




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Türkiye’de Üretilen Elektrikli ve İçten Yanmalı Motorlu Araçların Karşılaştırmalı Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

 Fehmi Görkem ÜÇTUĞ^{a,*}

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gorkem.uctug@ieu.edu.tr

doi: 10.29130/dubited.1001818

ÖZ

Bu çalışmada Türkiye’de üretilen elektrikli ve benzinle çalışan içten yanmalı motorlu binek otomobillerin çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle kıyaslanmıştır. Fonksiyonel birimin aracın kat ettiği 1 kilometrelik mesafe olarak tanımlandığı çalışmada CCaLC yazılımı ve CML2001 yöntemi kullanılmıştır. Karbon ayak izi açısından elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre daha çevre dostu olduğunu görülmekle beraber, diğer çevresel etkiler de göz önüne alındığında iki teknoloji arasında ciddi bir fark görülmemiştir. Eşit ağırlıklandırma yoluyla hesaplanan toplam çevresel etki skoruna bakıldığında elektrikli araçların, içten yanmalı motorlu araçlara göre %4 daha yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çevresel etkilerin iki temel sebebi olarak otomobil lastikleri ve araçların hareketi için gereken enerji ihtiyacı tespit edilmiştir. 2030 yılında Türkiye’de ön görülen elektrik araç yaygınlaşma hedeflerinin tutturulması halinde ulusal karbon ayak izinin %1,6 oranında düşmesi beklenmektedir. Elektrikli araçların karbon ayak izi dışındaki diğer çevresel etkilerinin azaltılabilmesi için Türkiye’deki şebeke elektriği üretiminde yenilenebilir kaynakların payının artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel etki değerlendirme, elektrikli araç, içten yanmalı motorlu araç, karbon ayak izi, yaşam döngüsü değerlendirme

Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles Manufactured in Turkey

ABSTRACT

In this study the environmental impacts of electric vehicles and internal combustion engine vehicles manufactured in Turkey were compared by using life cycle assessment methodology. The functional unit was chosen as 1 kilometre of distance covered by the vehicle. CCaLC software alongside CML 2001 method was used. The results show that while electric vehicles are the more environmentally friendly option as far as carbon footprint is concerned, there is no major difference between the technologies when other environmental impacts are also taken into account.. The overall impact scores calculated by assigning equal weights to the impacts revealed that electric vehicles have 4% higher environmental impact than internal combustion engine vehicles. The main cause of environmental impacts turned out to be automobile tires and the energy required for vehicle movement. If the targets for the proliferation of electric vehicles in Turkey are reached by 2030, the nation-wide carbon footprint of the country is expected to decrease by 1.6%. It was determined that the share of renewables in Turkish grid electricity production shall be increased if the environmental impacts of electric vehicle utilization is to be reduced.

Keywords: Environmental impact assessment, electric vehicle, internal combustion engine vehicle, carbon footprint, life cycle assessment

I. GİRİŞ

Atmosferdeki CO₂ gazı derişimi son 150 yılda yaklaşık olarak %40 civarında artış göstermiştir [1]. Bu artışın temel sebebi endüstriyel faaliyetler için gereken enerjinin temini için fosil yakıt kullanımındır. CO₂ bir sera gazı olup, ortalama atmosferik sıcaklıkların yükselmesine ve buna bağlı iklim değişikliğine sebebiyet vermekte; iklim değişikliğinin de tarımsal üretim, gıda temini, yerleşim, turizm gibi pek çok sektöre çeşitli olumsuz etkileri olacağı ön görülmektedir [2]. Ulaşım sektörünün toplam küresel karbon salımının yaklaşık %23'ünden sorumlu olduğu tespit edilmiş iken [3] Türkiye için bu değer %19 olarak raporlanmıştır [4]. Ulaşım kaynaklı karbon salımlarının yaklaşık %73'ü kara ulaşımından gelmektedir [5]. Dolayısıyla son yıllarda kara ulaşımı için çevresel etkisi daha düşük olduğu iddia edilen elektrikli, hibrit veya hidrojenli araçlara olan ilgide artış gözlenmektedir [6]. Ancak kara ulaşımı için farklı araç teknolojileri çevresel açıdan kıyaslanırken, aracın çalışması esnasında atmosfere salınan “doğrudan CO₂” yerine, araçların üretimi, nakliyesi, kullanımı ve bertarafı esnasında oluşan çevresel etkilerin yaşam döngüsü bakış açısıyla bütünlük olarak ele alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Literatürde bu konuda yapılan çalışmalara baktığımızda birçok ülkede farklı araç teknolojilerinin çevresel etkileri açısından karşılaştırmasına yönelik çalışmalar yürütüldüğü göze çarpmaktadır [7]. Brezilya'da yapılan bir araştırmada farklı yakıtlarla (benzin, etanol, benzin-etanol karışımı) çalışan içten yanmalı motorlu araçların (İYMA), hibrit motorlu araçların ve elektrikli araçların (EA) çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle kıyaslanmıştır [8]. Çalışmada ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Asitleşme, ötrofikasyon ve fotokimyasal oksidasyon kategorilerinde en yüksek etki değerleri etanol ile çalışan içten yanmalı motora ait olurken, abiyotik ve fosil kaynak tüketimi ile küresel ısınma potansiyeli kategorilerinde en yüksek etki değerleri benzinle çalışan içten yanmalı motorlarda gözlenmiştir. İnsan toksisite potansiyeli kategorisinde ise elektrikli araçlar en yüksek değere sahip olmuştur. Çeşitli etkilere eşit ağırlıklara verilerek hesaplanan toplam çevresel etki değerleri kıyaslandığında, elektrikli araçların çevresel etkisinin diğer seçeneklere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Litvanya'daki bir çalışmada ise dizel ve benzinle çalışan araçlar ile elektrikli araçların yaşam döngüsü temelli çevresel etki kıyaslanması gerçekleştirilmiştir [9]. Beşikten mezara (cradle-to-grave) yaklaşımının benimsendiği çalışmada elektrikli araçların sera gazı salım değerleri, benzinle ve dizelle çalışan içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla sırasıyla %26 ve %47 oranında daha düşük çıkmıştır. Ayrıca söz konusu çalışmada, çevresel etkilerin araçların üretiminin ve kullanımının gerçekleştiği ülkedeki şebeke elektriğinin çevresel etkilerinden ciddi şekilde etkilendiği de ifade edilmiştir. Polonya ve Çekya'dan araştırmacıların ortaklığında gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, yine elektrikli araçlar ile içten yanmalı motorlu araçların çevresel etkileri yaşam döngüsü yaklaşımıyla karşılaştırılmıştır [10]. Çalışmada, sera gazı salımı ve fosil yakıt tüketimi kategorilerinde elektrik araçların daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu tespit edilirken, asitleşme, ötrofikasyon, insan toksisitesi ve parçacık madde oluşumu kategorilerinde ise elektrikli araçların daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Farklı ülkelerden araştırmacıların işbirliğiyle gerçekleştirilen ve Kanada'yı ele alan bir araştırmada ise benzinle, dizelle, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ile, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ile, hidrojen ve amonyak ile çalışan içten yanmalı motorlu araçlar ile, hibrit ve %100 elektrikli araçların çevresel etkileri yaşam döngüsü yöntemiyle kıyaslanmıştır [11]. Sonuçlar incelediğinde elektrikli ve hibrit araçların özellikle insan toksisitesi, asitleşme ve ekotoksisite kategorilerinde diğer seçenekle kıyasla yüksek çevresel etkilere sahip olduğu görülmüştür. Toplam çevresel etkiler kıyaslandığında en düşük etki skoru hidrojenli araçlara ait olarak tespit edilmiştir. İtalya'yı ele alan bir araştırmada benzinle çalışan içten yanmalı motorlu araçlarla elektrikli araçların yaşam boyu çevresel etkileri kıyaslanmış [12], ve önceki araştırmalara benzer bir şekilde karbon salımı açısından elektrikli araçlar daha çevre dostu teknoloji olarak ön plana çıkarken, asitleşme, insan toksisitesi, parçacık madde oluşumu, fotokimyasal ozon oluşumu gibi etkilerde benzinli araçlar daha düşük değerlere sahip olmuştur. Çin'de yapılan bir çalışmada içten motorlu taşıtlar ile hibrit ve elektrikli araçların çevresel etkileri yaşam döngüsü yöntemiyle kıyaslanmıştır [13]. Özellikle parçacık madde ve SO₂ salımlarının hibrit ve elektrikli araçlar için oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmaya ait ilginç başka bir bulgu ise, gelecekte Çin'deki şebeke elektriğindeki yenilenebilir kaynakların payı artsa bile, elektrikli araçların belli yönlerden hâlâ içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha fazla çevresel etkiye sahip olacağına ilişkin ortaya konmasıdır. Son olarak, İspanya'da yapılan bir çalışmada da

