorst, NL; Toaldo, AMM; Segatto, AP ESG, Yenilik ve Ekonomik ve Finansal Performans Arasındaki İlişkinin Araştırılması: Enerji Sektöründen Kanıtlar. *Uluslararası Enerji Bölümü Yönetimi Dergisi*2023, *baskı öncesi*. [ÇaprazRef]
7. Khaw, TY; Azlan, A.; Teoh, AP ESG Performansını Etkileyen Faktörler: Bibliyometrik Analiz, Sistematik Literatür İncelemesi ve Gelecekteki Araştırma Yönleri.*J. Clean. Prod.***2024**, *448*, 141430. [ÇaprazRef]
8. Senadheera, SS; Withana, PA; Dissanayake, PD; Sarkar, B.; Chopra, SS; Rhee, JH; Ok, YS Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) Değerlendirmesinde Çevre Sütununun Puanlanması.*Sürdür. Çevre*.**2021**, *7*, 1960097. [ÇaprazRef]
9. Jursova, S.; Burchart-Korol, D.; Pustejovska, P. Çek Cumhuriyeti'nde Çeşitli Güç Kaynakları Göz Önünde Bulundurularak Elektrikli Araçların ve Pil Şarjlarının Karbon Ayak İzi ve Su Ayak İzi. *Ortamlar***2019**, *6*, 38. [ÇaprazRef]
10. Milojević, S.; Glišović, J.; Savić, S.; Bošković, G.; Bukvić, M.; Stojanović, B. Karayolu Trafikinde Kullanılan Taşıtlar İçin Tribolojik Olarak Optimize Edilmiş Dizel Motorlarında Değişken Sistemlerin Uygulanmasıyla Partikül Madde Emisyonu ve Hava Kirliliğinin Azaltılması. *ProQuest***2024**, *15*, 184. [ÇaprazRef]
11. Crippa, M.; Guizzardi, D.; Banja, F.; Schaaf, M.; Becker, E.; Ferrario, M.; Quadrelli, F.; Martin, R.; Grassi, J.; Rossi, G.; ve ark. *Tüm Dünya Ülkelerinin GHG Emisyonları JRC Politika İçin Bilim Raporu*; Avrupa Birliği Yayın Ofisi: Lüksemburg, 2023.
12. *EN 16258:2013*; Taşımacılık Hizmetlerinin (Yük ve Yolcu) Enerji Tüketimi ve GHG Emisyonlarının Hesaplanması ve Beyanı Metodolojisi. UNE, AsociaciOn İspanyolca NormalleştirmeOn: Madrid, İspanya, 2013.
13. Skruolabilmeki, T.; Kendra, M.; Stopka, O.; Milojević, S.; Figlus, T.; Csiszar, C. Orta Avrupa Ülkelerinde Elektrikli Mobilite Uygulamasının Sera Gazı Üretimine Etkisi. *Sürdürülebilirlik***2019**, *11*, 4948. [ÇaprazRef]
14. İngiliz Standartları Enstitüsü. *PAS 2050 Rehberi. Mal ve Hizmetlerin Karbon Ayak İzi Nasıl Değerlendirilir*; İngiliz Standartları Enstitüsü, BSI: Londra, İngiltere, 2008.
15. IPCC. *İklim Değişikliği 2023: Sentez Raporu. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin Altıncı Değerlendirme Raporuna Çalışma Grupları I, II ve III'ün Katkısı*; Çekirdek Yazma Ekibi, Lee, H., Romero, J., Editörler; İklim Değişikliği 2023 Sentez Raporu; IPCC: Cenevre, İsviçre, 2023; s. 35–115. [ÇaprazRef]
16. Filonchik, M.; Peterson, MP; Yan, H.; Gusev, A.; Zhang, L.; He, Y.; Yang, S. Dünyanın En Büyük Sera Gazı Yayıncıları için Sera Gazı Emisyonları ve Azaltma Stratejileri. *Bilim. Toplam Çevre*.**2024**, *944*, 173895. [ÇaprazRef]

17. *ISO 14040:2006*; Çevre Yönetimi - Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi - İlkeler ve Çerçeve. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2006.
18. *ISO 14044:2006*; Çevre Yönetimi-Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Gereksinimler ve Yönergeler. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2006.
