

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PAYLAŞIMLI E-SKUTERLERİN ÇEVRESEL
ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ
ANALİZİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ:
İSTANBUL ÖRNEĞİ

Duygu ATAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PAYLAŞIMLI E-SKUTERLERİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN
YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ:
İSTANBUL ÖRNEĞİ**

Duygu ATAK tarafından hazırlanan tez çalışması 31.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan
YARDIM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Afşın Yusuf ÇETİNKAYA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi A. Burak PAÇ, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Paylaşımlı E-Skuterlerin Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Analiziyle Değerlendirilmesi: İstanbul Örneği” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Duygu ATAK

İmza



Bu alışma, “Elektrikli Skuterların İstanbul Trafikine ve evreye Olan Etkilerinin Belirlenmesi, En Uygun İşletme Ortamı, Koşulları ve Kurallarının Saptanması adlı TÜBİTAK 1001 Araştırma Projesi’nin 123M063” numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekür ederiz.



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bilimsel rehberliği, yapıcı eleştirileri ve yönlendirici katkılarıyla sürece değerli katkılar sunan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM'a içten teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında yürütülen yaşam döngüsü değerlendirmesi analizlerinde sağladığı sayısal veri desteği ve teknik katkılar nedeniyle Dr. Öğr. Üyesi Burak Paç'a ayrıca tez konusunun bilimsel temelini oluştmasına katkı sağlayan TÜBİTAK projesi çerçevesinde yönlendirmeleriyle destek veren proje yürütücüsü Doç. Dr. Selim Dünder'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu sürecin başında bilgilerinden yararlandığım sayın Dr. Öğr. Üyesi Agne Karlikanovaite Balıkçı'ya ve saha araştırmalarında e-skuter sistemleriyle ilgili değerli katkılar sunan Ege Güney'e teşekkür ederim. Çalışma da saha verilerinin temini ve uygulamaya dönük bilgilerle katkı sağlayan Hop firması yetkililerine, sağladıkları iş birliği için teşekkür ederim. Tüm akademik süreç boyunca her koşulda yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle beni daima motive eden aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Duygu ATAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
1.2 Yöntem	2
1.3 Literatür Özeti	3
1.4 Çalışmanın Hipotezi veya Araştırma Soruları	3
1.5 Tezin Yapısı	4
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1 Ulaştırma ve Mikromobilité Araçları	6
2.2 E-Skuterlerin Ulaşım Sistemlerindeki Yeri	7
2.3 Paylaşımlı E-Skuter Sistemlerinin Çevresel Etkileri	8
2.4 Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) ve Uygulama Alanları	10
2.5 Monte Carlo Analizi ve Belirsizlik Yönetimi	11
3 E-SKUTER YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ YÖNTEMİ	13
3.1 YDA Kavramı ve Standardizasyonu (ISO 14040 ve 14044)	13
3.2 OpenLCA ve Ecoinvent Veri Tabanı	14

3.3 Çalışmada Kullanılan E-Skuter Modelleri	14
3.3.1 Hop Modeli Teknik Özellikleri ve Envanter Verileri	14
3.3.2 Xiaomi M365 Teknik Özellikleri ve Envanter Verileri	17
3.4 Sistem Sınırları ve Fonksiyonel Birim	19
3.5 Yaşam Döngüsü Aşamalarının Tanımı ve Modelleme Yaklaşımı	20
3.5.1 Üretim Aşaması... ..	21
3.5.2 Ulaşım Aşaması	21
3.5.3 Kullanım Aşaması.....	22
3.5.4 Ömür Sonu Aşaması... ..	22
4 E-SKUTERLER İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR YDA SENARYOLARI VE	
MONTE CARLO ANALİZİ	24
4.1 Alternatif Senaryo Tanımları.....	24
4.1.1 İstanbul’ da E-skuter Üretilmesi Durumu.....	24
4.1.2 İstanbul’ daki Fabrikada PV Kullanılması Durumu... ..	24
4.1.3 E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu... ..	24
4.1.4 E-skutere Süspansiyon Eklenmesi... ..	24
4.1.5 E-skutere PV Eklenilmesi	25
4.2 Parametre Seçimi ve Belirsizlik Analizi	24
4.3 Monte Carlo Benzetim Yönetimi	25
4.3.1 Bakım Sıklığı... ..	28
4.3.2 Ek Batarya Gerekliliği	28
4.3.3 Kullanım Ömrü... ..	28
4.3.4 Araç + Ambalaj Ağırlığı	28
4.3.5 Toplama ve Dağıtım Mesafesi	29
4.3.6 Bir Şarjla Gidilen Mesafe	29
4.3.7 Enerji Tüketimi	29

5 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	30
5.1 Yaşam Döngüsü Aşamalarının Analizi	30
5.1.1 Üretim Aşaması Analizi.....	30
5.1.2 Nakliye Aşaması Analizi	34
5.1.3 Kullanım Aşaması Analizi.....	35
5.1.4 Ömür Sonu Aşaması Analizi	35
5.2 Senaryo Karşılaştırmaları	38
5.2.1 İstanbul’ da E-skuter Üretilmesi Durumu.....	38
5.2.2 İstanbul’ daki Fabrikada PV Kullanılması Durumu... ..	44
5.2.3 E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu... ..	50
5.2.4 E-skutere Süspansiyon Eklenmesi... ..	55
5.2.5 E-skutere PV Eklenilmesi	60
5.2.6 Tüm Üretim Senaryoların Karşılaştırmaları.....	66
5.2.7 Tüm Yaşam Döngüsü Senaryoların Karşılaştırmaları	76
5.3 Monte Carlo Sonuçlarının Yorumu.....	83
6 TARTIŞMA	87
6.1 Bulguların Literatürle Karşılaştırılması.....	87
6.2 Sürdürülebilir Ulaşım Politikalarına Etkileri	89
6.3 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Güçlü Yönleri.....	90
7 SONUÇ	93
KAYNAKÇA	95
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	101

SİMGE LİSTESİ

r	Aylık bakım sıklığı (bakım/ay)
D_c	Bir şarjla gidilen mesafe (km)
E_b	Bakım periyodu (km)
d_{gg}	Pil getir-götür işlemi için ortalama tüketim değeri (Wh/km)
C_{pil}	Toplam pil kapasitesi (Wh)
L	Toplam kullanım ömrü (km)
x	Rastgele değişken
μ^*	Rastgele değişken x 'in medyanı
σ^*	Rastgele değişken x 'in standart sapması
Y	Kullanım süresi (yıl)
μ	Log-ortalama
σ	Log-standart sapma
$maks$	Üçgen dağılımda bir parametre için en büyük değer
min	Üçgen dağılımda bir parametre için en küçük değer
mod	Üçgen dağılımda bir parametre için en olası değer
A	Yıldaki ay sayısı (12 ay/yıl)

KISALTMA LİSTESİ

CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
PV	Fotovoltaik
Gmean	Geometrik Ortalama
GSD	Geometrik Standart Sapma
GWP	Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
LCA	Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Analizi)
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi
YDED	Yaşam Dağılımı Etki Değerlenmesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Senaryo ve analiz aşamaları.....	5
Şekil 3.1 E-skuter yaşam döngüsü diyagramı	20
Şekil 3.2 E-skuter üretim malzemeleri.....	21
Şekil 4.1 Fotovoltaik laminat malzemesi.....	25
Şekil 5.1 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanterleri senaryo sonuçları	71
Şekil 5.2 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları	75
Şekil 5.3 Hop e skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları	79
Şekil 5.4 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları	82
Şekil 5.5 Xiaomi M65 e-skuter üretim Monte Carlo sonuçları.....	84
Şekil 5.6 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü Monte Carlo sonuçları	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Hop malzeme ve üretim envanterleri	15
Tablo 3.2 Hop batarya ağırlığı.....	16
Tablo 3.3 Hop batarya teknik özelliği	16
Tablo 3.4 Xiaomi M65 malzeme ve üretim envanterleri.....	18
Tablo 3.5 Xiaomi M65 batarya ağırlığı	18
Tablo 3.6 Hop batarya teknik özelliği	19
Tablo 3.7 Hop e-skuter ulaşım-kullanım-ömür sonu parametreleri	23
Tablo 3.8 Xiaomi M65 e-skuter ulaşım-kullanım-ömür sonu parametreleri.....	23
Tablo 4.1 Monte Carlo belirsizlik analizi aralıkları.....	26
Tablo 5.1 Hop e-skuter temel durumda malzeme ve üretim envanter sonuçları ...	31
Tablo 5.2 Hop e-skuter temel durumda üretim salım sonuçları	32
Tablo 5.3 Xiaomi M65 e-skuter temel durumda malzeme ve üretim envanter sonuçları	33
Tablo 5.4 Xiaomi M65 e-skuter temel durumda üretim salım sonuçları.....	33
Tablo 5.5 Hop e-skuter temel durumda yaşam döngüsü sonuçları.....	36
Tablo 5.6 Hop e-skuter temel durumda yaşam döngüsü salım sonuçları	36
Tablo 5.7 Xiaomi M65 e-skuter temel durumda yaşam döngüsü envanter sonuçları	37
Tablo 5.8 Xiaomi M65 e-skuter temel durumda yaşam döngüsü salım sonuçları	37
Tablo 5.9 Hop e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları	39
Tablo 5.10 Hop e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	40
Tablo 5.11 Hop e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	40
Tablo 5.12 Hop e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü salım sonuçları.....	41
Tablo 5.13 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları.....	41
Tablo 5.14 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul 'da e-skuter üretilmesi durumda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları.....	42

Tablo 5.15 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul ‘da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları.....	43
Tablo 5.16 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul ‘da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları	43
Tablo 5.17 Hop e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları.....	45
Tablo 5.18 Hop e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları.....	46
Tablo 5.19 Hop e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	46
Tablo 5.20 Hop e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları	47
Tablo 5.21 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları.....	47
Tablo 5.22 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	48
Tablo 5.23 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	49
Tablo 5.24 Xiaomi M65 e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları.....	49
Tablo 5.25 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları	51
Tablo 5.26 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları.....	51
Tablo 5.27 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları.....	52
Tablo 5.28 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları	52
Tablo 5.29 Xiaomi M65 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları.....	53
Tablo 5.30 Xiaomi M65 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları.....	54
Tablo 5.31 Xiaomi M65 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	54
Tablo 5.32 Xiaomi M65 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları	55
Tablo 5.33 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları	56
Tablo 5.34 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	57
Tablo 5.35 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	57

Tablo 5.36 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü salım sonuçları	58
Tablo 5.37 Xiaomi M65 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları	58
Tablo 5.38 Xiaomi M65 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları.....	59
Tablo 5.39 Xiaomi M65 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları.....	60
Tablo 5.40 Xiaomi M65 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü salım sonuçları	60
Tablo 5.41 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları	61
Tablo 5.42 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	62
Tablo 5.43 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	63
Tablo 5.44 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü salım sonuçları.....	63
Tablo 5.45 Xiaomi M65 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları.....	64
Tablo 5.46 Xiaomi M65 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları	65
Tablo 5.47 Xiaomi M65 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları	65
Tablo 5.48 Xiaomi M65 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü salım sonuçları	66
Tablo 5.49 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları	68
Tablo 5.50 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçların yüzdelik değerleri	69
Tablo 5.51 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları	72
Tablo 5.52 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçların yüzdelik değerleri	73
Tablo 5.53 Hop e skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları.....	77
Tablo 5.54 Hop e skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçların yüzdelik değerleri .	78
Tablo 5.55 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları.....	80
Tablo 5.56 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçların yüzdelik değerleri.....	81
Tablo 5.57 Xiaomi M65 e-skuter üretim Monte Carlo sonuçları	85
Tablo 5.58 Xiaomi M65 e-skuter yaşam döngüsü Monte Carlo sonuçları.....	86

Paylaşımlı E-Skuterlerin Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Analiziyle Değerlendirilmesi: İstanbul Örneği

Duygu ATAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM

Son yıllarda sürdürülebilir ulaşım çözümleri arayışı kapsamında e-skuter kullanımı dünya genelinde ve Türkiye’de hızla artmıştır. Ancak bu araçların çevresel etkileri yalnızca kullanım aşamasında değil, tüm yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmelidir. Bu çalışma, İstanbul’da yaygın kullanılan Hop ve Xiaomi M365 e-skuterlerin yaşam döngüsü analizini (YDA) içermektedir.

Çalışmada her iki e-skuter için üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu süreçleri değerlendirilmiş, beş özgün senaryo karşılaştırılmıştır: (1) İstanbul’da üretim, (2) fabrikada fotovoltaiik (PV) panel kullanımı, (3) istasyonlarda PV kullanımı, (4) süspansiyon eklenmesi ve (5) e-skuter üzerine PV panel entegrasyonu. İncelemede temel çevresel etki göstergesi olarak küresel ısınma potansiyeli (GWP, CO₂ eşdeğeri) dikkate alınmıştır. Hesaplamalar OpenLCA yazılımı ve Ecoinvent 3.8 veri tabanı ile yapılmıştır.

Belirsizlik analizi için Monte Carlo benzetimi uygulanmış, Xiaomi M365 modeli üzerinden yedi parametre incelenmiştir: bakım sıklığı, ek batarya gerekliliği, kullanım ömrü, araç ve ambalaj ağırlığı, toplama-dağıtım mesafesi, bir şarjla

gidilen mesafe ve enerji tüketimi. Bu parametrelerin değer aralıkları doğrultusunda farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Temel durumda Hop e-skuter için üretim kaynaklı salım 257,971 kg CO₂-eşd, Xiaomi M365 için ise 120,659 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır. Kullanım aşamasında pil şarjı, toplama ve yer değiştirme süreçleri öne çıkmıştır. Çin'den yapılan gemi taşımacılığının ortadan kalkmasıyla ulaşımına bağlı salımların azaldığı görülmüştür. Tüm yaşam döngüsünde Hop e-skuter 33,797 g CO₂-eşd, Xiaomi M365 ise 26,868 g CO₂-eşd değerine ulaşmıştır.

Monte Carlo Xiaomi M365 e-skuter belirsizlik incelemesinde üretim aşaması ve tüm yaşam döngüsünün incelemesine bakıldığında en düşük değer e-skuter istasyonlarda PV kullanılması ve İstanbul'da fabrikada PV kullanılması olduğunu belirlenmiştir.