içten motorlu taşıtlar ile hibrit ve elektrikli araçların çevresel etkileri yaşam döngüsü yöntemiyle kıyaslanmıştır [14]. Diğer pek çok çalışmanın aksine beşikten mezara yaklaşımının benimsendiği araştırmada, önceki çalışmalara benzer biçimde karbon ayak izi açısından elektrikli araçlar daha çevre dostu olarak ön plana çıkarken, diğer çevresel etkilerin çoğunda elektrikli araçların daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

Literatürde bu konu ile ilgili Türkiye özelinde yapılan çalışmalar ele alındığında Türkiye koşullarında üretilen farklı teknolojiye sahip araçların çevresel etkilerinin yaşam döngüsü yöntemiyle kıyaslandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. “Türkiye, elektrikli araç, hibrit araç, yaşam döngüsü değerlendirmesi, karbon ayak izi, çevresel etki” gibi anahtar kelimelerin Türkçe ve İngilizce olarak çeşitli bilimsel veri tabanlarında aratılması sonucunda bu alanda yapılmış bir çalışma tespit edilmemiştir. Benzer içeriğe sahip ve Türkiye’yi ele alan çalışmalar incelendiğinde, Türkiye’de ve dünyada ulaşım sektörü kaynaklı karbon ayak izi değerlerinin listelendiği bir derleme çalışması [15]; Türkiye’de 2050 yılı itibariyle ulaşım sektöründen kaynaklanacak karbon salımlarının modellendiği ancak araç üretim envanterini ele alan bir yaşam döngüsü yaklaşımı yerine salım faktörlerinin kullanıldığı bir çalışma [16]; Türkiye’deki bütün binek araçların elektrikli olması durumunda karbon salımlarında sağlanacak azalmanın, yine salım faktörleri kullanılarak hesaplandığı bir çalışma [17]; ve son olarak Türkiye’de elektrikli araçların farklı piyasa hakimiyet senaryoları için ülke çapındaki karbon ayak izi değişimini, yine salım faktörleri esas alınarak hesaplandığı bir çalışma [18] tespit edilmiştir. Bu çalışmaların tümü son derece kıymetli ve literatüre katkı veren önemli eserler olmakla birlikte, salım faktörleri dolaylı değil doğrudan salımları ele aldığı ve Türkiye koşullarını yansıtmadığı için maalesef raporlanan değerlerin temsil kabiliyeti sınırlıdır.

Bu çalışmada Türkiye koşullarında üretilen içten yanmalı motorlu ve elektrikli binek araçların çevresel yaşam döngüsü incelemesi gerçekleştirilmiş ve çeşitli çevresel etkileri kıyaslanmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarında yöntemsel olarak bir özgünlük söz konusu değildir, çünkü yöntem belli standartlara dayanmaktadır. Dolayısıyla bu alandaki bilimsel çalışmaların özgünlüğü incelenen ürün, proses veya hizmet; ya da bu ürün, proses veya hizmetin gerçekleştiği konum açısından irdelenmektedir. Yukarıda açıklanan gerekçelerden ötürü bu çalışmanın Türkiye koşullarında üretilecek elektrikli araçların çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesini ele alan ilk çalışma olması itibariyle kendi alanında öncü olma özelliğini taşıdığı ve dolayısıyla özgün olduğu sonucuna varılmıştır.

II. YÖNTEM

Bu kısımda yaşam döngüsü değerlendirmesi yönteminin amacı, kapsamı, hangi etkilerin incelendiği, yapılan varsayımlar, içten yanmalı motorlu ve elektrikli araçların yaşam döngüsü envanteri, kullanılan veri kaynakları ve çalışmanın yürütüldüğü yazılım ile ilgili bilgiler mevcuttur.

A. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmanın amacı Türkiye koşullarında üretilen benzinle çalışan içten yanmalı motorlu binek araç ile aynı klasmandaki elektrikli aracın çevresel etkilerini, yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle kıyaslamaktır. Çalışmada aşağıdaki aşamalar göz önüne alınmış ve “beşikten mezara” yaklaşımı benimsenmiştir:

- a) Ham madde tedarigi
- b) Üretim ve montaj
- c) Nakliye
- d) Kullanım
- e) Bertaraf

Elektrikli araçların şarj edilmesi için gereken ulusal altyapının oluşturulması sistem sınırları içerisine dahil edilmemiştir. Çalışmanın sınırları Şekil 1’de özetlenmektedir.

B. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİ

Yaşam döngüsü değerlendirmesi bir ürün, proses ya da hizmet için kullanılan enerji, ham madde ve bundan dolayı oluşan atık ve emisyonların çevresel etkilerini hesaplamakta kullanılan ve ISO 14040 ile ISO 14044 standartlarına göre yürütülen bir yöntemdir [19, 20]. Bu çalışmada, CCaLC isimli ve Manchester Üniversitesi'nde geliştirilen bir yazılım [21], CML2001 yöntemiyle [22] kullanılmış, arka plandaki veriler Ecoinvent2 veri tabanından elde edilmiştir. Fonksiyonel birim, araçların ömürleri boyunca sebep oldukları çevresel etki, kat ettikleri 1 kilometre (km) mesafe cinsinden ifade edilecek şekilde seçilmiştir. Bir başka deyişle, araçların üretimi için gereken ham maddeden başlayıp kullanımları sonunda bertaraflarına kadar olan bütün süreçlerdeki çevresel etki değerleri hesaplandıktan sonra, araçların ömürleri boyunca kat ettikleri toplam kilometre değerine bölünmüş ve km başına etki değerleri raporlanmıştır. Aşağıdaki çevresel etkiler göz önüne alınmıştır:

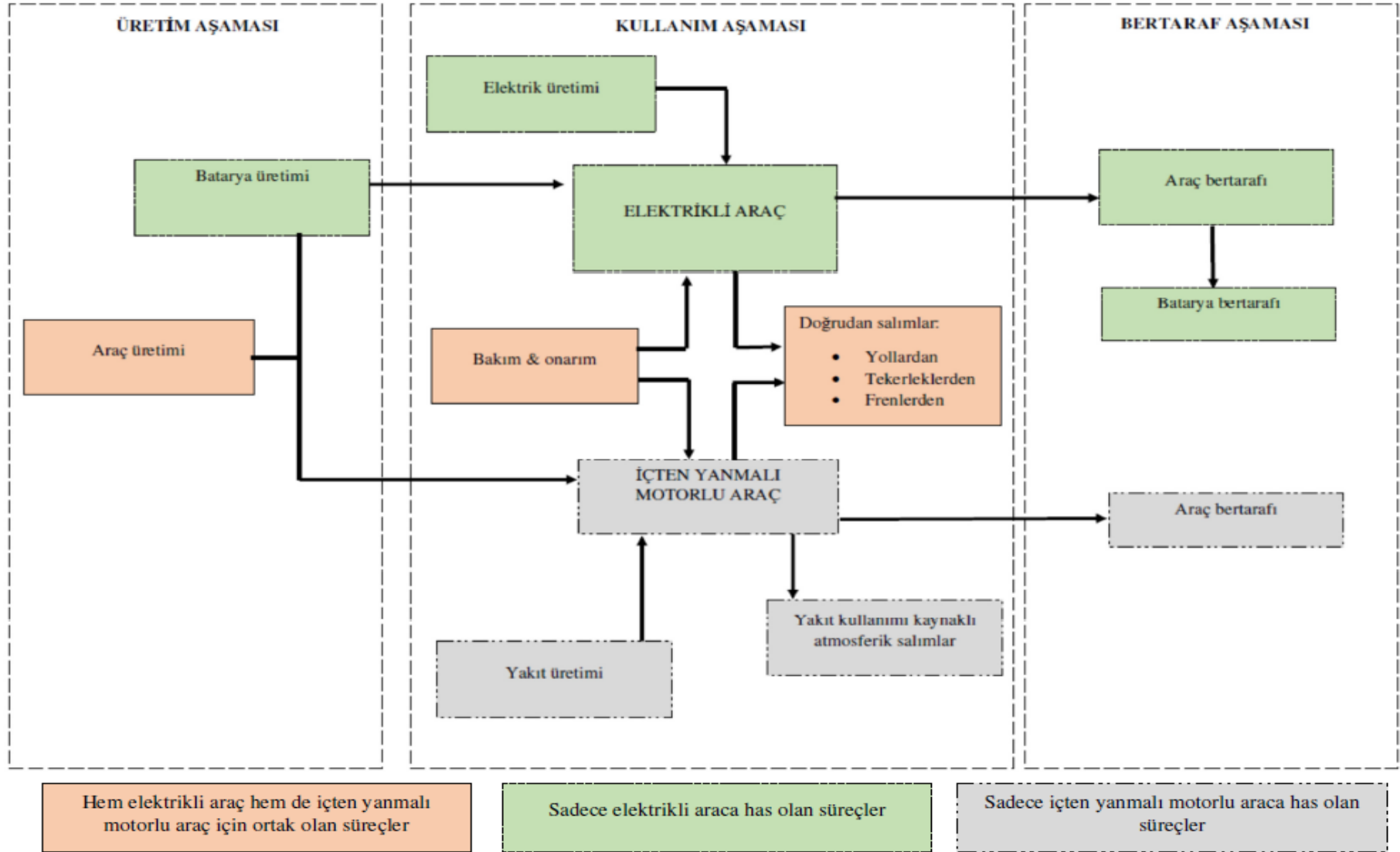
- i) Karbon ayak izi (carbon footprint – CF)
- ii) Asitleşme potansiyeli (acidification potential – AP)
- iii) Ötrofikasyon potansiyeli (eutrophication potential – EP)
- iv) Ozon tabakası incelme potansiyeli (ozone layer depletion potential - OLDP)
- v) Fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (photochemical ozone creation potential – POCP)
- vi) İnsan toksisite potansiyeli (human toxicity potential – HTP)

Yukarıda listelenen çevresel etkiler ile ilgili daha ayrıntılı bilgi başka bir kaynaktan elde edilebilir [23].

C. YAŞAM DÖNGÜSÜ ENVANTERİ

Daha önce de bahsedildiği gibi, yaşam döngüsü envanteri oluşturulurken ham madde üretimi, araç üretimi ve montajı, ara ürün ve son ürün nakliyesi, kullanım ve bertaraf aşamaları göz önüne alınmış, bir başka deyişle “beşikten mezara” yaklaşımı benimsenmiştir. Yaşam döngüsü envanteri kurulurken ve yaşam döngüsü modeli oluşturulurken yapılan varsayımlar şu şekildedir:

- Sedan tipi binek arabası tercih edilmiştir (tahmini araç boyutları: 4,5m × 1,8m × 1,5m; tahmini araç ağırlığı 1,5 ton)
- Benzinle çalışan içten yanmalı motorlu aracın ömrü 20 yıl ve 400.000 km; elektrikli aracın ömrü ise 15 yıl ve 300.000 km olarak kabul edilmiştir [24]. Bu varsayımlardan da anlaşılacağı gibi, her iki aracın da yıllık kullanımı 20.000 km olarak kabul edilmiştir.
- Otomobil lastiklerinin ömrü yaklaşık 65.000 km olarak kabul edilmiştir. Bu varsayıma göre toplam araç ömürleri boyunca içten yanmalı motorlu araçta 6, elektrikli araçta ise 5 set lastik kullanılacağı ön görülmüştür.
- İçten yanmalı motorlu aracın ortalama yakıt tüketimi 5,6 L/100 km; elektrikli aracın ortalama enerji tüketimi ise 10 kWh/100 km olarak kabul edilmiştir [13]. • Her iki araca ait bütün parçaların, elektrikli araç bataryası hariç, Türkiye’de imal edildiği varsayılmaktadır. Elektrikli araç bataryasının ise Çin’den ithal edildiği kabul edilmiştir.
- Bertaraf aşamasında kullanılan geri dönüşüm oranı, Türkiye’nin ortalama geri dönüşüm oranı olan %7 olarak kabul edilmiştir [25].
- Fabrikada üretimleri tamamlanan otomobillerin satış noktasına nakliyesi için kat edilecek mesafe 200 km olarak varsayılmıştır. Bu değer tamamen rastgele belirlenmiş olup, ulaşım aşamasının çevresel etkilere etki edip etmediğini tespit etmek amacıyla seçilmiştir.
- Yaşam döngüsü envanterinde, Ecoinvent 2 veri tabanında yer almayan iki adet girdi tespit edilmiştir. Bu girdiler kurşun asitli batarya ve otomobil tekerleği olup, bu iki girdi için çevresel etki değerleri literatürden bulunup CCaLC veri tabanına girilmiştir [26, 27].