19. Krause, J.; Yugo, M.; Samaras, Z.; Edwards, S.; Fontaras, G.; Dauphin, R.; Prenninger, P.; Neugebauer, S. AB'de 2050'de Karbon Nötr Karayolu Taşımacılığı için Kuyudan Tekerleğe Senaryolar. *J. Clean. Prod.* **2024**, *443*, 141084. [[ÇaprazRef](#)]
20. *ISO 14067:2018*; Sera Gazları - Ürünlerin Karbon Ayak İzi - Miktar Belirleme İçin Gereksinimler ve Kılavuzlar. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2018.
21. *ISO 14064-1:2018*; Sera Gazları—Bölüm 1: Sera Gazı Emisyonları ve Giderimlerinin Miktarının Belirlenmesi ve Raporlanması İçin Kuruluş Düzeyinde Rehberlik ve Spesifikasyon. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2018.
22. *PAS2050:2011*; Mal ve hizmetlerin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesine ilişkin şartname. İngiliz Standartları Enstitüsü: Londra, İngiltere, 2011.
23. Sinden, G. PAS 2050'nin Uluslararası Sera Gazı Emisyon Standartlarının Evrimine Katkısı. *Uluslararası J. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*. **2009**, *14*, 195–203. [[ÇaprazRef](#)]
24. *ISO 14064-2:2019*; Sera Gazları—Bölüm 2: Sera Gazı Emisyon Azaltma veya Giderme İyileştirmelerinin Miktarının Belirlenmesi, İzlenmesi ve Raporlanması İçin Proje Düzeyinde Rehberlik ile Spesifikasyon. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2018.
25. *ISO 14064-3:2019*; Sera Gazları—Bölüm 3: Sera Gazı Beyanlarının Doğrulanması ve Onaylanması İçin Kılavuzlu Spesifikasyon. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2018.
26. *ISO 14065:2020*; Çevresel Bilgileri Doğrulayan ve Onaylayan Kuruluşlar İçin Genel İlkeler ve Gereksinimler. Uluslararası Standardizasyon Örgütü: Cenevre, İsviçre, 2018.
27. Gao, L.; Winfield, ZC Gelişmiş Araçların Çevresel ve Ekonomik Etkilerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Enerjiler* **2012**, *5*, 605–620. [[ÇaprazRef](#)]
28. Lie, KW; Synnevåg, TA; Lamb, JJ; Lien, KM Elektrikli Şehir Otobüslerinin Karbon Ayak İzi: Norveç, Trondheim'da Bir Vaka Çalışması. *Enerjiler* **2021**, *14*, 770. [[ÇaprazRef](#)]
29. Hawkins, TR; Singh, B.; Majeau-Bettez, G.; Strømman, AH Geleneksel ve Elektrikli Araçların Karşılaştırmalı Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *J. Ind. Ekol.* **2012**, *17*, 53–64. [[ÇaprazRef](#)]
30. Cooney, G.; Hawkins, TR; Marriott, J. Dizel ve Elektrikli Toplu Taşıma Otobüslerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *J. Ind. Ekol.* **2013**, *17*, 689–699. [[ÇaprazRef](#)]
31. Girardi, P.; Gargiulo, A.; Brambilla, PC Uygun Güç Karışımı Kullanılarak Elektrikli Bir Araç ve İçten Yanmalı Motorlu Bir Aracın Karşılaştırmalı LCA'sı: İtalya Vaka Çalışması. *Uluslararası J. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*. **2015**, *20*, 1127–1142. [[ÇaprazRef](#)]
32. Onat, NC; Küçükvar, M.; Tatari, O. Geleneksel, Hibrit, Şarjlı Hibrit veya Elektrikli Araçlar? Amerika Birleşik Devletleri'nde Eyalet Bazlı Karşılaştırmalı Karbon ve Enerji Ayak İzi Analizi. *Uygulama Enerji* **2015**, *150*, 36–49. [[ÇaprazRef](#)]