Sonuç için yaşam döngüsü değerlendirmesi, e-skuterlerin çevresel etkilerinin büyük ölçüde üretim ve kullanım aşamalarında oluştuğunu ortaya koymuştur. İstanbul'da üretim yapılması, istasyonlarda güneş enerjisi kullanımı ve süspansiyon sistemlerinin bütünleştirilmesi gibi iyileştirmeler, daha sürdürülebilir bir ulaşım seçeneği için önem arz etmektedir. Bu çalışma, e-skuter tasarımlarının ve altyapısının daha sürdürülebilir hale getirilmesine yönelik bilimsel bir temel sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli skuter, yaşam döngüsü incelemesi, sürdürülebilir ulaşım, çevresel etki değerlendirmesi, OpenLCA.

ABSTRACT

Evaluating The Environmental Impacts of Shared E-Scooters Using Life Cycle Assessment: Istanbul Case

Duygu ATAĞ

Department of Civil Engineering

Master of Science

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa Sinan YARDIM

In recent years, the search for sustainable transportation solutions has led to a rapid increase in the use of e-scooters worldwide and in Turkey. However, the environmental impacts of these vehicles should be assessed not only during their use phase but throughout their entire life cycle. This study presents a life cycle assessment (LCA) of Hop and Xiaomi M365 e-scooters, which are widely used in Istanbul.

The analysis evaluated the production, transportation, use, and end-of-life phases of both e-scooters and compared five original scenarios: (1) production in Istanbul, (2) photovoltaic (PV) panel use at the factory, (3) PV use at stations, (4) addition of suspension, and (5) integration of PV panels on the e-scooter. Global warming potential (GWP, CO₂ equivalent) was considered as the main environmental impact indicator. Calculations were performed using OpenLCA software and the Ecoinvent 3.8 database.

For uncertainty analysis, a Monte Carlo simulation was applied, focusing on seven parameters for the Xiaomi M365 model: maintenance frequency, need for additional batteries, service life, vehicle and packaging weight, collection and redistribution distance, distance per charge, and energy consumption. Different outcomes were obtained depending on the ranges of these parameters.

In the baseline scenario, production-related emissions were calculated as 257.971 kg CO₂-eq for the Hop e-scooter and 120.659 kg CO₂-eq for the Xiaomi M365. During the use phase, battery charging, collection, and relocation processes were the most significant contributors. The elimination of maritime transport from China was observed to reduce transportation-related emissions. Across the entire life cycle, the Hop e-scooter reached 33.797 g CO₂-eq, while the Xiaomi M365 reached 26.868 g CO₂-eq.

In the Monte Carlo uncertainty analysis for the Xiaomi M365, both the production phase and the entire life cycle assessment indicated that the lowest impact values were achieved in scenarios involving PV use at stations and PV use at factories in Istanbul.

In conclusion, the life cycle assessment revealed that the environmental impacts of e-scooters are largely concentrated in the production and use phases. Improvements such as local production in Istanbul, the utilization of solar energy at stations, and the integration of suspension systems are important steps toward making e-scooters a more sustainable transportation option. This study aims to provide a scientific basis for enhancing the sustainability of e-scooter designs and infrastructure.

Keywords: Electric scooter, life cycle assessment (LCA), sustainable transportation, environmental impact assessment, OpenLCA.

1 GİRİŞ

Bilindiği gibi ulaştırma sistemleri taşıyanlar, taşıtlar, ağ ve işletme olmak üzere dört temel öge üzerine kurulmuştur. Bunlar arasında taşıtlar, kendisi aracılığıyla, doğrudan hem tıkanıklık etkilerinin hem de çevresel etkilerin en çok görünür hale geldiği bileşendir. Ulaşım talebi kontrol edilemediğinde taşıtların sebep oldukları olumsuz etkiler kısa zamanda görünür hale gelmektedir. Bu yüzden, hızlı kentleşme, nüfus artışı ve fosil yakıtlara dayalı ulaşımın olumsuz etkileri nedeniyle, geleneksel ulaştırma çözümleri yerini sürdürülebilir ulaşım çözümlerine yönelmeye başlamıştır. Sürdürülebilir çözümlere dayalı bütçe payları artış eğilimindedir. Sorunları çözmek üzere, fosil yakıtlı taşıtlara seçenek arayışları da hız kazanmıştır. Büyük şehirlerde dikkat çekici bir seçenek olarak mikromobilité araçları olarak tanımlanmış ve kısa mesafeli ulaşımı kolaylaştıran elektrikli skuterler bulunmaktadır. Bu bağlamda, mikromobilité araçları olarak tanımlanan ve kısa mesafeli ulaşımı kolaylaştıran skuterler (e-skuter) öne çıkmaktadır.

Skuterler, elektrik motoru ile çalışan ve enerjisini batarya veya pilden alan iki tekerlekli araçlardır [1]. Paylaşımlı e-skuter sistemleri, hem toplu taşıma sistemleriyle bütünleşmiş çalışabilmeleri hem de karbon ayak izinin düşük olması nedeniyle çevreci bir ulaşım biçimi olarak sunulmaktadır. İstanbul gibi yüksek nüfuslu ve yoğun trafik problemi yaşayan büyük şehirlerde, bu araçlar kısa mesafeli yolculuklarda kullanıcılar tarafından yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak, e-skuterlerin yalnızca kullanırken düşük salımlarına odaklanmak, bu araçların gerçek çevresel etkilerini değerlendirmede yetersiz kalmaktadır. E-skuterlerin üretim, ulaştırma, bakım ve ömür sonu süreçleri de dikkate alındığında, toplam çevresel yükleri önemli ölçüde artabilmektedir. Bu doğrultuda, e-skuterlerin tüm yaşam döngüsünü kapsayan bütüncül bir çevresel değerlendirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın temel amacı, İstanbul’da yaygın olarak kullanılan iki farklı e-skuter modelinin (Hop ve Xiaomi M365) Yaşam Döngüsü Analizi’ni (YDA) yöntemsel olarak ortaya koyarak, bu sistemlerin çevresel etkilerini özellikle ulaştırma sistemleri bağlamında nicel olarak belirlemektir. Tez kapsamında bu iki yaygın e-skuter modelini üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu aşamaları ayrı ayrı değerlendirilerek, farklı senaryolar üzerinden çevresel etkileri karşılaştırılacaktır. Çalışma, İstanbul’daki koşulları ve enerji üretim yapısını dikkate almaktadır. Bu beş özgün değerle üretilen senaryolar: (1) E-skuterin İstanbul’da üretilmesi, (2) İstanbul’daki üretim tesisinde fotovoltaik (PV) güneş paneli kullanımı, (3) E-skuter istasyonlarında PV güneş paneli kullanılması, (4) E-skutere süspansiyon sistemi eklenmesi ve (5) E-skuter üzerine PV güneş panelleri eklenmesidir. Her senaryoda GWP (küresel ısınma potansiyeli, CO₂ eşdeğeri salımı) temel çevresel etki göstergesi olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca bu değerlendirmenin farklı sürdürülebilirlik senaryoları altında nasıl değiştiğini açıklamak için Monte Carlo benzetimleri ile incelemelere ilişkin belirsizlikler göz önüne alınarak istatistiksel olarak değerlendirilecektir. Monte Carlo incelemesinde bakım sıklığı, ek batarya gerekliliği, kullanım ömrü, araç + ambalaj ağırlığı, toplama ve dağıtım mesafesi, bir şarjla gidilen mesafe ve enerji tüketimi değerleri hesaplanmıştır.

1.2 Yöntem

Bu tez çalışmasında, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun şekilde e-skuterlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalar için OpenLCA yazılımı kullanılarak, Ecoinvent 3.8 veri tabanından alınan verilerle gerçekleştirilmiştir [2]. Çalışma boyunca sistem sınırları üretimden ömür sonu aşamasına kadar olan tüm süreci kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Çevresel etkiler temel olarak sera gazı salımları (CO₂-eşd) incelenmiştir. Buna ek olarak enerji tüketimi ve ince partikül madde oluşumu gibi etki kategorisi üretim ve tüm yaşam döngüsü salım değerleri bilgi verilmiştir. Ayrıca üretim verileri, Hollingsworth ve diğ. (2019) tarafından ortaya konulan veri setine dayanmaktadır [3]. Belirsizlik sonuçların güvenilirliğini arttırmak amacıyla, Xiaomi M365 modeli için Hop verilerini de dikkate alarak belirlenen parametrelerine Monte Carlo analizi uygulanmıştır.

1.3 Literatür Özeti

İlk olarak 2017 yılında Amerika’da kullanılmaya başlanan paylaşımlı elektrikli e-skuter sistemlerinin, daha sonraki yıllarda çeşitli ülkelerde kullanılmaya başlandığı sapanmıştır [4]. Türkiye’de e-skuter paylaşım sistemi, 2019 yılının Mart ayında İstanbul’da hizmete sunulmasıyla başlamıştır [5]. Günümüzde de kent içi ulaşımında sürdürülebilirlik arayışları doğrultusunda e-skuter kullanımı Türkiye’de ve dünyada hızla yaygınlaşmaya devam etmektedir. Özellikle büyük şehirlerde artan trafik sıkışıklığı, karbon salımlarının azaltılması gerekliliği ve bireysel kullanıma olan talep, e-skuterleri tercih edilen bir ulaşım aracı haline getirmiştir. Ancak, e-skuterlerin düşük hızları nedeniyle karayolu trafik akışını olumsuz etkileyebileceği ve güvenlik riskleri oluşturabileceği yönünde bulgular da literatürde yer almaktadır [6]. Bu araçların çevresel açıdan ne derece sürdürülebilir olduğu, sadece kullanım anındaki salımsızlıkla değil, tüm yaşam döngüleri boyunca değerlendirilmesi gerekir. Nitekim bu açıdan bakıldığında, sınırlı kapsamlı incelemelerde bile e-skuterlerin bir salım maliyeti olduğu saptanmıştır [7].

1.4 Çalışmanın Hipotezi veya Araştırma Soruları

İstanbul’da yaygın olarak kullanılan Hop ve Xiaomi M365 e-skuterlerin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkiler, üretim özellikleri ve kullanım senaryolarına bağlı olarak anlamlı ölçüde değişim göstermektedir. Üretim ve kullanım aşamalarında enerji tüketiminden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Bu kapsamda aşağıdaki araştırma soruları sorulmuştur:

- İstanbul’da bulunan Hop ve Xiaomi M65 e-skuterleri ne kadar salım değerleri üretir?
- Xiaomi M365 ve Hop e-skuterleri İstanbul’da üretilse e-skuterlerin çevresel etki nasıl değişir ve ne kadar salım değerleri üretir?
- Xiomi m³ 65 ve Hop e-skuterleri İstanbul’da üretimde güneş paneli kullanarak üretilse çevresel etki nasıl değişir ve ne kadar salım değerleri üretir?

- Xiomi m³ 65 ve Hop e-skuterleri İstanbul'da üretimde ve kullanım aşamasında şarj edilirken istasyonlarda güneş paneli kullanarak uygulansa çevresel etki nasıl değişir ve ne kadar salım değerleri üretir?
- Xiomi m³ 65 ve Hop e-skuterlerin üzerine süspansiyon takılsa çevresel etki nasıl değişir ve ne kadar salım değerleri üretir?
- Xiomi m³ 65 ve Hop e-skuterleri üzerine fotovoltaiik (PV) güneş panelleri takılırsa çevresel etki nasıl değişir ve ne kadar salım değerleri üretir?
- İki e-skuter için belirlenen parametreler dikkate alındığında, Xiaomi M365 modelinin yaşam döngüsü analizinde OpenLCA programı kullanılarak Monte Carlo incelemesi yapıldığında, çevresel etkiler nasıl değişmekte ve ortaya çıkan sera gazı salım değerleri ne kadar olmaktadır?

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez, İstanbul'da kullanılan iki farklı paylaşımlı e-skuter modelinin yaşam döngüsü analizini temel alarak yapılandırılmıştır. Tezin genel yapısı yedi ana bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölüm, konunun tanıtımı, tezin amacı ve kapsamı, tezin yöntemi, literatür özeti, çalışmanın hipotezi veya araştırma sorularını ve tezin yapısını içermektedir.

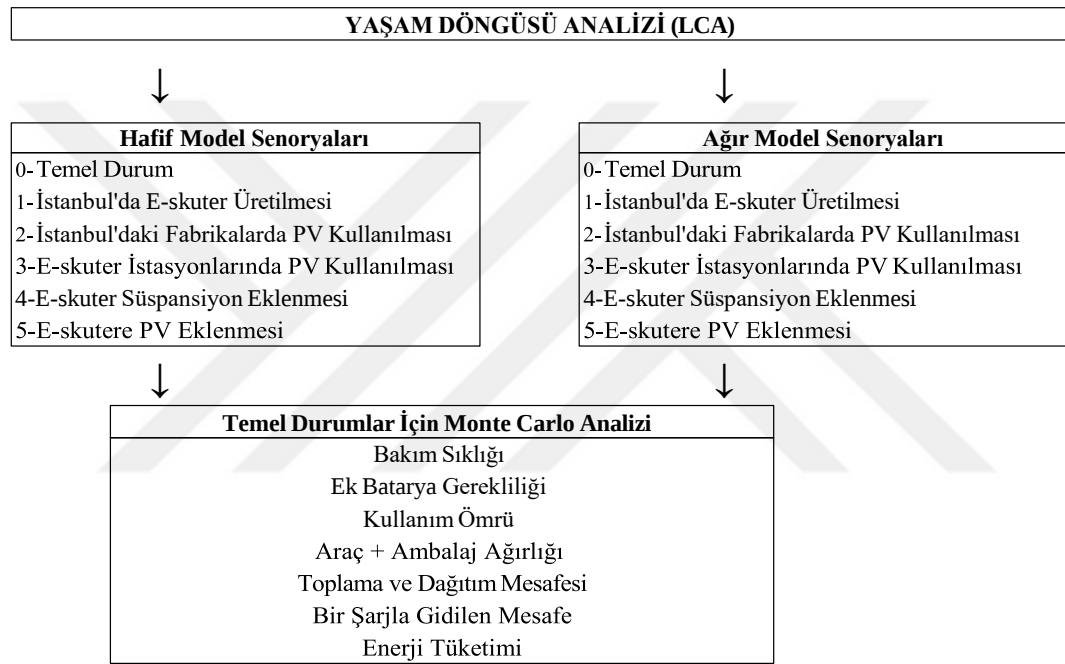
İkinci bölüm, literatür taramasına ayrılmıştır. Bu bölümde, e-skuterlerin kent içi ulaşımındaki yeri, çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizine ilişkin temel kavramlar ve önceki benzer çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışmanın yöntemi açıklanmıştır. Bu kapsamda OpenLCA yazılımı ve Ecoinvent 3.8 veri tabanı kullanılarak oluşturulan yaşam döngüsü modeli tanımlanmış, fonksiyonel birim, sistem sınırları, varsayımlar ve veri kaynakları detaylandırılmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan senaryolar, belirsizlik incelemesine yönelik Monte Carlo benzetimi ve değerlendirilen çevresel etkileri bu bölümde sunulmuştur (Şekil 1.1).