Şekil 1. Sistem sınırları ve yaşam döngüsü aşamaları

- Envanter kapsamındaki elektrik enerjisi tüketim değerleri yaşam döngüsü modeline girilirken jenerik veri kullanmak yerine Türkiye’de kullanılan şebeke elektriğinin yaşam döngüsü değerlendirmesi yoluyla hesaplanmış çevresel etkilerinin raporlandığı bir makaleden [28] faydalanılmış ve bu makaleden elde edilen değerler, CCaLC veri tabanına girilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların Türkiye koşullarını temsil etme kabiliyeti artırılmıştır.

Elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu araçlara ait yaşam döngüsü envanterleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmaktadır. Bu tablolarda sistem girdileri normal punto ile, çıktılar ise italik punto ile belirtilmiştir.

Tablo 1. Elektrikli araç yaşam döngüsü envanteri

Girdi (çıktı)	Birim	Miktar	Ecoinvent proses	Kaynak
ARAÇ ÜRETİMİ				
Alüminyum	kg	74,4	Aluminium (rolled, virgin)	[13]
Alüminyum (geri dönüştürülmüş)	kg	5,6	Aluminium (rolled, 48% recycled)	[13]
Araç tekerleği	adet	20	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[27]
Lityum iyon batarya	adet	1	Battery, LiIo, rechargeable, prismatic, at plant	[13]
Demir	kg	25	Cast iron, at plant	[13]
Çelik	kg	857	Chromium steel 18/8, at plant	[13]
Bakır	kg	59	Copper sheet	[13]
Cam	kg	44	Flat glass, coated, at plant	[13]
Kurşun asitli batarya	adet	1	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[26]
Motor yağı	kg	26	Lubricating oil, at plant	[13]
Polipropilen	kg	120	Polypropylene fibers	[13]
Polivinilklorür	kg	30	PVC calendered sheet	[13]
Kauçuk	kg	22	Synthetic rubber, at plant	[13]
Elektrik enerjisi	MJ	4089	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[28]
Isı enerjisi (kömür)	MJ	3705	Heat, at hard coal industrial furnace 1-10 MW	[13]
Isı enerjisi (doğal gaz)	MJ	5688	Heat, natural gas, at industrial furnace, > 100 kW	[13]
NAKLIYE				
Lityum iyon batarya ithalati (Çin’in Şangay limanından Gebze’ye)	km	17.000	Transport, transoceanic tanker	-
Fabrika çıkışı otomobilin satış noktasına nakliyesi	km	200	Transport, lorry, > 28 ft, fleet average	-
KULLANIM				
Elektrik enerjisi	GJ	108	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[28]
BERTARAF				
<i>Alüminyum bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>74,4</i>	<i>Disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill</i>	[13]
<i>Çelik geri dönüşümü</i>	<i>kg</i>	<i>58</i>	<i>Disposal, building, reinforcement steel, to recycling</i>	[13]
<i>Kauçuk bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>202^(*)</i>	<i>Disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration</i>	[13]
<i>Metal bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>847</i>	<i>Landfill – ferro metals</i>	[13]
<i>Cam bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>44</i>	<i>Landfill – glass/inert matter</i>	[13]
<i>Plastik bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>140</i>	<i>Landfill - plastic</i>	[13]
<i>Plastik geri dönüşüm</i>	<i>kg</i>	<i>11</i>	<i>Recycling, PE</i>	[13]
<i>Batarya bertaraf</i>	<i>kg</i>	<i>300^(**)</i>	<i>Shredding, electrical and electronic scrap</i>	[13]

(*) Bertaraf edilen kauçuk miktarına otomobil lastikleri de dahil edildiği için sisteme giren ve sistemden çıkan kauçuk miktarları aynı olmuştur.

(**) Bataryalar sisteme adet olarak girilmiş ancak daha sonra kütle karşılıkları bulunarak [13, 26] bertarafı bu değerler üzerinden modellenmiştir.

Tablo 2. İçten yanmalı motorlu araç yaşam döngüsü envanteri

Girdi (çıktı)	Birim	Miktar	Ecoinvent proses	Kaynak
ARAÇ ÜRETİMİ				
Alüminyum	kg	81	Aluminium (rolled, virgin)	[13]
Alüminyum (geri dönüştürülmüş)	kg	6	Aluminium (rolled, 48% recycled)	[13]
Araç tekerleği	adet	24	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[27]
Demir	kg	139	Cast iron, at plant	[13]
Çelik	kg	793	Chromium steel 18/8, at plant	[13]
Bakır	kg	24	Copper sheet	[13]
Cam	kg	37	Flat glass, coated, at plant	[13]
Kurşun asitli batarya	adet	1	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[26]
Motor yağı	kg	26	Lubricating oil, at plant	[13]
Polipropilen	kg	112	Polypropylene fibers	[13]
Polivinilklorür	kg	29	PVC calendered sheet	[13]
Kauçuk	kg	29	Synthetic rubber, at plant	[13]
Elektrik enerjisi	MJ	4180	(kullanıcı tarafından yaratılan proses)	[28]
Isı enerjisi (kömür)	MJ	3788	Heat, at hard coal industrial furnace 1-10 MW	[13]
Isı enerjisi (doğal gaz)	MJ	5816	Heat, natural gas, at industrial furnace, > 100 kW	[13]
NAKLİYE				
Fabrika çıkışı otomobilin satış noktasına nakliyesi	km	200	Transport, lorry, > 28 ft, fleet average	-
KULLANIM				
Benzin	kg	16.600	Gasoline	[13]
Atmosfere uçucu organik bileşik salımı	kg	69,7	Benzene emissions to air	[13]
Atmosfere karbondioksit salımı	kg	49.700	CO ₂ emissions to air	[13]
Atmosfere azot oksit salımı	kg	15,9	Nitrogen oxides (as NO ₂) emissions to air	[13]
Atmosfere sülfürdioksit salımı	kg	19,8	Sulphur dioxide emissions to air	[13]
BERTARAF				
Alüminyum bertaraf	kg	81	Disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill	[13]
Çelik geri dönüşümü	kg	55,5	Disposal, building, reinforcement steel, to recycling	[13]
Kauçuk bertaraf	kg	245 ^(*)	Disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration	[13]
Metal bertaraf	kg	900	Landfill – ferro metals	[13]
Cam bertaraf	kg	37	Landfill – glass/inert matter	[13]
Plastik bertaraf	kg	131	Landfill - plastic	[13]
Plastik geri dönüşüm	kg	10	Recycling, PE	[13]
Batarya bertaraf	kg	15 ^(**)	Shredding, electrical and electronic scrap	[13]

(*) Bertaraf edilen kauçuk miktarına otomobil lastikleri de dahil edildiği için sisteme giren ve sistemden çıkan kauçuk miktarları aynı olmamıştır.