33. Tagliaferri, C.; Evangelisti, S.; Acconcia, F.; Domenech, T.; Ekins, P.; Barletta, D.; Lettieri, P. Gelecekteki Elektrikli ve Hibrit Araçların Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi: Beşikten Mezara Sistem Mühendisliği Yaklaşımı. *Kimya Müh. Arş. Tas.* **2016**, *112*, 298–309. [[ÇaprazRef](#)]
34. Zhao, Y.; Onat, NC; Kucukvar, M.; Tatari, O. Elektrikli Teslimat Kamyonlarının Karbon ve Enerji Ayak İzleri: Hibrit Çok Bölgeli Giriş-Çıkış Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Transp. Res. Kısım D Transp. Çevre*. **2016**, *47*, 195–207. [[ÇaprazRef](#)]
35. Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; Jiang, S.; Hao, H. Yaşam Döngüsü CO Üzerine Karşılaştırmalı Çalışmaz Çin'de Elektrikli ve Konvansiyonel Araçların Üretiminden Kaynaklanan Emisyonlar. *Enerji Prosedürü* **2017**, *105*, 3584–3595. [[ÇaprazRef](#)]
36. Van Mierlo, J.; Messagie, M.; Rangaraju, S. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Kullanılarak Alternatif Yakıtlı Araçların Karşılaştırmalı Çevresel Değerlendirmesi. *Transp. Res. Procedia* **2017**, *25*, 3435–3445. [[ÇaprazRef](#)]
37. Harris, A.; Soban, D.; Smyth, BM; Best, R. Alternatif Otobüs Teknolojilerinin Yaşam Döngüsü Etkilerinin ve Risk ve Belirsizliğinin Değerlendirilmesi. *Yenile. Sürdür. Enerji Rev.* **2018**, *97*, 569–579. [[ÇaprazRef](#)]
38. Rosenfeld, DC; Lindorfer, J.; Fazeni-Fraisl, K. Gelişmiş Yakıtların Karşılaştırılması - Yaşam Döngüsü Perspektifinden Hangi Teknoloji Kazanabilir? *J. Clean. Prod.* **2019**, *238*, 117879. [[ÇaprazRef](#)]
39. Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; He, X.; Hao, H. Çin'deki Elektrikli Araçların Yaşam Döngüsü Sera Gazı Emisyonları: Araç Döngüsü ve Yakıt Döngüsünün Birleştirilmesi. *Enerji* **2019**, *177*, 222–233. [[ÇaprazRef](#)]
40. Bekel, K.; Pauliuk, S. Almanya'da Pil ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araçların Beklenen Maliyet ve Çevresel Etki Değerlendirmesi. *Uluslararası J. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*. **2019**, *24*, 2220–2237. [[ÇaprazRef](#)]
41. Chang, C.-C.; Liao, Y.-T.; Chang, Y.-W. Tayvan'daki Toplu Taşıma Otobüsleri İçin Hidrojen Dahil Alternatif Enerji Türlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi* **2019**, *44*, 18472–18482. [[ÇaprazRef](#)]
42. Petrauskienė, K.; Skvarnavičiūtė, M.; Dvarionienė, J. Litvanya'daki Elektrikli ve Geleneksel Araçların Karşılaştırmalı Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *J. Clean. Prod.* **2019**, *246*, 119042. [[ÇaprazRef](#)]
43. Wong, EYC; Ho, DCK; So, S.; Tsang, C.-W.; Hin Chan, EM GREET Modeline Dayalı Hidrojen Yakıt Hücreli ve Bataryalı Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzi Üzerine Karşılaştırmalı Analiz. 2020 Karar Yardımı Bilimleri ve Uygulamaları Uluslararası Konferansı (DASA) Bildirilerinde, Sakheer, Bahreyn, 8-9 Kasım 2020. [[ÇaprazRef](#)]
44. Candelaresi, D.; Valente, A.; Iribarren, D.; Dufour, J.; Spazzafumo, G. Hidrojen Yakıtlı Binek Otomobillerinin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi* **2021**, *46*, 35961–35973. [[ÇaprazRef](#)]

45. Pipitone, E.; Caltabellotta, S.; Occhipinti, L. Avrupa Bağlamında Geleneksel, Hibrit ve Elektrikli Araçlar Arasındaki Yaşam Döngüsü Çevresel Etki Karşılaştırması. *Sürdürülebilirlik* **2021**, *13*, 10992. [[ÇaprazRef](#)]