Dördüncü bölüm, inceleme sonuçlarını içermektedir. Seçilen iki farklı e-skuter modeline ait üretim, taşıma, kullanım ve ömür sonu aşamalarının çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; her bir senaryoya göre oluşan yaşam döngüsü analizleri tablo ve grafiklerle birlikte açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, inceleme sonuçları yorumlanmıştır. Senaryo incelemeleri ve Monte Carlo benzetimi sonuçlarının sistem performansına etkileri bu bölümde ele alınmıştır. Ayrıca, ulaşılan sonuçlar literatürle karşılaştırılarak çalışmanın özgün katkıları vurgulanmıştır.

Altıncı ve yedinci bölüm, sonuç ve önerilerden oluşmaktadır. Bu bölümde çalışmanın genel bulguları özetlenmiş, karar vericilere yönelik politika önerileri sunulmuş ve gelecekte yapılabilecek araştırmalara dair önerilere yer verilmiştir.



Şekil 1.1 Senaryo ve analiz aşamaları

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, tezin temelini oluşturan ulaştırma, mikromobilité araçları, e-skuterlerin ulaşım sistemlerindeki yeri, paylaşımlı e-skuter sistemlerinin çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizi (YDA) ve Monte Carlo analizi gibi anahtar kavramlar ve ilgili literatür derinlemesine incelenecektir. Burada amaç, e-skuterlerin hakkında mevcut bilgi birikimi vermek ve bu tezin söz konusu literatüre nasıl bir katkı sunacağını göstermektir.

2.1 Ulaştırma ve Mikromobilité Araçları

Küresel şehirleşme ve artan nüfus ile hem bireysel taşıt kullanımı hem kent içi ulaşım sistemlerinin kullanımı artış eğilimi içine girmiştir. Bu durum zaman kayıplarına ve çevresel bozulmalara neden olmaktadır [8]. Bu bağlamda, daha sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu ulaşım araçlarına olan ihtiyaç önemli ölçüde artmıştır. Mikromobilité, bireysel ulaşım ihtiyacına yönelik çözümler sunarak bu noktada bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır [9]. Bisikletler, elektrikli bisikletler ve e-skuterler gibi mikromobilité araçları, düşük karbon salımı, kullanım esnekliği ve düşük maliyet fırsatları ile kentsel ulaşımında önemli bir fark yaratmaktadır [10].

İlk olarak 2017 yılında Amerika’da kullanılmaya başlanan paylaşımlı e-skuter sistemleri, daha sonra dünyanın çeşitli ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [4]. Diğer ulaşım türlerine bağlantı olanağı sunan e-skuterler aynı zamanda erişilebilirliği artırmakta, esnek kullanım imkân sağlamakta ve trafik sıkışıklığının yaşandığı ulaşım mekânlarında kişisel ulaşım aracı olarak seyahat olanağı sunmaktadır. Mikromobilité araçları kenetli veya kenetsiz paylaşımlı bisikletler, e-bisikletler, skuterler, e-skuterler vb. olarak tanımlanmaktadır [11]. Bu çalışmada e-skuterlerin literatürdeki yeri ve yaşam döngüsü analizleriyle üretim, ulaşım, kullanım, yaşam sonu olarak farklı aşamalarda incelenecektir. E-

skuterlerin ömür sonu aşaması elden çıkarma, geri dönüşüm, yeniden kullanma olarak ele alınacaktır.

Mikromobilité araçları kentsel hareketliliğin önemli bir parçası olarak değerlendirilmekte ve modern ulaştırma sistemlerinin karşılaştığı zorluklara çözümler sunmaktadır. E-skuterler, erişilebilirlikleri, kullanım kolaylıkları ve düşük maliyetleri sayesinde son yıllarda özellikle yaygınlaşmaya başlamıştır.

2.2 E-Skuterlerin Ulaşım Sistemlerindeki Yeri

E-skuterler, 2017 yılında ABD’de başlayan paylaşımlı kullanım deneyiminden sonra küresel çapta hızla yaygınlaşmıştır [4]. Bu araçlar, mevcut kentsel ulaşım türleriyle entegrasyon sağlayarak kullanıcıların erişilebilirliğini artırmakta ve esnek bireysel hareket imkânları sunmaktadır [12]. Avrupa şehirlerinde yapılan çalışmalar, e-skuterlerin önemli bir oranda toplu taşıma ile bütünleşik kullanıldığını göstermektedir [13]. Shaheen ve Cohen (2019) tarafından yapılan kapsamlı bir inceleme, mikromobilitenin, özellikle toplu taşıma ile bütünleşik bir şekilde çalıştığında son kilometre ulaşım sorununu çözmede etkili olduğunu ortaya koymuştur [14]. İstanbul gibi yoğun nüfuslu kentlerde, paylaşımlı e-skuter sistemleri kullanıcıların bireysel araçlara olan bağımlılığını azaltmakta ve toplu taşıma duraklarına erişimi kolaylaştırmaktadır [14]. İstanbul’da yapılan yerel araştırmalar, e-skuter kullanım eğilimlerinde özellikle genç kullanıcı kitlesinin yaygın olduğunu ve mobil uygulama tabanlı erişim kolaylığının yaygınlaşmayı desteklediğini göstermektedir [15]. Ayrıca, yapılan bir çalışmada e-skuter kullanımının yürüme ve toplu taşıma kullanımını azalttığı ve trafik akışını olumsuz etkileyebileceği de gözlemlenmiştir [16]. Ankara’da yapılan yerel gözlemler, e-skuterlerin Kızılay, Bahçelievler ve özellikle üniversite kampüsü gibi yoğun alanlarda yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir [17]. Aktarma merkezlerinde paylaşımlı e-skuter kullanımı, eğlence, işe gidip gelmek için sınırlı kullanım ve insanlar arasında yaygın olan sahil bölgelerinde de yaygındır [18]. E-skuterler "çoğunlukla eğlenceli nesneler olarak görülüyor" [19]. Her ne kadar ağırlıklı olarak eğlence amaçlı kullanılsa da kullanım sıklıkla kullanımı amaçlarının da genişleyeceği varsayılmaktadır [20]. Degele ve diğ. (2018), e-skuterlerin birkaç kilometreye kadar olan mesafeler için binek otomobillere seçenek bir ulaşım seçeneği olabileceği sonucuna varmıştır [21]. Ancak, yapılan

yerel araştırmalar bu alternatif olma durumunun bireylerin mevcut ulaşım alışkanlıkları ve sahip oldukları araçlardan etkilendiğini göstermektedir. İstanbul'da gerçekleştirilen bir çalışmada, özel otomobil sahipliğinin bireylerin e-skuter tercihleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir [22]. Bununla birlikte, bu yaygınlık altyapı eksiklikleri, yasal düzenlemeler ve kullanıcı algısına bağılı olarak farklılık göstermektedir [23]. Türkiye'de ise 2019 yılının Mart ayında başlayan serüvenine e-skuterler kiralama ve mikromobilité pazarı 2020 yılında COVID-19 ile günlük hayatımıza daha çok yerleşmiştir. COVID-19 salgını, kullanıcıların ulaşım tercihleri üzerinde önemli bir etki yaratmış ve bu durum Yapay Sinir Ağları gibi modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir [24]. Kadıköy Belediyesi kentteki artan skuter sayısı ve kaldırım üzerine park edilme sorunu nedeniyle artan şikayetler neticesinde ticari skuterlerin toplatmıştır [25]. Bununla birlikte, bazı kentlerde e-skuter kullanımının sosyal ve altyapısal nedenlerle kısıtlandığı da görölmektedir. Paris'te düşük bir katılım oranıyla gerçekleşen bir halk oylaması ile paylaşımlı e-skuterler yasaklanmış ve bu yasakla birlikte yaklaşık 1.000.000 şahsi skuter satışı olmuştur [26].

2.3 Paylaşımlı E-Skuter Sistemlerinin Çevresel Etkileri

E-skuterlerin çevresel etkilerini bütüncül bir şekilde değerlendirmek için yaşam döngüsü analizi (YDA) yöntemi yapılan birçok akademik çalışmada temel araç olarak kullanılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalarda, skuterlerin düşük bir oranda binek araçların yerini almak için kullanıldığı, çoğunun karbon salımı yapan otomobiller yerine yürümek gibi sıfır salımlı seçeneklerin yerini aldığı görölmektedir. Bu durum, salımlar açısından, kiralık bir skuter ile kat edilen bir milin, araba ile kat edilen bir milin sadece altıda birinin yerini aldığı anlamına gelmektedir [27]. Skuterlerin kısa ömürlü olması, sık sık değıştirilmelerine ve çok sayıda üretilmelerine neden olmaktadır. Elektrikli hizmet için mevcut sistem skuterleri, şarj edilmeleri de dahil olmak üzere, CO₂ yayan araçlara dayanmaktadır [27]. Ana malzemeler alüminyum, çelik, plastik ve kauçuktur [27]. Her şeyden önce, çoğu çalışma, aracın hizmet ömrü, kullanım oranı, yolculuk mesafesi, kentsel ulaşım sistemindeki çeşitli ulaşım türlerinin birbirinin yerine kullanılma oranları ve üretim, yeniden dengeleme ve toplama etkisi gibi paylaşılan mikro mobilitenin gerçek işletem özelliklerini ve ilgili yaşam döngüsü etkilerini

kapsamlı ve sistematik bir şekilde dikkate almamaktadır [28, 29, 30, 31, 32]. E-skuterler doğrudan gaz salımı yapmasalar bile, trafiğe katıldıklarında trafik akışını değiştirerek dolaylı yoldan ulaşım kaynaklı CO₂, CO, HC ve NO_x salımlarında artışa sebep olabilmektedir [33].

Paylaşımlı sistemler, çevresel açıdan bireysel tüketimi azaltma ihtimaline sahip olsa da bu durum uygulama şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bird gibi e-skuterlerin bildirdiği verilere göre, e-skuterler kilometre başına yaklaşık 61-gram CO₂ salımı üretmektedir; ancak bu hesaplamaların dayandığı varsayımlar ayrıntılı olarak belirtmemektedir [32]. Hollingsworth et al. (2019), paylaşımlı sistemlerde toplama ve yeniden dağıtım süreçlerinin çevresel etkileri önemli ölçüde arttırdığını belirlemiştir [3]. Yapılan çalışmalarda enerji kaynaklarının karbon içeriği ve batarya ömrü gibi faktörlerin, sistemin toplam sera gazı salımlarını belirlemede kritik olduğu vurgulanmıştır [33]. Bunun yanında, üretim ve bakım aşamalarındaki salımlar dikkate alınarak yaşam döngüsüne bakıldığında, paylaşımlı mikromobilité çevre dostu bir ulaşım şekli olmayabilir [31]. Bu bağlamda, mikromobilité sistemlerine dair kamuoyundaki olumlu çevre algısının, kullanım şekilleri ve kent içi ulaşım alışkanlıkları göz önünde bulundurulduğunda, çoğu zaman abartılı veya yanlış yönlendirilmiş olduğu ifade edilmektedir. Dünder ve diğ. (2022) sunduğu paylaşımlı e-skuter sistemlerinin çevre dostu oldukları yönündeki algıya karşın, üretim, bakım, şarj ve dağıtım süreçlerinin ciddi çevresel etkiler barındırdığı; kullanımın ise yürüyüş ve bisiklet gibi daha çevreci ulaşım türlerinden kaymalarla gerçekleştiği ifade edilmektedir [34].

Alman Federal Çevre Ajansı, trafik davranışında bir değişiklik gözlemlenmediği ve e-skuter kullanımının çevre üzerinde oldukça olumsuz etkileri olduğu için e-skuterlerin çevre dostu bir seçenek olarak görmemektedir [36]. Olumsuz çevresel etkilerdeki azalmalar, değiştirilen ulaşım türleriyle yakından bağlantılı olduğundan, e-skuterlerin gerçek sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri üzerine yapılan araştırmaların sonuçları bu endişeleri desteklemektedir [37]. Zürih'te paylaşımlı e-skuter ve paylaşımlı e-bisikletlerin, yaşam döngüsü perspektifinden bakıldığında, yerini aldıkları ulaşım türlerinden daha fazla CO₂ salımı getirdiğini tespit etmiştir [38]. Brüksel'deki e-skuter sisteminin çevresel etkileri üzerine bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirmiştir. Diğer ulaşım türleriyle ikame edildiği düşünüldüğünde, paylaşımlı e-skuter kullanımı yolcu-kilometre başına

ortalama 21 g CO₂-eşd ek üretmiştir [39]. Benzer şekilde Paris'te e-skuterin sera gazı salımı etkisini ölçmek için yaşam döngüsü analizini kullanmıştır. Skuter yolculuklarının %82'sinin düşük salımlı ulaşım türleriyle (%60 toplu taşıma ve %22 yürüme) ikame edildiğini tespit etmişler ve 1 milyon e-skuter kullanıcısının yılda 13.000-ton ek CO₂ -eşd üretebileceğini tahmin etmişlerdir [40].