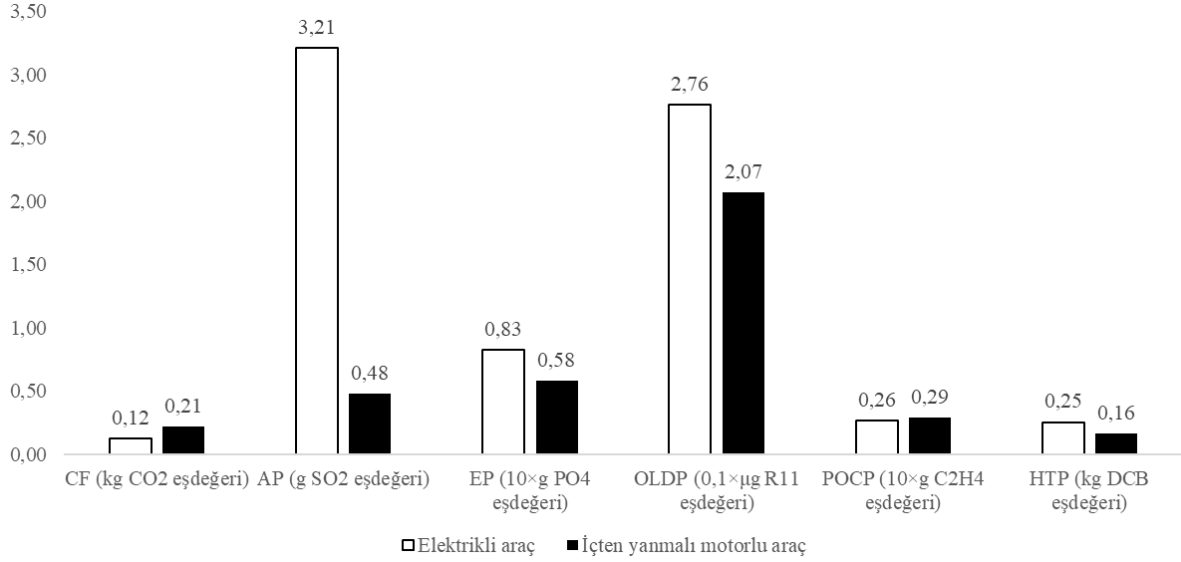
(**) Batarya sisteme adet olarak girilmiş ancak daha sonra kütle karşılığı bulunarak [26] bertaraf bu değer üzerinden modellenmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu kısımda ilk olarak elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu araçların çevresel etkileri teker teker incelenecektir. Ardından iki teknolojinin toplam çevresel etkileri kıyaslanacaktır. Akabinde elektrikli araçların Türkiye genelinde yaygınlaşmasının Türkiye'nin ulusal karbon ayak izini nasıl etkileyeceği tartışılacaktır. Son olarak, literatürde yayınlar ile bu yayının sonuçları kıyaslanarak validasyon sağlanacaktır.

A. ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLERİ

Şekil 2’de görülebileceği gibi, Türkiye’de üretilen elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu aracın çevresel etkileri, yurtdışındaki çalışmalarda elde edilen sonuçlara büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Karbon ayak izi açısından elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük etkiye sahip olmakla birlikte, diğer beş etki değerinin dördünde elektrikli araçların daha yüksek skorlara sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Türkiye’de üretilen elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu araçların yaşam boyu çevresel etkileri

Elektrikli araç ile ilgili yaşam döngüsü aşamalarını incelediğimizde ortalama olarak en yüksek payın %52,7 ile ham madde tedariki ve %43,9 ile kullanım ve bertaraf aşamalarına ait olduğunu görüyoruz. Üretim aşamasının ortalama payı %3,2’de kalırken nakliye aşamasının payı yalnızca %0,2 olarak tespit edilmiştir. Elektrikli araçların çevresel etkilerinin temel sebepleri incelendiğinde ise ilk iki sırayı aracın kullanımı esnasında tükettiği elektrik ve otomobil lastiklerinin aldığını görmekteyiz. Öyle ki toplam karbon ayak izinin %82’si, toplam asitleşme potansiyelinin %94’ü, toplam ötrofikasyon potansiyelinin %63’ü, toplam ozon tabakası incelme potansiyelinin %93’ü ve toplam fotokimyasal duman oluşumu potansiyelinin %75’i bu iki girdiden kaynaklanmaktadır. Sadece insan toksisite potansiyelinde en yüksek pay araba üretiminde kullanılan çeliğe aittir. Otomobil lastikleri mevcut durum itibariyle alternatif olmayan bir girdi olduğu için elektrikli araçların çevresel etkilerini azaltabilmenin temel yolunun kullanım esnasındaki tükettikleri elektriğin çevresel etkisini azaltmaktan geçtiği aşikardır. Türkiye’de 2020 yılı itibariyle yıllık elektrik üretiminin yaklaşık %57,6’sı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır [29]. Özellikle Türkiye’deki yerel linyit düşük kalitesi sebebiyle başta SO₂ olmak üzere birçok doğrudan salıma yok açmaktadır. Bu da Türkiye’de şebeke elektriğinin çevresel etkilerinin, başta asitleşme potansiyeli olmak üzere, göreceli olarak yüksek olmasının temel sebebidir [23].