46. Yang, L.; Yu, B.; Yang, B.; Chen, H.; Malima, G.; Wei, Y.-M. Çin'deki Elektrikli ve İçten Yanmalı Motorlu Araçların Yaşam Döngüsü Çevresel Değerlendirmesi. *J. Clean. Prod.* **2021**, *285*, 124899. [[ÇaprazRef](#)]
47. GarcBena, A.; Monsalve-Serrano, J.; Lago Sari, R.; Tripathi, S. Yaşam Döngüsü CO₂Otobüs Taşımacılığı Ağlarında Hibrit ve Elektrikli Otobüslerin Ayak İzi Azaltma Karşılaştırması. *Uygulama Enerji* **2022**, *308*, 118354. [[ÇaprazRef](#)]
48. Ager-Wick Ellingsen, L.; Jayne Thorne, R.; Wind, J.; Figenbaum, E.; Romare, M.; Nordelöf, A. Pil Elektrikli Otobüslerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Transp. Res. Kısım D Transp. Çevre* **2022**, *112*, 103498. [[ÇaprazRef](#)]
49. Farzaneh, F.; Jung, S. İçten Yanmalı Motor ile Elektrikli Transit Araç Arasındaki Yaşam Döngüsü Karbon Ayak İzi Karşılaştırması: ABD'de Bir Vaka Çalışması. *J. Clean. Prod.* **2023**, *390*, 136111. [[ÇaprazRef](#)]
50. Li, P.; Xia, X.; Guo, J. Elektrikli Araç Akülerinin Yaşam Döngüsü Karbon Ayak İzinin İncelenmesi. *Eylül Purif. Technol.* **2022**, *296*, 121389. [[ÇaprazRef](#)]
51. Shah, K.; Kaka, F. Pil Alternatifleri ve Entegre Fotovoltaiklerin Kullanımıyla Elektrikli Araçların Karbon Ayak İzinin Azaltılması. *Mater. Bugün Tutanaklar* **2022**, *57*, 106–111. [[ÇaprazRef](#)]
52. Burchart-Korol, D.; Jursova, S.; Folęga, P.; Korol, J.; Pustejovska, P.; Blaut, A. Polonya ve Çek Cumhuriyeti'nde Elektrikli Araçların Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *J. Clean. Prod.* **2018**, *202*, 476–487. [[ÇaprazRef](#)]
53. Sandrini, G.; Gadola, M.; Chindamo, D.; Candela, A.; Magri, P. Enerji Tüketimi Açısından Araç Hafifletmenin Etkisinin Araştırılması: Analiz ve Simülasyon. *Enerjiler* **2023**, *16*, 5157. [[ÇaprazRef](#)]
54. Candela, A.; Sandrini, G.; Gadola, M.; Chindamo, D.; Magri, P. Enerji Verimliliğinin Bir Ölçütü Olarak Otomotiv Endüstrisinde Hafifletme: Ana Malzemeler ve Yöntemlerin İncelenmesi. *Heliyon* **2024**, *10*, e29728. [[ÇaprazRef](#)]
55. Sandrini, G.; Gadola, M.; Chindamo, D.; Magri, P. Tekerlek Kilitlenmesini Önleyerek Araç Dengesini Korumayı Amaçlayan Verimli Rejeneratif Frenleme Stratejisi. *Transp. Res. Procedia* **2023**, *70*, 28–35. [[ÇaprazRef](#)]
56. Beloev, I.; Gabrovska-Evstatieva, K.; Evstatiev, B. CO Tazminatı Fotovoltaik Parklı Benzin İstasyonlarından Kaynaklanan Emisyonlar: Maliyet-Fayda ve Risk Analizi. *Acta Teknoloji Tarım* **2017**, *20*, 85–90. [[ÇaprazRef](#)]
57. Faisal, S.; Soni, BP; Goyal, GR; Bakhsh, FI; Husain, D.; Ahmad, A. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Güç Sistemi Kullanarak Elektrikli Araç Şarj İstasyonunun Ekolojik Ayak İzinin ve Şarj Maliyetinin Azaltılması. *e-Prime* **2024**, *7*, 100398. [[ÇaprazRef](#)]

Yasal Uyarı/Yayıncının Notu:Tüm yayınlarda yer alan ifadeler, görüşler ve veriler yalnızca bireysel yazar(lar) ve katkıda bulunan(lar)a aittir ve MDPI ve/veya editör(ler)e ait değildir. MDPI ve/veya editör(ler), içerikte atıfta bulunulan herhangi bir fikir, yöntem, talimat veya üründen kaynaklanan herhangi bir kişi veya mal yaralanmasından sorumlu değildir.