2.4 Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) ve Uygulama Alanları

Yaşam Döngüsü Analizi, bir ürünün hammadde temininden başlayarak üretim, kullanım ve ömür sonu süreçlerine kadar çevresel etkilerini sistematik bir şekilde değerlendiren bir yöntemdir [35, 36]. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına dayanan bu yöntem, ürünün “beşikten mezara” kadar olan çevresel etkilerini nicel olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır [3]. E-skuterler için yapılan LCA çalışmaları, üretimde kullanılan malzeme türleri, pil teknolojisi, enerji tüketimi ve kullanım ömrü gibi parametrelerin çevresel sonuçları üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır [3]. Üretim, ulaştırma, kullanım ve yaşam sonu aşamalarında yapılan incelemeler, geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamalarının çevresel performans üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Ancak, çoğu çalışma paylaşımlı mikromobilité araçlarının gerçek işletim koşullarını tam olarak dikkate almamaktadır [28,32]. Farklı bölgelerdeki insanlar mikromobilité araçlarını farklı amaçlar için kullanabilir ve mikromobilité araçlarının üzerinde seyahat ettiği ulaşım sistemlerinin yapıları keskin farklılıklar gösterebilir. Dolayısıyla, davranışsal tepkiler farklı büyükşehirlerde farklı olabilmektedir [18]. E-skuterlerin düşük bir oranı binek araçların yerini almak için kullanılmaktadır. Çoğu e-skuter kullanımı, karbon salımı yapan otomobiller yerine yürümek gibi sıfır salımlı seçeneklerin yerini almaktadır. E-skuterlerin kısa ömürlü olması, sık sık değiştirilmelerine ve çok sayıda üretilmelerine neden olmaktadır.

Bu nedenle, farklı coğrafi ve sosyal koşulların mikromobilité araçlarının kullanım amaçları ve ulaşım sistemlerine entegrasyonu üzerindeki etkisi önem taşımaktadır. E-skuterlerin üretimi ağırlıklı olarak Çin'de gerçekleşmekte ve buradan farklı ulaşım türleriyle dağıtılmaktadır [43]. Çin'de yapılan bir çalışmada, elektrikli iki tekerlekli araçların kişi başına kilometrede otomobil ve motosikletlere kıyasla çok daha düşük salımlar ürettiği gösterilmiştir [43]. Paris'te yapılan araştırmalar, dockless e-skuterlerin metro sistemine göre daha yüksek kişi-kilometre başına

salımlar oluşturabileceğini, ancak özel otomobil ve otobüse göre daha düşük salım ürettiklerini ortaya koymuştur [44]. Lima ve arkadaşlarının Peru'da yaptığı duyarlılık analizi, kullanım ömrü ve pil ömrü gibi parametrelerin çevresel etki üzerindeki değişkenliğini incelemiş ve elektrik üretim profilinin düşük karbonlu olması nedeniyle üretim aşamasının etkilerde baskın olduğunu ortaya koymuştur [45]. YDA, ulaşım sistemleri dahil olmak üzere çok sayıda alanda kullanılmaktadır [46]. E-skuterler özelinde yapılan YDA çalışmalarında; üretim, şarj, ulaşım ve geri dönüşüm aşamalarının etkileri ayrı ayrı incelenmekte, ayrıca farklı senaryolarla modelleme yapılmaktadır.

2.5 Monte Carlo Analizi ve Belirsizlik Yönetimi

Yaşam döngüsü analizlerinde (YDA), verilerin niteliği, modelleme yaklaşımları ve sistem sınırları gibi unsurlar belirli düzeylerde belirsizlik içerir. Bu belirsizliklerin yönetilmesi, inceleme sonuçlarının güvenilirliğini ve karar destek kapasitesini etkiler.

Monte Carlo yöntemi, girdi parametrelerinin olasılık dağılımları üzerinden rastgele örneklemeler yaparak çok sayıda senaryo oluşturur ve sistem çıktılarının dağılımsal özelliklerini belirler. Bu yöntem sayesinde, analizde kullanılan değişkenlerin kullanım ömrü, bakım sıklığı, ek batarya gerekliliği, araç + ambalaj ağırlığı, toplama ve dağıtım mesafesi, bir şarjla gidilen mesafe ve enerji tüketimi belirsizliğe katkısı sayısal olarak değerlendirilebilir [47].

Belirsizlik, genellikle üç ana başlık altında ele alınır: veri belirsizliği, model belirsizliği ve senaryo belirsizliği. Veri belirsizliği, ölçüm hataları, eksik veri veya uzman görüşüne dayalı varsayımlardan kaynaklanırken; model belirsizliği, kullanılan yazılım, etki kategorileri ve yöntem tercihlerle ilgilidir. Senaryo belirsizliği ise, sistem sınırlarının genişletilmesi ya da geleceğe dönük varsayımlarla ilişkilidir [48].

YDA uygulamalarında girdi verilerindeki belirsizlikler, sonuçların güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Bu nedenle Monte Carlo analizi, girdi değişkenlerinin istatistiksel dağılımları üzerinden çoklu benzetimler yaparak çıktıların istatistiksel dağılımını sunar [49]. Ulaşım alanındaki çalışmalar, bu incelemenin özellikle farklı senaryo ve parametre belirsizliklerinin etkilerini anlamak için etkili

olduğuna işaret etmektedir [50]. E-skuterlerin çevresel etkilerini tahmin ederken Monte Carlo analizinin yaygınlaşan bir yöntem olduğu belirtilmiştir [51]. Monte Carlo benzetimi ile belirsizlik analizleri 1000 yineleme kullanılarak oluşturulur.

Monte Carlo analizinde her bir parametreye uygun bir dağılım seçilir. Bu dağılımlar genellikle log-normal, normal, üçgen veya tekdüze (uniform) olabilir. Bir parametrenin doğası gereği negatif değeri alamaması durumunda log-normal dağılım tercih edilirken, en az–en çok–tahmini değeri şeklinde bilinen aralıklarda üçgen dağılım daha uygundur [52]. Böylece her yinelemede rastgele bir değeri seçilir ve sonuç çıktısı kaydedilir. Yeterli sayıda yineleme yapıldığında, sonuçların ortalaması, medyanı, güven aralıkları ve varyans gibi istatistiksel değeri elde edilebilir.

YDA uygulamalarında Monte Carlo analizi, aşağıdaki amaçlarla kullanılmaktadır:

- Çevresel etki kategorilerinde sonuçların güven aralıklarını belirlemek,
- Kritik parametrelerin etkisini analiz etmek (duyarlılık analiziyle birlikte),
- Karşılaştırmalı senaryolarda sonuçların istatistiksel farkını test etmek,
- Karar verme süreçlerinde risk temelli değerilendirmeler yapmak.

OpenLCA gibi yaşam döngüsü analiz yazılımları, gömülü Monte Carlo modülleri sayesinde kullanıcıların bu analizi parametrik olarak yapmasına imkân tanır. Kullanıcı, dağılımları ve yineleme sayısını belirledikten sonra her çevresel etki sınıfı için dağılımsal sonuçlara ulaşabilir. Bu özellik, özellikle ulaşım sistemleri gibi karmaşık ve çok bileşenli sistemlerin analizinde büyük avantaj sağlamaktadır [53].

Sonuç olarak, Monte Carlo analizi, YDA kapsamında belirsizliklerin modellenmesi ve sonuçların daha şeffaf sunulması açısından kritik bir araçtır. Özellikle farklı senaryo analizlerinde belirsizliğin etkisini ortaya koymak ve çevresel etkilerin hangi düzeyde değerişebileceğini göstermek için bu yöntem seçilmiştir.

3

E-SKUTER YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ YÖNTEMİ

Bu bölüm, İstanbul’da yaygın olarak kullanılan Hop ve Xiaomi M365 e-skuterler için yaşam döngüsü analizi süreçlerini anlatmaktadır. Çalışma, uluslararası kabul görmüş ISO 14040 ve ISO 14044 toleranslarına uygun olarak yaşam döngüsü analizi süreçlerini içerirken Ecoinvent 3.8 veri tabanını ve OpenLCA yazılımını kullanıldı. Analiz, e-skuterlerin üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu aşamalarını inceleyerek çevresel etki değerleri incenildi.

3.1 YDA Kavramı ve Standardizasyonu (ISO 14040 ve 14044)

Yaşam döngüsü analizi (YDA), hammadde çıkarımından sürdürülene kadar tüm aşamalarda bir ürün veya hizmetin büyümelerinin incelenmesini sağlar. Bu ürünün üretimden ömür sonuna kadar geçen tüm sürece beşikten mezara kavramı olarak değerlendirilebilir. Bu analiz, ürün davranışlarının salımlarını tespit etmek, bu salımların hangi verilerde oluşturduğunu belirlemek ve potansiyel kullanılabilir yerlerini göstermek için kullanılır.

ISO 14040 ve ISO 14044 standartları ile YDA süreci şu şekildedir:

- 1-Kapsamın ve amacın açıklanması,
- 2-Yaşam ayrıntıları envanter analizi,
- 3-Yaşam dağılımı etki değerlendirmesi (YDED) ve
- 4-Yorumlama [51].

Bu tezde, ilgili olarak uygun olarak listelenmiş ve sonuçların bir yaşam analizi aşaması için sonuçları verilmiştir. Bu sonuçları sistematik ve karşılaştırılabilir şekilde yapılabilmesi için çeşitli özel yazılımlar geliştirilmiştir. En yaygın olarak

kullanılan SimaPro, Gabi, Umberto ve OpenLCA yazılım programlarıdır. Burada yazılım programlarına bakıldığında SimaPro kullanıcı dostu arayüzü, güçlü modelleme yetenekleri ve çok sayıda etki değerlendirme yöntemi ile öne çıkar [54]. Ancak lisans ücretleri oldukça yüksektir. İkincisi Gabi program özellikle endüstriyel uygulamalarda tercih edilir ve geniş bir veri tabanı sunar [53]. Ancak ticari bir yazılım olduğu için kullanım maliyetleri yüksektir. Umberto yazılımı özellikle enerji akışları ve madde döngüleri üzerine detaylı incelemeler yapılmasına imkân tanır [4]. OpenLCA program ise açık kaynak kodlu, ücretsiz bir YDA yazılımıdır. Geniş modelleme imkânları, uluslararası veri tabanına olan Ecoinvent entegre ve Monte Carlo belirsizlik analiz yapabilme yeteneğine sahiptir [55]. Bu nedenle tez kapsamında OpenLCA yazılım program tercih edilmiştir.

3.2 OpenLCA ve Ecoinvent Veri Tabanı

Çalışmada yaşam döngüsü analizi için açık kaynaklı bir yazılım olan OpenLCA yazılımı kullanılmıştır. OpenLCA, ISO 14040 ve ISO 14044'ün uygun donanımını yapabilme olanağı sağlayan incelemeler ve geniş veri tabanı desteği sayesinde çeşitli geniş kapsamlı analizler yapılabilmektedir [47].

Veri tabanı olarak Ecoinvent 3.8 kullanılmıştır. Ecoinvent, farklı sektörleri kapsayan süreç bazlı veri paketleri sunmakta olup, bu etkili kullanılan ürünlerin üretim envanter verileri, ulaşım, kullanım ve ömür sonuçları takibi veri veri tabanı içerisinde seçilmiştir. Enerji karışımı, elektrik üretimi ve taşıma gibi çözümler Ecoinvent içindekilerin konumlarına göre özelleştirilmiştir.

3.3 Çalışmada Kullanılan E-Skuter Modelleri

Bu çalışmada inceleme yapılan iki e-skuter modeli, İstanbul'da yaygın şekilde kullanılan Hop markasına ait paylaşımlı sistem modeli ve Xiaomi M365 modelidir. Her iki modelin teknik özellikleri ve envanter verileri aşağıda sunulmuştur.

3.3.1 Hop Modeli Teknik Özellikleri ve Envanter Verileri

Hop modeli, İstanbul'da kurumsal bir mikromobilité hizmet sağlayıcılar tarafından kullanılan ve paylaşımlı bir sistem kapsamında işletilen bir e-skuter

modelidir. Modelin toplam ağırlığı 31 kilogramdır, 768 Wh kapasiteli lityum iyon batarya içermektedir (Tablo 3.1). Ortalama kullanım ömrü 3 yıl ve 10285 km olarak alınmıştır. Hop firması tarafından sağlanan belirli teknik dokümantasyonlar, saha gözlemleri ve ilgili literatür çalışmaları, Hop envanter verilerini oluşturmaya yardımcı oldu. Ayrıca toplama ve dağıtım mesafeleri, günlük operasyonel veriler doğrultusunda modele entegre edilmiştir.

Hop e-skuterin üretim verileri ve batarya ağırlığını Hollingsworth ve diğ. (2019) tarafından ortaya konulan envantere dayanmaktadır [3]. Lakin Hop e-skuter daha ağır bir e-skuter olduğu için envanter verileri literatürde yapılan çalışmaları da dikkate alarak üretim envanterleri oluşturulmuştur (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Hop malzeme ve üretim envanterleri

Malzeme ve Üretim İçin E-skuter Yaşam Döngüsü Envanteri (Hop)			
Skuter Üretimine Akış	Akış özelliği	Birim	Miktar
Alüminyum alaşım, AlMg32	Kütle	Kg	22,547
Alüminyum, döküm alaşım2	Kütle	Kg	0,512
Pil hücresi, üretildi	Kütle	Kg	1,615
Şarj cihazı, elektrik için skuter	Kütle	Kg	0,385
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	Kütle	Kg	2,43
Elektrik, orta gerilim, şebekede	Enerji	KWh	17,087
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Enerji	MJ	33,7
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Enerji	MJ	0,478
Işık yayan diyot	Kütle	Kg	0,016
Polikarbonat	Kütle	Kg	0,266
Polikarbonat	Kütle	Kg	0,008
Toz boya, alüminyum levha	Alan	m2	0,35
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	Kütle	Kg	0,059
Çelik, düşük alaşımlı	Kütle	Kg	2,6
Sentetik kauçuk	Kütle	Kg	1,185
Musluk suyu	Kütle	Kg	0,744
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	Kütle	Kg	0,062
Kaynak, ark, alüminyum	Uzunluk	M	0,75

Tablo 3.2 Hop batarya ağırlığı

E-skuter	HOP
Toplam ağırlık (kg)	1,615
Anot	0,63
Katot	0,694
Ayırıcı	0,0355
Elektrolit	0,258
Hücre kabı	0,0108
Elektrik (kwh)	45,22
Karbon içermeyen su (kg)	613,7

Tablo 3.3 Hop batarya teknik özelliği

Hop Bataryası
Model: 48V16Ah
DC input: 54.6V 5 A
Nominal capacity: 768Wh
Rated capacity: 15Ah

Bir e-skuterin tam şarj ile kat edebileceği mesafe, pil kapasitesi ile ortalama enerji tüketimi arasındaki orana bağlı olarak Denklem (1.1) ile ifade edilmektedir:

$$D_c = \frac{C_{pil}}{d_{gg}} \quad (1.1)$$

Burada:

D_c : Bir şarjla kat edilen mesafe (km),

C_{pil} : Toplam pil kapasitesi (Wh),

d_{gg} : Pil getir-götür işlemi için ortalama tüketim değeri (Wh/km)

Çalışmada kullanılan Hop e-skuter modelinin teknik verilerine göre pil kapasitesi $C_{pil}=768$ Wh ve ortalama tüketim değeri $d_{gg} = 10$ Wh/km olarak alınmıştır. Bu değerler formülde yerine konulduğunda:

$$D_c = \frac{768}{10} = 77 \text{ km}$$

Dolayısıyla, söz konusu e-skuter modeli tam şarj ile 77 km mesafe katedebilmektedir. Hop marka e-skuter ambalaj ağırlığı 4 kg almıştır [3].