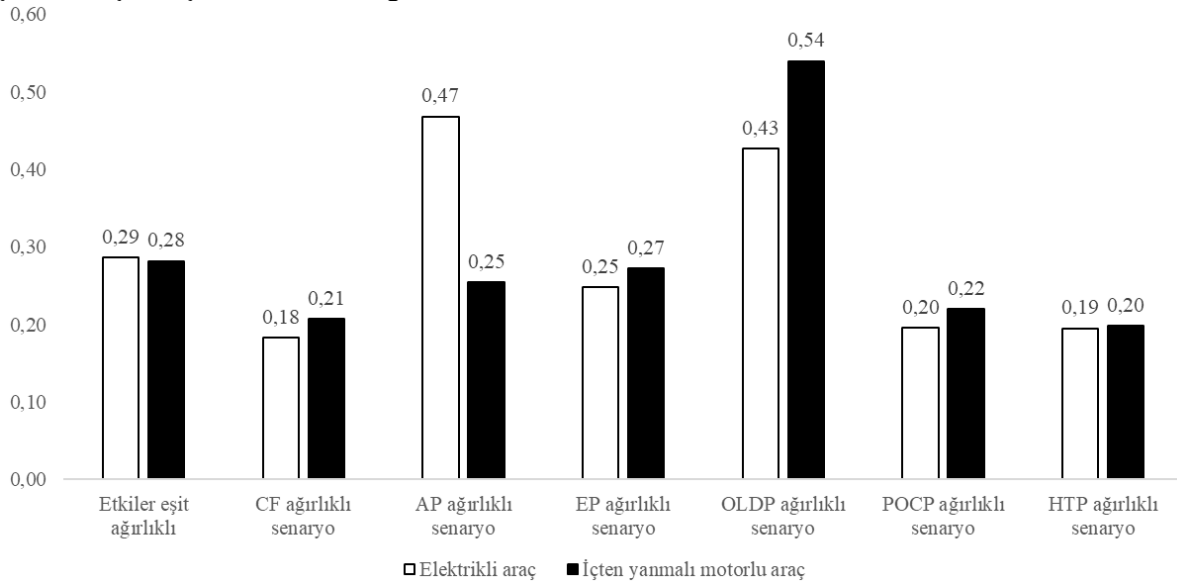
Benzer bir incelemeyi içten yanmalı motorlu araç için gerçekleştirdiğimizde ise ham madde tedarikinin ortalama payının %84,3, üretim aşamasının ortalama payının %5,2, kullanım ve bertaraf aşamalarının ortalama payının %10,2 ve son olarak nakliye aşamasının ortalama payının ise %0,3 olarak bulunduğu görülmektedir. İçten yanmalı motorlu araçların çevresel etkisinin temel sebebi yine benzer şekilde otomobil lastikleri ve aracın enerji kaynağı olan benzin olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak elektrikli araçlardan farklı olarak içten yanmalı motorun enerji ihtiyacının karşılanması hem doğrudan hem de dolaylı salımlara yol açmaktadır. Öyle ki karbon ayak izinin %58’i, fotokimyasal duman oluşumu potansiyelinin %59’u ve insan toksisite potansiyelinin %68’i sadece aracın kullanım anındaki doğrudan salımlardan kaynaklanmaktadır. Benzin üretimi esnasında gerçekleşen dolaylı salımlar ise karbon ayak izinin %13’üne, asitleşme potansiyelinin %29’una, fotokimyasal duman oluşumu potansiyelinin %34’üne denk gelmektedir. Bu durum bize eğer içten yanmalı motorlu araçların yaygın kullanımı devam

edecek ise, çevresel etkilerini azaltmak için Brezilya örneğinde olduğu gibi benzin+biyoetanol karışımı içeren özel yakıtların kullanımının teşvik edilmesinin bir seçenek olabileceğini göstermektedir [8].

B. TOPLAM ÇEVRESEL ETKİ

Toplam çevresel etki hesaplanırken ilk aşama bütün çevresel etki skorlarının normalize edilerek 0 ile 1 arasında değerlere getirilmesidir [30]. Akabinde ise iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Öncelikle bütün çevresel etkilere eşit ağırlıklar ($1/6 = 0,166$) vererek toplam etki değeri hesaplanmış; ardından ise bir etki değerinin 0,5, diğerlerinin ise 0,1 ağırlık değerine sahip olduğu özel senaryolar incelenmiştir. Bu senaryolar sonucu elde edilen toplam çevresel etki değerleri Şekil 3’de sunulmaktadır.

Şekil 3’te sonuçların ilgi çekici olduğu aşıkardır. Asitleşme potansiyeli ve ozon tabakası incelleme potansiyelinin ağırlıklı olduğu senaryolar hariç bütün senaryolarda elektrikli araçlar ile içten yanmalı motorlu araçların çevresel etkileri neredeyse eşit olarak elde edilmiştir. Karbon ayak izi ağırlıklı senaryoda az da olsa elektrikli araçların; asitleşme potansiyeli ağırlıklı ve ozon tabakası incelleme potansiyeli ağırlıklı senaryolarda ise içten yanmalı motorlu araçların toplam çevresel etkisi diğer alternatiflere kıyasla düşük çıkmıştır. Etkilerin eşit ağırlıklı olduğu senaryoda, çok az farkla da olsa, içten yanmalı motorların daha düşük etki değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum bize şunu göstermektedir: Eğer çevresel etkiler, küresel ölçekte çoğunlukla tercih edildiği üzere karbon ayak izi üzerinden tanımlanırsa elektrikli araçlar daha çevre dostu alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak diğer çevresel etkiler de göz önüne alındığı zaman iki teknolojinin, en azından Türkiye özelinde, çevresel açıdan çok farklı olmadığı ortadadır.



Şekil 3. Türkiye’de üretilen elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu araçların toplam çevresel etkileri

C. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN YAYGINLAŞMASININ TÜRKİYE’NİN ULUSAL KARBON AYAK İZİNE ETKİSİ

III.A numaralı bölümde belirtildiği üzere elektrikli araçların kilometre başına karbon ayak izi değeri 0,12 kgCO₂eşdeğeri iken içten yanmalı motorlarda bu değer 0,21 kgCO₂eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bir başka deyişle, iki teknoloji arasında araç ve kilometre başına 0,09 kgCO₂eşdeğeri bir fark mevcuttur. Literatür incelendiğinde Türkiye’nin yıllık toplam karbon ayak izinin yaklaşık 442,8 Mton CO₂eşdeğeri olarak raporlandığını görmekteyiz [31]. Türkiye’de trafikte olan binek araç sayısı ise yaklaşık 13.111.000 olarak belirtilmiştir [32]. Bu sayılardan yola çıkarak Türkiye’de elektrikli araçların yaygınlaşmasının ülke çapındaki karbon ayak izine etkisi hesaplanabilir. Öncelikle Türkiye genelinde elektrikli araçların ne hızda yaygınlaşacağını varsayılması gerekmektedir. Yapılan bir araştırmaya göre 2030 yılına gelindiğinde Türkiye’de trafikteki her üç binek otomobilinden bir tanesi elektrikli olacaktır

[33]. 2021-2030 arası nüfus artışını ihmal edecek olursak, trafikteki elektrikli araç sayısı yaklaşık $13.111.000 \times 0,3 = 3.933.000$ olarak bulunabilir. Bu araçların her birinin yıllık kat edeceği mesafeyi de daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi 20.000 km kabul edersek, elektrikli araçların kullanımı kaynaklı karbon ayak izi değişimi aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$(0,09 \text{ kgCO}_2/\text{araç.km}) \times (3.933.000 \text{ araç}) \times (20.000 \text{ km/yıl}) \times (1 \text{ Mton}/109 \text{ kg}) = 7,08 \text{ MtonCO}_2\text{eşdeğeri} \quad (1)$$

Eşt. 1'den yola çıkarak Türkiye'de elektrikli araçların yaygınlaşmasının ülkedeki toplam yıllık karbon ayak izini $(7,08 / 442,8) \times 100\% = \%1,6$ azaltacağı sonucuna varılabilir. Bununla beraber diğer çevresel etkilerde bir artış yaşanacağı da düşünülebilir. Türkiye'de önümüzdeki yıllarda elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payının artacağı ve nükleer santrallerinde devreye gireceği göz önüne alınırsa Türkiye'nin şebeke elektriğinin çevresel etkilerinin azalacağı varsaymak yanlış olmaz. Bu durumda elektrikli araçlara yaşanacak geçişten kaynaklı çevresel etki düşüşü, bu çalışmada ön görülenden daha da yüksek olacaktır.

D. LİTERATÜRDEKİ DİĞER ÇALIŞMALAR İLE KARŞILAŞTIRMA

Türkiye'deki elektrikli araçlar ile yurtdışında üretilen araçların çevresel etkilerini kıyaslamak için yurtdışında gerçekleştirilen benzer çalışmalar incelenmiş ve Tablo 3'te sunulan veriler elde edilmiştir. Bu aşamada belirtmek gerekir ki farklı çalışmalar arasında kıyaslama yapılabilmesi için çalışmaların fonksiyonel birimlerinin aynı şekilde tanımlanmış veya kolayca dönüştürülebilir olması gerekir. Fonksiyonel birimlerin bu çalışmadakinden farklı şekilde tanımlandığı çalışmalar maalesef Tablo 3'e dahil edilememiştir. Bu sebeple I.Bölüm'de ele alınan bazı eserler Tablo 3'te mevcut değildir.

Literatüre incelendiği zaman bu çalışmada elde edilen değerler ile literatürdeki değerlerin büyük ölçüde tutarlı olduğu görülmektedir. Bu da, çalışmada kullanılan yöntemin ve yapılan varsayımlarının geçerliliğini teyit etmektedir. Daha spesifik bir örnek verecek olursak, Tablo 3'te yer alan altı adet referans çalışmanın hepsinde hesaplanmış olan karbon ayak izi değerlerinin ortalaması elektrikli araç için $0,17 \text{ kgCO}_2\text{eşdeğeri}$; içten yanmalı motorlu araç için ise $0,23 \text{ kgCO}_2\text{eşdeğeri}$ olarak bulunmuştur. Türkiye özelinde bu değerler ise sırasıyla $0,12$ ve $0,21$ olarak hesaplanmıştır.

Diğer ülkelerde elde edilen değerler ile Türkiye'dekileri kıyasladığımızda Polonya hariç ülkelerdeki çevresel etki değerlerinin Türkiye'ye kıyasla genellikle daha düşük olduğunu görmekteyiz. Bu durum, elektrikli araç veya içten yanmalı motorlu araç üretimi ya da kullanımı ile ilgili olmaktan ziyade ülkelerin elektrik üretimlerinin çevresel etkileriyle ilintilidir. Polonya da Türkiye gibi elektrik üretiminde fosil yakıtlara ağırlık veren bir ülke olduğu için çevresel etki değerleri yüksek çıkmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin karbon ayak izi başta olmak üzere çevresel etkilerini düşürmek için öncelik vermesi gereken bir numaralı hususun elektrik üretiminde fosil yakıtların payını azaltıp yenilenebilir enerjini payını artırmak olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Tablo 3. Türkiye’de ve diğer ülkelerde üretilen elektrikli araçların ve içten yanmalı motorlu araçların çevresel etkilerinin karşılaştırılması

	Türkiye		İtalya [12]		Brezilya [8]		Polonya [10]		Çekya [10]		İspanya [14]		Litvanya [9]	
	EA	İYMA	EA	İYMA	EA	İYMA	EA	İYMA	EA	İYMA	EA	İYMA	EA	İYMA
CF (kgCO₂eşdeğeri)	0,12	0,21	0,10	0,203	0,16	0,27	0,276	0,284	0,214	0,284	0,12	0,25	0,142	0,105
AP (gSO₂eşdeğeri)	3,21	0,48	-	-	0,235	0,25	1,56	0,71	0,85	0,71	-	-	-	-
EP (10×gPO₄eşdeğeri)	0,83	0,58	-	-	0,36	0,5	3,26	0,53	3,07	0,53	-	-	-	-
OLDP (0,1×µgR11eşdeğeri)	2,76	2,07	-	-	1,0	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-
POCP (10×gC₂H₄eşdeğeri)	0,26	0,29	-	-	0,225	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
HTP (kgDiklorobenzen eşdeğeri)	0,25	0,16	-	-	0,0375	0,016	0,33	0,085	0,31	0,085	-	-	0,077	0,009

IV. SONUC

Bu çalışmada Türkiye koşullarında üretilen elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu aracın yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle hesaplanmış çevresel etki değerleri kıyaslanmıştır. Karbon ayak izi söz konusu olduğunda elektrikli aracın, içten yanmalı araca kıyasla yaklaşık %43 daha düşük bir etki skoruna sahip olmasına rağmen toplam etki skorları kıyasladığında iki teknolojinin neredeyse birebir aynı skora sahip olduğu, hatta elektrikli aracın etkisinin az da olsa daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, başka ülkelerde yapılan çalışmalarda da karşılaşılan bir durumdur (bkz: Tablo 3). Türkiye'nin ön görülen hedeflerin gerçekleşmesi durumunda elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasından kaynaklı olarak ulusal karbon salımlarını yaklaşık %1,6 oranında düşüreceği tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan çıkarılacak iki ana sonuç bulunmaktadır. Birincisi, yaygın kullanımın aksine elektrikli araçların, en azından Türkiye özelinde ve mevcut konjonktür itibarıyla, çevresel etki değerleri içten yanmalı motorlu araçlara göre daha düşük değildir. Eğer "çevresel etki" dendiği zaman kastedilen tek unsur karbon ayak izi olarak düşünülürse elektrikli araçların daha temiz bir teknoloji olduğu söylenebilir. Ancak diğer etkiler de göz önüne alındığında ve bütüncül bir yaklaşım ortaya konduğunda elektrikli araçların daha çevre dostu olduğunu söylemek mümkün görünmemektedir. Çalışmadan çıkarılacak ikinci sonuç ise, elektrikli araçların çevresel etkilerinin, çalıştıkları esnada tükettikleri elektriğin üretildiği kaynaklara büyük ölçüde bağlı olduğudur. Şebeke elektriğinin kendi çevresel etkisinin yüksek olduğu bir durumda, elektrikli araç kullanımının da çevresel etkisi yüksek olmaktadır. Bu sebeple çevresel etki azaltımı sağlamak yönünde atılacak adımların başında elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmak ve/veya fosil yakıt kaynaklı salımları azaltacak önlemler almak (örneğin termik santrallerde desülfürizasyon ünitesi çalıştırmanın kanunen mecburi hale getirilmesi gibi) gelmektedir.