Bir e-skuterin bakım periyodu, toplam kullanım ömrünün belirli zaman aralıklarında yapılan bakımlara bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu ilişki, denklem (1.2) ile ifade edilmektedir:

$$E_b = \frac{L}{Y \times A \times r} \quad (1.2)$$

Burada:

E_b : Bakım periyodu (her bakım arasında kat edilen mesafe) (km),

L : Toplam kullanım ömrü (km),

Y : Kullanım süresi (yıl),

A : Yıldaki ay sayısı (12 ay/yıl),

r : Aylık bakım sıklığı (bakım/ay).

Hop e-skuter modelinin toplam kullanım ömrü $L=10285$ km, kullanım süresi $Y=3,5$ yıl, yıldaki ay sayısı $A=12$ ay/yıl ve aylık bakım sıklığı $r=0,7$ bakım/ay olarak alınmıştır. Bu değerler Denklem (1.2)'de yerine konulduğunda:

$$E_b = \frac{10285}{12 \times 3,5 \times 0,7} = 407 \text{ km} \quad (1.2)$$

Sonuç olarak, söz konusu e-skuter modeli yaklaşık her 407 km'de bir bakıma ihtiyaç duymaktadır.

3.3.2 Xiaomi M365 Teknik Özellikleri ve Envanter Verileri

Xiaomi M365 modeli, İstanbul'da kurumsal mikromobilité hizmet sağlayıcılar tarafından kullanılan ve paylaşımlı bir sistem kapsamında işletilen bir e-skuter modelidir. Modelin toplam ağırlığı 12,5 kilogramdır. 551 Wsa kapasiteli lityum iyon batarya içermektedir. Ortalama kullanım ömrü 2 yıl ve 7500 km olarak Kabul edilmiştir. Xiaomi M365 saha gözlemleri ve ilgili literatür çalışmaları, Xiaomi M365 envanter verilerini oluşturmaya yardımcı olmuştur. Ayrıca toplama ve dağıtım mesafeleri, günlük operasyonel veriler doğrultusunda modele entegre edilmiştir.

Hop e-skuterin üretim verileri ve batarya ağırlığını Hollingsworth ve diğ. (2019) tarafından ortaya konulan envantere dayanmaktadır (Tablo 3.4) [3].

Tablo 3.4 Xiaomi M365 malzeme ve üretim envanterleri

Malzeme ve Üretim İçin E-skuter Yaşam Döngüsü Envanteri (Xiaomi M365)			
Skuter Üretimine Akış	Akış özelliği	Birim	Miktar
Alüminyum alaşım, AlMg32	Kütle	Kg	5,731
Alüminyum, döküm alaşım2	Kütle	Kg	0,256
Pil hücresi, üretildi	Kütle	Kg	1,159
Şarj cihazı, elektrik için skuter	Kütle	Kg	0,385
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	Kütle	Kg	2,43
Elektrik, orta gerilim, şebekede	Enerji	KWh	6,89
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Enerji	MJ	13,6
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Enerji	MJ	0,193
Işık yayan diyot	Kütle	Kg	0,016
Polikarbonat	Kütle	Kg	0,266
Polikarbonat	Kütle	Kg	0,008
Toz boya, alüminyum levha	Alan	m2	0,35
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	Kütle	Kg	0,059
Çelik, düşük alaşımlı	Kütle	Kg	1,349
Sentetik kauçuk	Kütle	Kg	1,185
Musluk suyu	Kütle	Kg	0,744
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	Kütle	Kg	0,062
Kaynak, ark, alüminyum	Uzunluk	M	0,75

Tablo 3.5 Xiaomi M365 batarya ağırlığı

E-skuter	Xiaomi M365
Toplam ağırlık (kg)	1,159
Anot	0,452
Katot	0,498
Ayırıcı	0,0254
Elektrolit	0,185
Hücre kabı	0,00776
Elektrik (kWh)	32,5
Karbon içermeyen su (kg)	440,42

Tablo 3.6 Xiaomi M365 batarya teknik özelliği

Xiaomi M365
Model: SNSC2.3
Power:350W
DC input:42V 50 A
Nominal capacity:551Wh

Çalışmada kullanılan Xiaomi e-skuter modelinin teknik verilerine göre pil kapasitesi $C_{pil}=551$ Wh ve ortalama tüketim değeri $d_{gg} = 10$ Wh/km olarak alınmıştır. Bu değerler denklem 1.1’de yerine konulduğunda:

$$D_c = \frac{551}{10} = 55 \text{ km}$$

elde edilir. Yani, söz konusu e-skuter modeli tam şarj ile 55 km mesafe katedebilmektedir. Bir e-skuter ambalaj ağırlığı 4 kg almıştır [3].

Yukarıdaki Hop e-skuter için yapılan hesaplar benzer şekilde Xiaomi modeli için aşağıdaki şekilde yapılabilir. Buna göre, Xiaomi e-skuterin toplam kullanım ömrü $L=7.500$ km, kullanım süresi $Y=2,50$ yıl, yıldaki ay sayısı $A=12$ ay/yıl ve aylık bakım sıklığı $r=0,7$ bakım/ay olarak alındığında, bu değerler denklem 1.2’de yerine konulduğunda:

$$E_b = \frac{7.500}{12 \times 3,5 \times 0,7} = 446 \text{ km} \quad (1.2)$$

Elde edilir. Bu da, Xiaomi e-skuter modelinin yaklaşık her 446 km’de bir bakıma ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

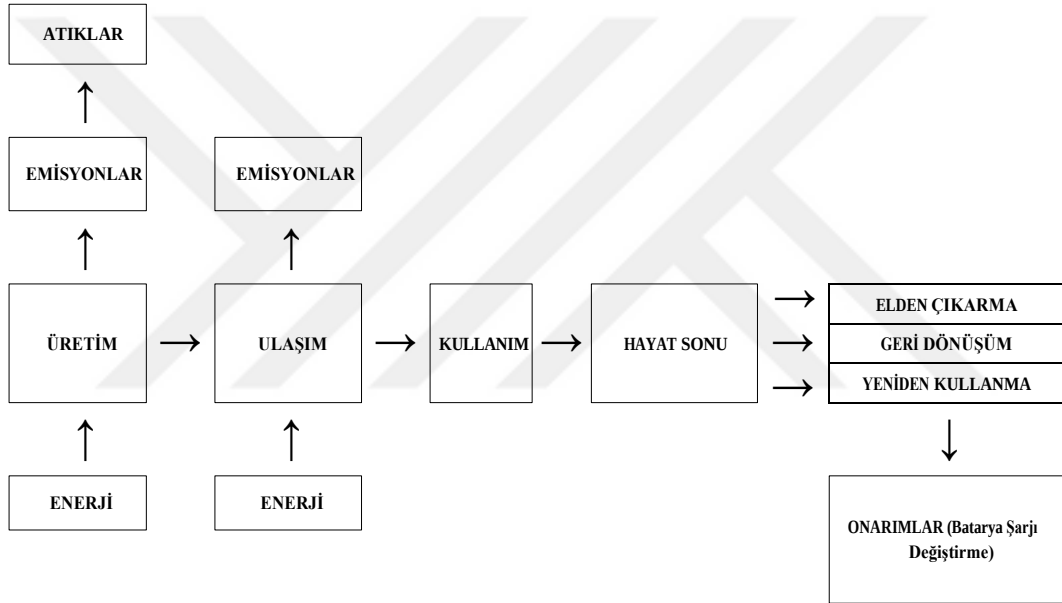
3.4 Sistem Sınırları ve Fonksiyonel Birim

Analizde “beşikten mezara” yaklaşımı benimsenmiş ve ürünlerin tüm yaşam döngüsü süreçleri modele dahil edilmiştir. Sistem sınırları; hammadde çıkarımı,

üretim, uluslararası ulaşım, kullanım süreci (şarj, bakım, dağıtım) ve ömür sonu bertaraf işlemlerini kapsamaktadır (Şekil 3.1).

Fonksiyonel birim olarak, literatürle uyumlu şekilde “bir e-skuterin 1 km’lik yolculuğu” seçilmiştir [4]. Bu sayede farklı modellerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak adına çevresel etkilerin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Ecoivent veri tabanından e-skuter bakım modelini oluşturmak için veri tabanında bulunan e-skuter modelinin ağırlığı 144 kg’dır [56]. Bu nedenle aynı veri tabanında bulunan 24 kg olan e-bisiklet verilerinin iki e-skuter için de (Hop ve Xiaomi M365) daha yakın bir değerde olduğu için e-bisiklet bakım verilerini referans alınmıştır [57].



Şekil 3.1 E-skuter yaşam döngüsü diyagramı

3.5 Yaşam Döngüsü Aşamalarının Tanımı ve Modelleme

Yaklaşımı

Her bir e-skuter için çalışmada yaşam döngüsü aşamasını dört temel aşaması olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Bunlar üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu aşamalarıdır.

3.5.1 Üretim Aşaması

Hammadde çıkarımından başlayarak, parçaların üretimi ve son ürünün montajına kadar olan tüm süreçler; Hollingsworth ve diğerleri (2019) tarafından sunulan envanter verileri temel alınarak, Ecoinvent 3.8 veri tabanındaki süreçler aracılığıyla modellenmiştir [3].

Bu aşamada e-skuterin şasi, batarya, elektronik bileşenler ve lastik gibi parçaları dikkate alınmıştır. Alüminyum ve lityum-iyon batarya üretimi, çevresel etkileri yüksek bileşenler olarak öne çıkmıştır.

Bir e-skuter alüminyum alaşım, lityum iyon (NMC111) pil, şarj cihazı, elektrik motoru, LED, polikarbonat, plastikler, toz boya, baskılı kablolama panosu, çelik, sentetik kauçuktan oluşur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 E-skuter üretim malzemeleri [58]

3.5.2 Ulaşım Aşaması

E-skuterlerin Çin’de üretimi yapılır. Çin’de üretilen Hop ve Xiaomi M365 e-skuterlerin kara, hava ve deniz yolculuğu ile ülkelere ulaşımı gerçekleştirilir. Xiaomi M365 ve Hop e-skuterler için ulaşım süreci, Çin’deki fabrikadan limana kadar 1100 km’lik karayolu taşımacılığı ve ardından Çin limanından İstanbul limanına kadar 15.616 km’lik denizyolu taşımacılığı şeklinde modellenmiştir. Bu

kapsamda Hop firmasından edinen bilgilere dayanarak deniz taşımacılığı (15.616 km) ve kara taşımacılığı (1.100 km) mesafeleri dikkate alınmıştır. Karbon salımlarının taşımacılık tipi ve mesafeye göre değiştiği göz önünde bulundurularak modelleme yapılmıştır.

3.5.3 Kullanım Aşaması

Kullanım aşaması, e-skuterin şarj edilmesi, bakımı ve paylaşımlı sistemlerdeki toplama ve yeniden dağıtım süreçlerini kapsamaktadır. Her iki e-skuter için İstanbul'da elektrik şebekesi kullanılarak şarj edilen cihazlar için ortalama şebeke salım faktörü temel alınmıştır. Ayrıca bakım periyodu Hop e-skuter için 407 km bir bakım ve pil getir götür mesafesi 10 km/gün, e-skuter motor zahmet oranı 0,1, ek batarya çarpanı 0,25 ve bir şarj başına gidilen mesafe 77 km olarak operasyonel girdiler modele bütünleştirilmiştir (Tablo 3.7). Xiaomi e-skuter için de 446 km bir bakım ve pil getir götür mesafesi 10 km/gün, e-skuter motor zahmet oranı 0,1, ek batarya çarpanı 0,34 ve bir şarj başına gidilen mesafe 55 km olarak operasyonel girdiler modele entegre edilmiştir (Tablo 3.8).

3.5.4 Ömür Sonu Aşaması

Kullanım ömrü sonuna gelmiş e-skuter parçalarının kullanılabilir durumda olan parçaların yeniden kullanma, kullanılamayacak durumda olan parçaların elden çıkarma ve geri dönüşüm sağlanabilecek parçaların ise geri dönüşüm sürecini içeren bu aşamada, atık sınıfına girdiği varsayılmıştır. Atık yönetimi süreçleri, Ecoinvent içindeki veri tabanından manuel olarak söküm süreci kabul edilmiştir.

Tablo 3.7 Hop e-skuter ulaşım-kullanım-ömür sonu parametreleri

Giriş parametreleri	Hop
İsim	Değer
Bakım (km)	407
e-skuter motor zahmet oranı	0,1
Ek batarya çarpanı	0,25
Gemi mesafesi	15616
Kamyon mesafesi	1100
Kullanım ömrü	10285
Kutu ağırlığı (kg)	35
Pil getir götür mesafesi (km)	10
Bir şarj başı gidilen mesafe (km)	77

Tablo 3.8 Xiaomi M365 e-skuter ulaşım-kullanım-ömür sonu parametreleri

Giriş parametreleri	Xiaomi M365
İsim	Değer
Bakım (km)	446
e-skuter motor zahmet oranı	0,1
Ek batarya çarpanı	0,34
Gemi mesafesi	15616
Kamyon mesafesi	1100
Kullanım ömrü	7500
Kutu ağırlığı (kg)	16,5
Pil getir götür mesafesi (km)	10
Bir şarj başı gidilen mesafe (km)	55

E-SKUTERLER İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR YDA SENARYOLARI VE MONTE CARLO ANALİZİ

4.1 Alternatif Senaryo Tanımları

Bu çalışma kapsamında, İstanbul’da yaygın olarak kullanılan e-skuterlerin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik beş seçenek senaryo tanımlanmıştır. Her bir senaryo, belirli bir değişkenlerin değiştirilmesi ile sistemin sürdürülebilirliği sağlanmış ve etkisini incelemeye yönelik senaryolar oluşturulmuştur.