Bu çalışmayı daha da geliştirmek için halihazırda incelenen altı adet çevresel etkiye ilaveten abiyotik kaynak kullanımı, fosil yakıt kullanımı, arazi kullanımı ve su ayak izi gibi parametrelerin de incelenmesi faydalı olabilir. Çalışmada kullanılan CCalC programı sadece mevcut altı etki değerini hesaplayabildiği için daha kapsamlı bir etki değerlendirme analizi yapmak mümkün olmamıştır.

V. KAYNAKLAR

- [1] H. Iglinski and M. Babiak, "Analysis of the potential of autonomous vehicles in reducing the emissions of greenhouse gases in road transport," *Proced. Eng.*, vol. 192, pp. 353-358, 2017.
- [2] V. Gallina, S. Torresan, A. Critto, A. Sperotto, T. Glade, and A. Marcomini, "A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment," *J. Environ. Manage.*, vol. 168, pp. 123-132, 2016
- [3] V. Georgatzi, Y. Stamboulis, and A. Vetsikas, "Examining the determinants of CO2 emissions caused by the transport sector: Empirical evidence from 12 European countries," *Econ. Anal. Policy*, vol. 65, pp. 11-20, 2020.
- [4] WWF. (2012, 10 Ekim). *Türkiye'nin Ekolojik Ayak İzi Raporu* [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.footprintnetwork.org/content/images/article_uploads/Turkey_Ecological_Footprint_Report_Turkish.pdf.
- [5] L.Trevisan and M. Bordignon, "Screening life cycle assessment to compare CO2 and greenhouse gases emissions of air, road, and rail transport: an exploratory study," *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 303-309, 2020.

- [6] G. Offer, M. Contestabile, D. Howey, R. Clague, and N. Brandon, "Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK," *Energ. Policy*, vol. 39, pp. 1939-1950, 2011.
- [7] S. Verma, G. Dwivedi, and P. Verma, "Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: a review," *Mater. Today Proceedings*, vol. 814, 2022, Art. no. 152870.
- [8] L. de Souza, E. Lora, J. Palacio, M. Rocha, M. Reno, and O. Venturini, "Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil," *J. Cleaner Prod.*, vol. 203, pp. 444-468, 2014.
- [9] K. Petrauskiene, M. Skvarnaviciute, and J. Dvarioniene, "Comparative environmental life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Lithuania," *J. Cleaner Prod.*, vol. 246, 2020, Art. no. 119042.
- [10] D. Burchart-Korol, S. Jursova, P. Folega, J. Korol, P. Pustejovksa, and A. Blaut, "Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic," *J. Cleaner Prod.*, vol. 202, pp. 476-487, 2018.
- [11] Y. Biçer and İ. Dinçer, "Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 132, pp. 141-157, 2018.
- [12] F. del Pero, M. Delogu, and M. Pierini, "Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of internal combustion engine (ICE) and electric car," *Procedia Struct. Integrity*, vol. 12, pp. 521-537, 2018.
- [13] L. Yang, B. Yu, B. Yang, H. Chen, G. Malima, and Y. Wei, "Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China," *J. Cleaner Prod.*, vol. 285, 2021, Art. no. 121899.
- [14] G. Naranjo, D. Bolonio, M. Ortega, and M. Garcia-Martinez, "Comparative life cycle assessment of conventional, electric and hybrid passenger vehicles in Spain," *J. Cleaner Prod.*, vol. 192, 2021, Art. no. 125883.
- [15] Y. Bıyık ve G. Civelekoğlu, "Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi," *Bilge Int. J. Sci. Techno. Res.*, c. 2, s. 2, ss. 157-166, 2018
- [16] T. Doğan Güzel and K. Alp, "Modeling of greenhouse gas emissions from the transportation sector in Istanbul by 2050," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 11, pp. 2190-2201, 2020.
- [17] A. Ustabaş, "Mikro ve makro etkileri yönünden elektrikli otomobiller (Türkiye ekonomisi örneği)," *Marmara Üniversitesi İ.İ.B. Dergisi*, c. 26, s. 1, ss. 269-291, 2014.
- [18] B. Yağcıtekin, M. Uzunoğlu, A.E.O. Karakaş, "Assessment of electrically-driven vehicles in terms of emission impacts and energy requirements: A case study for Istanbul," *J. Cleaner Prod.*, vol. 96, pp. 486-492, 2015.
- [19] *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*, ISO 14040, 2006.
- [20] *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*, ISO 14044, 2006.

- [21] Carbon Calculations over the Life Cycle of Industrial Activities (CCaLC), *Bilgisayar Programı*, Manchester (Birleşik Krallık): Manchester Üniversitesi, 2016.
- [22] R. Hirschler and B. Weidama, *Implementation Of Life Cycle Impact Assessment Methods*, St. Gallen, Switzerland: Ecoinvent, July 2010.
- [23] F.G. Üçtuğ, “Stakeholder opinion-based comparison of life cycle environmental impacts of electricity generation in Turkey with selected European countries,” *Anadolu University J. Sci. Technol. A- Appl. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 178-198, 2017.
- [24] MYEV. (2019, October 10). *How long should an electric car's battery last?* [Online]. Available: <https://www.myev.com/research/ev-101/how-long-should-an-electric-cars-battery-last#:~:text=Consumer%20Reports%20estimates%20the%20average,driven%2012%2C000%20miles%20per%20year.>
- [25] Yeşiltaylar. (2018, 8 Mayıs). *Geri dönüşüm sektörünün dünyadaki genel görünümü ve Türkiye'deki durumu* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.yesiltaylar.com.tr/tr/blog/geri-donusum-sektorunun-dunyadaki-genel-gorunumu-ve-turkiyedeki-durumu>.
- [26] K. Premrudee, U. Jantima, A. Kittinan, L. Naruetep, K. Kittiwat, and B. Sudkla, “Life cycle assessment of lead acid battery: case study for Thailand,” *Environ. Prot. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 101-114, 2013.
- [27] Y. Dong, Y. Zhao, U. Hossain, Y. He, and P. Liu, “Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review,” *Cleaner Environ. Syst.*, vol. 2, pp. 100033, 2021.
- [28] B. Atılğan and A. Azapagic, “An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey,” *Energ. Policy*, vol. 93, pp. 168-186, 2016.
- [29] enerjiportali.com. (2021, 10 Ekim). *Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim İstatistikleri* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.enerjiportali.com/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-istatistikleri-aralik-2020/>.
- [30] H. Abdi. (2010, October 10). *Normalizing Data* [Online]: Available: <https://personal.utdallas.edu/~herve/abdi-Normalizing2010-pretty.pdf>.
- [31] J. Timperley. (2018, May 3). *The Carbon Brief Profile: Turkey* [Online]. Available: <https://www.carbonbrief.org/carbon-brief-profile-turkey>.
- [32] tuik.gov.tr. (2021, 26 Ocak). *Motorlu Kara Taşıtları 2020* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2020-37410>.
- [33] AA. (2020, February 21). *Turkey shows real market potential for electric cars* [Online]. Available: <https://www.aa.com.tr/en/energy/electricity/turkey-shows-real-market-potential-for-electric-cars-/28430>.