4.1.1 İstanbul’da E-skuter Üretilmesi Durumu

Bu senaryoda, Hop ve Xiaomi M365 e-skuterlerin üretiminin İstanbul’da yapıldığı varsayılmış ve ithal edilen modellere kıyasla taşımacılıktan kaynaklanan gemi yolculuğu mesafesi sıfır alınmıştır. Özellikle Çin’den gelen gemi taşımacılığı yerine yerel üretim kaynaklı salımlar dikkate alınmıştır.

4.1.2 İstanbul’daki Fabrikada PV Kullanılması Durumu

Bu durumda üretim tesislerinde tüketilen elektriğin tamamının güneş enerjisinden sağlandığı varsayılmıştır. İstanbul’un güneş potansiyeli dikkate alınarak üretim aşamasındaki karbon ayak izi önemi değerlendirilmiştir.

4.1.3 E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu

E-skuter istasyonlarında PV kullanılması kullanım aşamasında şarj işlemlerinin tamamı, fotovoltaik (PV) sistemlerden sağlanan elektrikle yapılmıştır. Bu senaryoda şehir şebekesi yerine yenilenebilir enerji kullanımı tercih edilerek salım yükleri azaltılmıştır.

4.1.4 E-skutere Süspansiyon Eklenmesi

Yeni nesil süspansiyon sistemine sahip e-skuter modelinde hem üretim aşamasında artan materyal ihtiyacı hem de ağırlık değişimi inceleme yapılmıştır.

Bu eklemenin konforu artırarak aracı daha uzun süre kullanılabilir hale getirebileceği de göz önünde bulundurulmuştur.

4.1.5 E-skutere PV Eklenilmesi

Bu senaryoda e-skuter gövdesine entegre edilen küçük ölçekli fotovoltaik panel sayesinde, kullanım süresince belirli oranlarda kendi kendini gün içerisinde şarj edebilme potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu panel her iki e-skuter için üretim envanter üzerine 0,4 m² fotovoltaik laminat eklenmiştir (Şekil 4.1). Bu teknoloji sayesinde enerji ihtiyacının bir kısmı aracın kendisi tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 4.1 Fotovoltaik laminat malzemesi [59]

4.2 Parametre Seçimi ve Belirsizlik Analizi

Yaşam döngüsü analizinde kullanılan girdilerdeki belirsizlikler, sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Bu kapsamda Xiaomi M365 e-skutere, çevresel etki hesaplamaları için hassasiyeti yüksek olan yedi temel parametre belirlenmiş ve her biri için dağılım türü ve aralıkları tanımlanmıştır. Bu parametreler; bakım sıklığı, ek batarya gerekliliği, kullanım ömrü, araç + ambalaj ağırlığı, toplama ve dağıtım mesafesi, bir şarjla gidilen mesafe ve enerji tüketimidir (Tablo 4.1).

4.3 Monte Carlo Benzetim Yöntemi

Bu çalışmada, yaşam döngüsü analizine ilişkin belirsizliklerin sistematik biçimde değerlendirilmesi amacıyla Monte Carlo benzetimi uygulanmıştır. YDA sonuçları

üzerinde önemli etkisi olabilecek parametrelerin değişkenliği, doğrudan çevresel etkilere yansıdığı için, bu belirsizliklerin istatistiksel yöntemlerle ele alınması büyük önem taşımaktadır. Monte Carlo yöntemi, her bir parametre için tanımlanan olasılık dağılımlarına göre çok sayıda rastgele değer üretmekte ve bu değerler üzerinden tekrar tekrar hesaplama yaparak sonuçların istatistiksel dağılımını ortaya koymaktadır [60].

Bu kapsamda, OpenLCA yazılımı aracılığıyla her bir parametre için belirlenen dağılımlar doğrultusunda 1000 iterasyonluk bir benzetim gerçekleştirilmiştir [55]. Benzetimde kullanılan parametreler, e-skuter sisteminin çevresel etkilerini doğrudan etkileyebilecek kritik değişkenler olarak seçilmiştir (Tablo 4.1). Bunlar arasında bakım sıklığı, ek batarya gerekliliği, kullanım ömrü, araç ve ambalaj ağırlığı, toplama-dağıtım mesafesi, bir şarjla gidilebilen mesafe ve enerji tüketimi gibi unsurlar yer almaktadır.

Temel model olarak, dünya genelinde daha yaygın kullanımı nedeniyle Xiaomi M365 e-skuter modeli esas alınmıştır. Hop e-skuter ise yalnızca senaryo analizlerinde seçenek bir model olarak değerlendirilmiştir. Bu tercih, benzetimin genellenebilirliğini ve sonuçların diğer benzer modellerle karşılaştırılabilirliğini artırmak amacıyla yapılmıştır.

Tablo 4.1 Monte Carlo belirsizlik analizi aralıkları

Parametre	Değer / Aralık	Dağılım Türü	Dağılım Parametreleri
Bakım Sıklığı (km)	200 – 600	Log-normal	Ortalama = 407, Std Sapma = 1,4
Ek Batarya Gerekliliği (çarpan)	0.25 – 0.55	Log-normal	Medyan=0,34, Ortalama=-1,0788, Std Sapma =0,2405
Kullanım Ömrü (km)	4.000 – 12.000	Üçgen	Min = 4.000, Mod = 7.500, Maks = 12.000
Araç + Ambalaj Ağırlığı (kg)	16,5 – 35	Üçgen	Min = 16,5, Mod = 18, Maks = 35
Toplama ve Dağıtım Mesafesi (km/gün/araç)	5 – 25	Üçgen	Min = 5, Mod = 10, Maks = 25
Bir Şarjla Gidilen Mesafe (km)	45 – 100	Üçgen	Min = 45, Mod = 55, Maks = 100
Enerji Tüketimi (Wh/km)	10 – 15	Log-normal	Ortalama = 12,5, Std Sapma = 1,5

Tablo 4.1'e göre, bazı parametreler için üçgen dağılım tercih edilirken, bazıları için daha asimetrik ve gerçek hayata daha uygun olduğu düşünülen log-normal dağılım (denklem 1.3) kullanılmıştır.

Lognormal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) > 0 \quad (1.3)$$

Burada x rastgele değişkendir, μ ve σ ise $\ln(x)$ dağılımının medyanı ve standart sapmasıdır. x 'in medyanı ve standart sapması, μ^* ve σ^* olarak gösterilir ve aşağıdaki şekilde (denklem 1.4 ve 1.5) elde edilebilir:

x : Rastgele değişken

μ (mu): Logaritması alınmış verinin ortalaması olmak üzere

$$\mu^* = \exp(\mu) \quad (1.4)$$

σ (sigma): Logaritması alınmış verinin standart sapması olmak üzere,

$$\sigma^* = \exp(\sigma) \quad (1.5)$$

Lognormal dağılımda, medyan geometrik ortalama karşılık gelir ve $\exp(\mu)$ noktasında bulunur. Aritmetik ortalama, geometrik ortalamadan biraz daha yüksek, $\exp(\mu + \sigma^2/2)$ noktasında bulunur. Mod, daha düşük bir değer olan $\exp(\mu - \sigma^2)$ noktasında bulunur. Standart sapma ne kadar büyükse, çarpıklık o kadar büyük olur ve bu üç nicelik arasındaki mesafe de o kadar artmaktadır [60].

Üçgen dağılımda (denklem 1.6) ise bir parametre için en küçük (*min*), en olası (*mod*) ve en büyük (*maks*) değerlerin bilindiği durumlarda kullanılır.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-\min)}{(maks-\min)(\text{mod}-\min)} & \min \leq x < \text{mod} \\ \frac{2(maks-x)}{(maks-\min)(maks-\text{mod})} & \text{mod} \leq x \leq maks \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (1.6)$$

OpenLCA, kullanıcının girdiği *min*, *mod* ve *maks* değerlerini kullanarak, bu dağılımdan rastgele sayılar üretir. Burada x rastgele değişkendir.

4.3.1 Bakım Sıklığı

E-skuterlerin kullanım ömürleri boyunca düzenli bakım gerektirmesi, çevresel etkiler üzerinde doğrudan etkilidir. Bakım sıklığı, özellikle parça değişimi ve iş gücü kaynaklı çevresel yükleri artırabileceğinden önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Literatürde yer alan saha verilerine göre bu değer 200 km ile 600 km arasında değişmektedir [56]. Parametre için log-normal dağılım tercih edilmiştir; çünkü bakım sıklığı nadiren simetrik dağılır ve aşırı yüksek değerler daha düşük olasılıkla gözlemlenir.

Dağılım parametreleri: Geometrik ortalama (Gmean): 407 km, geometrik standart sapma (GSD): 1,4 km.

4.3.2 Ek Batarya Gerekliliği

Bazı paylaşımlı e-skuter sistemlerinde pil değişimi veya batarya takviyesi gerekebilmektedir. Bu durum, kullanım aşamasında enerji tüketimini ve karbon ayak izini artıran bir etkidir. Parametre için 0,25–0,55 aralığı belirlenmiştir. Log-normal dağılım, çarpan türündeki verilerin negatif olamayan ve sağa çarpık olduğu için uygun görülmüştür [3]. Dağılım parametreleri: Medyan: 0,34, log-ortalama (μ): -1,0788, log-standart sapma (σ): 0,2405.

4.3.3 Kullanım Ömrü

Bir e-skuterin toplam kaç kilometre kullanılabildiği, ürün başına düşen çevresel etkileri doğrudan belirlemektedir. Uzun ömürlü skuterlerin çevresel etkileri daha düşük olmaktadır [62], [64]. Literatürde kullanım ömrü 4.000 km ile 12.000 km arasında değişmektedir. Parametrenin en olası değeri 7.500 km olarak belirlenmiş ve üçgen dağılım tercih edilmiştir. Bu dağılım, sınırlı ancak güvenilir veri bulunduğu yaygın olarak kullanılır. Dağılım parametreleri: *min*: 4.000 km; *mod*: 7.500 km; *maks*: 12.000 km.

4.3.4 Araç + Ambalaj Ağırlığı

Üretim aşamasında çevresel etkilere neden olan önemli unsurlardan biri de aracın ve ambalajının toplam ağırlığıdır. Özellikle malzeme tüketimi ve taşımada enerji ihtiyacını etkileyen bu parametre için değerler 16,5 kg ile 35 kg arasında

değişmektedir. Gerçek üretim verilerine dayanılarak en olası ağırlık 18 kg olarak belirlenmiş ve üçgen dağılım kullanılmıştır [3], [65].

4.3.5 Toplama ve Dağıtım Mesafesi

Paylaşımlı e-skuter sistemlerinde, araçların şarj noktalarına taşınması için yapılan günlük toplama ve dağıtım faaliyetleri salım değerleri çevresel etkiyi artırmaktadır. Literatür verileri de incelenerek 5,0 km ile 25,0 km arasında aralık belirlenmiştir. Genel olarak literatürde ortalama değer 10,0 km kabul edildiği için üçgen dağılım tercih edilmiştir [3], [39].

4.3.6 Bir Şarjla Gidilen Mesafe

E-skuterin tek bir tam şarjla gidebildiği mesafe, kullanım aşamasındaki enerji verimliliği açısından kritik bir parametredir. Değerler 45,0 km ile 100,0 km arasında değişmekte olup, Xiaomi M365 bir şarjla gidilen mesafe 55,0 km'dir. Literatüre bakıldığında da aynı zamanda genel olarak 55,0 km alındığı için ortalama değer 55,0 km olarak belirlenmiştir. Belirsizlik modellemesinde üçgen dağılım tercih edilmiştir [63].

4.3.7 Enerji Tüketimi

E-skuterin bir kilometrede tükettiği elektrik enerjisi, kullanım aşamasının çevresel etkilerinde doğrudan belirleyicidir. Bu parametre için 10–15 Wh/km aralığı belirlendi ve ortalama tüketim değeri 12,5 Wh/km olarak alınmıştır. Enerji tüketimi verileri doğası gereği negatif olmayan ve sağa çarpık dağılım gösterdiğinden, bu parametre için log-normal dağılım uygun görülmüştür [64], [66].

Bu bölümde, çalışmada incelenen Hop ve Xiaomi M365 e-skuter modellerine ilişkin yaşam döngüsü analizinden elde edilen bulgular sunulmaktadır. İlk olarak, üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu olmak üzere dört ana yaşam döngüsü aşaması temel duruma göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

İkinci olarak, çevresel etkileri azaltmaya yönelik geliştirilen yedi farklı senaryo üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu senaryolar, yerli üretim, fotovoltaik sistem entegrasyonu ve yapısal iyileştirmeler gibi sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımları içermektedir.

Son olarak, modelleme sırasında kullanılan belirsiz parametrelerin sonuçlara etkisi Monte Carlo analiziyle incelenmiş ve varyasyonlar istatistiksel olarak yorumlanmıştır. Bu kapsamda, bakım sıklığı, batarya gerekliliği, kullanım ömrü gibi yedi temel parametreye ait dağılımlar dikkate alınarak 1.000 iterasyonla benzetim gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, bu kapsamda elde edilen bulgular detaylı biçimde sunulmaktadır.

5.1 Yaşam Döngüsü Analizi

Bu bölümde, çalışma kapsamında değerlendirilen Xiaomi M365 ve Hop marka e-skuterlerin yaşam döngüsü boyunca oluşturdıkları çevresel etkiler dört temel aşama altında inceleme yapılmıştır: Üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu. Her aşamada ortaya çıkan karbon ayak izi (kg CO₂-eşd), enerji tüketimi, geri dönüşüm potansiyeli gibi çevresel yükler, OpenLCA 3.8 yazılımı ve Ecoinvent 3.8 veri tabanı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Xiaomi M365 için 7.500 km ve Hop markası için 10.285 km'lik varsayılan kullanım ömrü temel alınmıştır.

5.1.1 Üretim Aşaması Analizi

Yaşam döngüsü analizinde ilk aşama olan üretim süreci, e-skuterlerin çevresel etkilerinde önemli bir paya sahiptir. Hop ve Xiaomi M365 modellerinin üretim aşamaları karşılaştırıldığında, Hop modelinin toplam 257,971 kg CO₂-eşd salım

ürettiği, Xiaomi M365 modelinin ise 120,659 kg CO₂ eşdeğeri salıma neden olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5.1, Tablo 5.3).

Hop e-skuter modelinde en büyük çevresel etki 158,631 kg CO₂-eşd ile alüminyum alaşımı (AlMg3) kullanımından kaynaklanmaktadır (Tablo 5.1). Bu sonucu 25,896 kg CO₂-eşd ile pil hücresi üretimi ve 20,495 kg CO₂-eşd ile elektrik motoru takip etmektedir (Tablo 5.1). Ayrıca şarj cihazı üretimi 9,279 kg CO₂-eşd, transistör ve kablolama montajı 9,817 kg CO₂-eşd ve orta gerilim elektrik kullanımı 15,653 kg CO₂-eşd da dikkate değer salım üretilmiştir (Tablo 5.1).

Xiaomi M365 modelinde ise en yüksek salım yine alüminyum alaşımından kaynaklanmakta olup bu değer 40,3208 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.3). Hop modeline kıyasla daha hafif olması nedeniyle bu değer daha düşüktür. Pil hücresi üretimi ise 18,5842 kg CO₂-eşd ile ikinci sıradadır (Tablo 5.3). Diğer önemli katkılar arasında elektrik motoru 20,4946 kg CO₂-eşd ve baskılı kablolama panosu üretimi 3,9518 kg CO₂-eşd yer almaktadır (Tablo 5.3).

Her iki modelde de en yüksek salımın alüminyum ve pil hücresi üretiminden kaynaklandığı görülmektedir. Ancak Hop modelinin toplam ağırlığının (31 kg) Xiaomi M365 modelinden (12,5 kg) daha fazla olması, üretim sürecindeki sera gazı salımlarını neredeyse iki katına çıkarmaktadır (Tablo 5.1, Tablo 5.3). Bu da ağırlığın çevresel etki üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 5.1 Hop e-skuter temel durumda malzeme ve üretim envanter sonuçları

Envanterler	Konum	Küresel Isınma (kg CO ₂ -eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RoW	158,631
Pil hücresi, üretildi	CN	25,896
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,279
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,495
Işık yayan diyot	GLO	3,729
Elektrik, orta gerilim, şebekede	CN-SGCC	15,653
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	RoW	1,162

Tablo 5.1 Hop e-skuter temel durumda malzeme ve üretim envanter sonuçları
(devamı)

Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	RoW	0,050
Polikarbonat	GLO	1,775
Toz boya, alüminyum levha	GLO	0,993
Sentetik kauçuk	GLO	2,955
Musluk suyu	RoW	0,001
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,817
Kaynak, ark, alüminyum	GLO	0,213
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,952
Çelik, düşük alaşımlı	RoW	3,088
Alüminyum, döküm alaşım2	RoW	0,282
Toplam		257,971

Tablo 5. 2 Hop e-skuter temel durumda üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (Üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,737
Fosil kaynak kirliliği [56]	kg oil-eşd	69,023
Tatlı su ekotoksitesi [56]	kg 1,4-DCB	116,132
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,138
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	257,971
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5129,524
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	179465,974
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	27,783
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,749
Deniz ekotoksitesi [56]	kg 1,4-DCB	240285,357
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,044
Mineral kaynak kirliliği [56]	kg Cu-eşd	9,179
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,778
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,798
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,000
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,551
Karasal ekotoksite [56]	kg 1,4-DCB	4459,844
Su tüketimi [56]	m ³	4,379

Tablo 5.3 Xiaomi M365 e-skuter temel durumda malzeme ve üretim envanter sonuçları

Envanterler	Konum	Küresel Isınma (kg CO ₂ -eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RoW	40,3208
Pil hücresi, üretildi	CN	18,5842
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	CN-SGCC	6,3117
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	RoW	0,4688
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	RoW	0,0201
Polikarbonat	GLO	1,7747
Toz boya, alüminyum levha	GLO	0,9935
Sentetik kauçuk	GLO	2,9553
Musluk suyu	RoW	0,0007
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	GLO	0,2133
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	RoW	1,6024
Alüminyum, döküm alaşım2	RoW	0,1412
Toplam		120,659

Tablo 5.4 Xiaomi M365 e-skuter temel durumda üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,3881
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	34,3093
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	57,7904
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0839
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	120,6586
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2312,6062
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	129840,1425
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	18,3496
Arazi kullanımı [56]	m2a crop-eşd	-0,0699
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	161630,6966
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0389
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	6,6509
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,3821

Tablo 5.4 Xiaomi M365 e-skuter temel durumda üretim salım sonuçları (devamı)

Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,3952
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,8894
Karasal ekotoksosite [56]	kg 1,4-DCB	3669,7521
Su tüketimi [56]	m ³	2,7202

5.1.2 Nakliye Aşaması Analizi

Nakliye aşaması, e-skuterlerin üretim merkezlerinden kullanım noktası olan İstanbul'a kadar gerçekleştirdiği lojistik süreci kapsamaktadır. Bu süreç, hem deniz hem de kara taşımacılığı gibi çeşitli ulaşım türlerini içermekte ve toplam sera gazı salımları üzerinde etki yaratmaktadır. Bu çalışmada her iki e-skuter modeli için üretim yeri Çin'den İstanbul'a olan taşıma sürecin iki aşamalı olarak modellenmiştir: 1.100 km kara yolu ve 15.616 km deniz yolu taşımacılığı. Bu taşımacılık faaliyetlerinde ortaya çıkan karbon salımı, taşınan yükün ağırlığına doğrudan bağlı olarak değişmektedir.

Her iki e-skuterin de Çin'den İstanbul'a aynı gemi ve kamyon mesafesinde nakledildiği varsayılmasına rağmen, taşıma birimi başına oluşan salımlar arasında önemli fark oluşmuştur. Bu durum, taşıma kaynaklı çevresel etkilerde ağırlığın belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir.

Hop modeli, yaklaşık 31 kg toplam ağırlığı ile Xiaomi M365 modeline göre daha ağırdır. Bu nedenle aynı mesafede taşınmasına rağmen daha yüksek sera gazı salımına neden olmaktadır. OpenLCA inceleme sonuçlarına göre Hop e-skuter için ulaşım kaynaklı salım kilometre başına 0,8232 g CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.5). Buna karşılık, Xiaomi M365 modeli daha hafif (12,5 kg) olduğu için 0,5387 g CO₂-eşd/km değerinde ulaşım salımı gerçekleştirmektedir (Tablo 5.7).

Bu fark, ürün ağırlığının ulaşım aşamasında belirleyici çevresel etkenlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Her iki e-skuterin de üretiminin yerelleştirilmesi veya taşımada daha az karbon salım yöntemlerin tercih edilmesi, yaşam döngüsünün bu aşamasındaki çevresel yükü azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Ayrıca ulaşım sürecinde kullanılan taşıma araçlarının enerji türü ve verimliliği de, sera gazı salımlarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır.

5.1.3 Kullanım Aşaması Analizi

Kullanım aşaması, e-skuterin aktif olarak şehir içi taşımada yer aldığı aşamasını kapsamakta olup şarj, bakım, toplama-dağıtım ve saha operasyonları süreçlerden oluşmaktadır. Bu aşamada özellikle elektrik enerjisi tüketimi, batarya verimliliği, bakım sıklığı ve saha operasyonları gibi faktörler çevresel etkileri doğrudan etkilemektedir.

Hop modelinin kullanım ömrü boyunca toplam 10.285 km yol kat ettiği varsayılmış ve bu süreçte kilometre başına ortalama 7,8903 g CO₂-eşd salım gerçekleştirdiği hesaplanmıştır (Tablo 5.5). Toplamda ise kullanım süreci boyunca 81,1522 kg CO₂-eşd salım olarak saplanmıştır. Xiaomi M365 modeli ise daha kısa bir kullanım ömrüne 7.500 km sahip olmakla birlikte kilometre başına 10,2406 g CO₂-eşd, toplamda ise 76,8044 kg CO₂-eşd salım olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.7).

Hop modelinin daha uzun ömürlü olması ve bakım gereksiniminin daha düşük olması (407 km'de bir bakım) çevresel etkilerini azaltan önemli bir unsur olmuştur. Xiaomi M365 ise her 446 km'de bir bakım gerektirmesine rağmen, daha kısa menzili ve daha küçük batarya kapasitesi nedeniyle kilometre başına daha fazla salım üretmektedir. Özellikle şehir şebekesinden sağlanan elektrikle yapılan şarj işlemleri, kullanım aşamasının başlıca karbon kaynaklarını oluşturur. Bu nedenle, elektrik üretim karışımındaki yenilenebilir enerji oranının artırılması kullanım aşamasında önemli faydalar sağlayacaktır.

5.1.4 Ömür Sonu Aşaması Analizi

E-skuterlerin ömür sonu aşaması, cihazların kullanım dışı kaldıktan sonra geri dönüşüm, yeniden kullanım ve bertaraf süreçlerini kapsamaktadır. Bu aşama genellikle yaşam döngüsü analizinde en düşük çevresel etkiye sahip olmasına rağmen, bütüncül değerlendirme açısından göz ardı edilmemelidir.

Hop e-skuter için ömür sonu aşamasında kilometre başına 0,0008 kg CO₂-eşd, toplam kullanım ömrü sonunda ise yalnızca 0,0083 kg CO₂-eşd salım hesaplanmıştır (Tablo 5.5). Xiaomi M365 için ise kilometre başına 0,0011 kg

CO₂-eşd, toplamda ise yine 0,0083 kg CO₂-eşd salım gerçekleşmiştir (Tablo 5.7). Her iki modelin toplam ömür sonu salımları eşit olmakla birlikte, kilometre başına düşen değer açısından Hop modeli daha avantajlıdır. Bu durum, Hop modelinin daha uzun ömürlü olması nedeniyle çevresel etkinin daha geniş bir zaman dilimine yayılmasından kaynaklanmaktadır.

Ömür sonu incelemesinde dikkate alınan envanter verilerine göre, ürünlerin manuel olarak söküldüğü varsayılmıştır. Özellikle alüminyum ve pil bileşenlerinin geri dönüşüm süreçlerine dahil edilmesi, ömür sonu aşamasının çevresel etkisini daha da azaltabilir. İleri seviye atık yönetimi stratejilerinin benimsenmesi, bu aşamada iyileştirme sağlayabilecek önemli bir faktördür.

Tablo 5.5 Hop e-skuter temel durumda yaşam döngüsü sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Temel Durum	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	25,0823	10285	257,971	74,2
Uluslararası ulaşım	0,8232	10285	8,4670	2,4
Kullanım	7,8903	10285	81,1522	23,3
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0083	0
Toplam	33,7967	10285	347,5990	100

Tablo 5.6 Hop e-skuter temel durumda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (Yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,00011
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,00656
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,00707
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	1,8E-05
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0338
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,29914
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	16,8284
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0023
Arazi kullanımı [56]	m2a crop-eşd	6,5E-05
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	20,8262
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	4,6E-06
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,00078

Tablo 5.6 Hop e-skuter temel durumda yaşam döngüsü salım sonuçları (devamı)

Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	7,7E-05
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	7,9E-05
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	1,4E-08
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,00015
Karasal ekotoksosite [56]	kg 1,4-DCB	0,43651
Su tüketimi [56]	m ³	0,0004

Tablo 5.7 Xiaomi M365 e-skuter temel durumda yaşam döngüsü envanter sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Temel Durum	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	16,0878	7500	120,6586	59,9
Uluslararası ulaşım	0,5387	7500	4,0403	2
Kullanım	10,2406	7500	76,8044	38,1
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7500	0,0083	0
Toplam	26,8682	7500	201,5115	100

Tablo 5.8 Xiaomi M365 e-skuter temel durumda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0077
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0091
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0269
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,3735
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,7930
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0030
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	26,8947
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0011
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,0002
Karasal ekotoksosite [56]	kg 1,4-DCB	0,5813
Su tüketimi [56]	m ³	0,0005

Xiaomi M365 ve Hop e-skuterlerin yaşam döngüsü etki kategorilerine bakıldığında Xiaomi e-skuterin biraz daha fazla salım yaptığı bulunmuştur (Tablo 5.6 ve Tablo 5.8).

5.2 Senaryo Karşılaştırmaları

5.2.1 İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu

Bu senaryo, e-skuter üretiminin Çin yerine İstanbul'da gerçekleştirilmesi durumunda ortaya çıkan çevresel etkilerin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çin'de üretimin yol açtığı yüksek ulaşım kaynaklı karbon salımlarının ve enerji kaynaklarının çevresel yoğunluğunun etkisi dikkate alınarak, İstanbul'daki yerel üretimin bu açıdan potansiyel avantajları incelenmiştir. Bu bağlamda Hop ve Xiaomi M365 modellerinin yaşam döngüsü boyunca üretim kaynaklı sera gazı salımları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Hop e-skuter için İstanbul'da üretim senaryosu uygulandığında toplam 237,03 kg CO₂-eşd salım hesaplanmıştır. Bu değer temel durumda hesaplanan Çin üretimi için 257,971 kg CO₂-eşd karşılaştırıldığında belirgin bir azalma göstermektedir. Emisyon azaltımının büyük bir kısmı, uluslararası ulaşım ihtiyacının ortadan kalkması ve İstanbul'daki elektrik şebekesinin daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olmasıyla açıklanabilir. İstanbul'daki üretim sürecinde en fazla salıma neden olan bileşenler arasında hâlâ alüminyum alaşımı, pil hücreleri ve elektrik motoru yer almakla birlikte, kullanılan yerli kaynaklar ve şebeke elektriğinin yapısı bu salımların nispeten düşmesine katkı sağlamıştır (Tablo 5.9).

Xiaomi M365 modelinin İstanbul'da üretimi durumunda ise toplam üretim kaynaklı salım 112,807 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.13). Bu değer, modelin daha düşük ağırlığı ve bileşen yoğunluğu nedeniyle Hop modeline kıyasla oldukça düşüktür. Özellikle alüminyum alaşım ve pil hücresi üretiminde görülen daha düşük miktarlar, Xiaomi M365'in üretim kaynaklı çevresel etkisini azaltmaktadır. Bununla birlikte, İstanbul'da üretimin katkısıyla hem doğrudan enerji kullanımı hem de üretim lojistiği anlamında önemli kazanımlar elde edilmektedir.

Her iki model için de İstanbul'da üretim senaryosu, yaşam döngüsü analizinde dikkate alınması gereken çevresel iyileştirme potansiyelini göstermektedir. Hop

modelinde Çin'deki üretime göre yaklaşık %8,11, Xiaomi modelinde ise %6,51 oranında bir salım azalımı sağlanmıştır. Bu bulgular, e-skuter gibi şehir içi mikromobilité araçlarında yerli üretimin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da tercih edilebilir bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 5.9 Hop e-skuter İstanbul'da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	146,9582
Pil hücresi, üretildi	GLO	23,8463
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	10,2324
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	1,6307
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0301
Polikarbonat	RER	1,7535
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	1,3527
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,2931
Toplam		237,0385

Tablo 5.10 Hop e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,7425
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	64,7248
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	116,2596
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,1485
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	237,0385
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5550,2610
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	180852,8784
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	36,3681
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,9336
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	242144,5671
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0439
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	9,1070
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,6952
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,7141
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,4768
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	4429,8054
Su tüketimi [56]	m ³	4,5073

Tablo 5.11 Hop e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	İstanbul’da E-skuter Üretilmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	23,0470	10285	237,0385	68,5
Uluslararası ulaşım	0,0572	10285	0,5881	0,2
Kullanım	10,5640	10285	108,6509	31,4
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0083	0
Toplam	33,6690	10285	346,2857	100

Tablo 5.12 Hop e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0093
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0127
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0337
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,6116
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,7297
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0040
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	28,5772
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0010
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,0002
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,5014
Su tüketimi [56]	m ³	0,0006

Tablo 5.13 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (İstanbul’da E-skuter Üretilmesi Durumu)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	37,3539
Pil hücresi, üretildi	GLO	17,1132
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	4,1260
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	0,6581
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0122
Polikarbonat	RER	1,7535

Tablo 5.13 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları (devamı)

Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	0,7019
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,1465
Toplam		112,807

Tablo 5.14 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,3934
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	32,9028
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	57,8235
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0882
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	112,8068
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2531,0844
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	130323,0579
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	21,4099
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	-0,0129
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	162323,8505
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0389
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	6,6119
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,3478
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,3607
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,8593
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	3654,2126
Su tüketimi [56]	m ³	2,7663

Tablo 5.15 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	İstanbul’da E-skuter Üretilmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	15,0409	7.500	112,8068	59,6
Uluslararası ulaşım	0,0374	7.500	0,2806	0,1
Kullanım	10,1739	7.500	76,3042	40,3
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7.500	0,0083	0
Toplam	25,2533	7.500	189,3999	100

Tablo 5.16 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul’da e-skuter üretilmesi durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0073
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0091
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0253
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,4010
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,8191
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0034
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0000
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	26,9366
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0011
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitletme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,0002
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,5732
Su tüketimi [56]	m ³	0,0005

5.2.2 İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması Durumu

Bu senaryo, e-skuter üretiminin İstanbul'da gerçekleştirildiği fabrikalarda elektrik ihtiyacının tamamının veya önemli bir kısmının fotovoltaiik (PV) paneller aracılığıyla karşılanması durumunda ortaya çıkan çevresel etkileri incelemektedir. Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması, üretim süreçlerinin karbon ayak izini azaltmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, Hop ve Xiaomi M365 modelleri için İstanbul'daki fabrikalarda PV sisteminin kullanımıyla elde edilen salım değerleri karşılaştırılmıştır.

Hop e-skuter için PV sistem destekli üretim senaryosunda, toplam üretim aşaması kaynaklı sera gazı salımı 227,8822 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.19). Bu değer, İstanbul'da geleneksel şebeke elektriği kullanılan üretim senaryosundaki 237,03 kg CO₂-eşd salıma kıyasla yaklaşık %3,86'lık bir azalma anlamına gelmektedir. Emisyonlardaki bu düşüşün temel nedeni, şebeke yerine PV kaynaklı elektrik kullanımının daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olmasıdır. Hop modeli üretiminde en fazla salım yaratan envanter kalemleri arasında alüminyum alaşımı, elektrik motoru ve pil hücreleri öne çıkmaktadır. Ancak PV kullanımı, özellikle elektrik tüketimi yüksek olan bu kalemlerdeki toplam salımı azaltıcı etki göstermiştir (Tablo 5.17, Tablo 19).

Xiaomi M365 modelinde de benzer şekilde, PV destekli üretim senaryosunda toplam sera gazı salımı 109,1147 kg CO₂-eşd olarak belirlenmiştir (Tablo 5.23). Bu değer, İstanbul'da şebeke elektriği kullanılan üretim senaryosundaki 112,80 kg CO₂-eşd salıma göre yaklaşık %3,27 oranında bir azalma anlamına gelmektedir. Xiaomi modelinin daha düşük malzeme miktarı ve enerji ihtiyacı sayesinde PV kullanımının çevresel katkısı daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle alüminyum ve pil üretimi aşamalarında elde edilen salım tasarrufu dikkat çekicidir (Tablo 5.21, Tablo 5.23).

Her iki modelde de görüldüğü üzere, PV sistemlerinin fabrikalara entegrasyonu, üretim aşamasında anlamlı düzeyde karbon ayak izi azaltımı sağlamaktadır. Hop modelinde bu iyileşme daha sınırlı kalırken, Xiaomi M365 modelinde daha yüksek oranda bir azalma gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, Xiaomi modelinin daha düşük enerji ve malzeme girdisine sahip olması nedeniyle PV

sistemlerinin toplam üretim üzerindeki etkisinin daha güçlü şekilde hissedilmesidir.

Sonuç olarak, İstanbul’da üretim yapan fabrikalarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, sadece ekonomik değil aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli faydalar sunmaktadır. Devlet politikaları ve teşvik mekanizmalarıyla desteklenecek fotovoltaik sistem yatırımları, mikromobilité sektörünün daha yeşil bir yapıya kavuşmasında belirleyici olabilir.

Tablo 5.17 Hop e-skuter İstanbul’daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (İstanbul’daki Fabrikada PV Kullanılması)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	146,9582
Pil hücresi, üretildi	GLO	23,8463
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	1,0761
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	1,6307
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0301
Polikarbonat	RER	1,7535
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	1,3527
Alüminyum, döküm alaşım ²	RER	0,2931
Toplam		227,882

Tablo 5.18 Hop e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,6622
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	62,3028
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	116,3616
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,1382
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	227,8822
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5512,2656
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	178968,9146
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	36,3889
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,9083
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	240119,1147
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0433
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	9,1194
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,6737
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,6925
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,4346
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	4460,9815
Su tüketimi [56]	m ³	4,4580

Tablo 5.19 Hop e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	İstanbul'daki Fabrikada Pv Kullanılması	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	22,1568	10285	227,8822	67,6
Uluslararası nakliye	0,0572	10285	0,5881	0,2
Kullanım	10,5640	10285	108,6509	32,2
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0083	0
Toplam	32,7788	10285	337,1295	100

Tablo 5.20 Hop e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0090
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0128
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO2-eşd	0,0328
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,6079
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,5466
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0040
Arazi kullanımı [56]	m2a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	28,3803
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0010
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO2-eşd	0,0002
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,5044
Su tüketimi [56]	m3	0,0006

Tablo 5.21 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	37,3539
Pil hücresi, üretildi	GLO	17,1132
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	0,4339
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	0,6581
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0122
Polikarbonat	RER	1,7535
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002

Tablo 5.21 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları (devamı)

Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	0,7019
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,1465
Toplam		109,115

Tablo 5.22 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,3610
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	31,9262
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	57,8647
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0840
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	109,1147
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2515,7635
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	129563,3862
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	21,4183
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	-0,0231
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	161507,1263
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0386
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	6,6169
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,3391
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,3520
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitletme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,8423
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	3666,7838
Su tüketimi [56]	m ³	2,7465

Tablo 5.23 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	14,5486	7500	109,1147	58,8
Uluslararası ulaşım	0,0374	7500	0,2806	0,2
Kullanım	10,1739	7500	76,3042	41,1
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7500	0,0083	0
Toplam	24,7610	7500	185,7078	100

Tablo 5.24 Xiaomi M365 e-skuter İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0072
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0091
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0248
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,3990
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,7178
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0034
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0000
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	26,8277
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0011
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,0002
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,5749
Su tüketimi [56]	m ³	0,0005

5.2.3 E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu

Bu senaryoda, e-skuterlerin kullanım sürecinde şarj ihtiyaçlarının şehir şebekesi yerine fotovoltaiik (PV) sistemlerle çalışan şarj istasyonlarından sağlanması durumundaki çevresel etkiler incelenmiştir. Özellikle paylaşımlı sistemlerde şarj altyapısının sürdürülebilirliği, toplam karbon ayak izini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda hem Hop hem de Xiaomi M365 modelleri için PV destekli istasyonlardan şarj edilme senaryosu değerlendirilmiştir.

Hop modeli için bu senaryo uygulandığında, üretim kaynaklı toplam salım 227,88 kg CO₂-eşd, kullanım aşaması salımı ise 35,9411 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.25, Tablo 5.27). Temel durumda kullanım aşamasında hesaplanan 81,1522 kg CO₂-eşd değere kıyasla yaklaşık %55,7'luk bir azalma sağlanmıştır. Bu farkın temel nedeni, geleneksel şehir elektriğinin yerini alan PV kaynaklı şarj sistemlerinin karbon yoğunluğunun düşük olmasıdır. Ayrıca saha operasyonları ve bakım süreçleri aynı kaldığı için aradaki fark yalnızca enerji kaynağının değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Xiaomi M365 modeli için de benzer bir azalma gözlemlenmiştir. PV destekli istasyon kullanımında toplam kullanım aşaması salımı 23,2830 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.31). Bu değer, temel durumda kullanım aşaması için belirlenen 76,8044 kg CO₂-eşd salıma kıyasla yaklaşık %69,7'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. PV sistemlerin daha kısa menzilli ve daha az enerji tüketen modellerde daha belirgin iyileştirme sağladığı görülmektedir.

Bu sonuçlar, şarj altyapısında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması sayesinde e-skuter sistemlerinin çevresel performansının önemli ölçüde artırılabilceğini göstermektedir. Özellikle Türkiye gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek ülkelerde, PV tabanlı istasyonlar sayesinde hem karbon salımları azaltılabilir hem de enerji maliyetleri düşürülebilir. PV sistemler ile birlikte şebekeye bağımlılığın azalması, sistemin enerji güvenliği açısından da avantaj sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu senaryo sadece teknik açıdan değil aynı zamanda stratejik ve çevresel açıdan da önem arz etmektedir. Mikromobilité hizmet sağlayıcılarının PV sistemlerine yatırım yapmaları, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmaları açısından olumlu bir adım olacaktır.

Tablo 5.25 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları

Envanterler (E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	146,9582
Pil hücresi, üretildi	GLO	23,8463
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	1,0761
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	1,6307
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0301
Polikarbonat	RER	1,7535
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	1,3527
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,2931
Toplam		227,882

Tablo 5.26 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,6622
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	62,3028
Tatlı su ekotoksitesi [56]	kg 1,4-DCB	116,3616
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,1382
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	227,8822
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5512,2656

Tablo 5.26 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları (devamı)

İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	178968,9146
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	36,3889
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,9083
Deniz ekotoksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	240119,1147
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0433
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	9,1194
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NOx-eşd	0,6737
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NOx-eşd	0,6925
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,4346
Karasal ekotoksisite [56]	kg 1,4-DCB	4460,9815
Su tüketimi [56]	m ³	4,4580

Tablo 5.27 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	22,1568	10285	227,8822	86,2
Uluslararası ulaşım	0,0572	10285	0,5881	0,2
Kullanım	3,4945	10285	35,9411	13,6
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0083	0
Toplam	25,7093	10285	264,4197	100

Tablo 5.28 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM _{2.5} -eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0072
Tatlı su ekotoksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0125
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0257
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,5749
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	19,8179
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0040

Tablo 5.28 Hop e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları (devamı)

Arazi kullanımı [56]	m2a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	26,3935
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0010
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO2-eşd	0,0002
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,5179
Su tüketimi [56]	m ³	0,0005

Tablo 5.29 Xiaomi M365 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	37,3539
Pil hücresi, üretildi	GLO	17,1132
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	0,4339
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	0,6581
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0122
Polikarbonat	RER	1,7535
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	0,7019
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,1465
Toplam		109,115

Tablo 5.30 Xiaomi M365 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,3610
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	31,9262
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	57,8647
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0840
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	109,1147
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2515,7635
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	129563,3862
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	21,4183
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	-0,0231
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	161507,1263
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0386
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	6,6169
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,3391
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,3520
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,8423
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	3666,7838
Su tüketimi [56]	m ³	2,7465

Tablo 5.31 Xiaomi M365 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	14,5486	7500	109,1147	82,2
Uluslararası ulaşım	0,0374	7500	0,2806	0,2
Kullanım	3,1044	7500	23,2830	17,5
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7500	0,0083	0
Toplam	17,6915	7500	132,6866	100

Tablo 5.32 Xiaomi M365 e-skuter istasyonlarında PV kullanılması durumunda yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	5,715E-05
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	5,340E-03
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	8,802E-03
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	1,303E-05
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	1,769E-02
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	3,660E-01
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	1,999E+01
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	3,408E-03
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	2,408E-05
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	2,484E+01
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	5,616E-06
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	1,057E-03
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	5,478E-05
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	5,680E-05
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	1,244E-08
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,341E-04
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	5,884E-01
Su tüketimi [56]	m ³	4,790E-04

5.2.4 E-skutere Süspansiyon Eklenmesi

Bu senaryoda, e-skuter modellerine süspansiyon sistemi eklenmesinin yaşam döngüsü üzerindeki çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Süspansiyon sistemleri, özellikle kullanıcı konforunu artırmakta ve e-skuterlerin daha uzun süre kullanılmasını sağlayarak kullanım ömrünü uzatabilmektedir. Ancak bu iyileştirme, üretim aşamasında kullanılan malzeme miktarında ve enerji tüketiminde artışa yol açmakta, dolayısıyla çevresel etkiler üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Hop e-skuter modeli için süspansiyon eklendiğinde; demir-çelik, alüminyum gibi malzemelerin miktarında artış gözlemlenmiş ve bu artış toplam üretim envanterine yansımıştır. Bu kapsamda, Hop modelinin süspansiyonlu üretim envanteri 2,79 kg demir çelik ve 23,35 kg alüminyum gibi değerler içermektedir. Üretim aşamasında gerçekleşen toplam sera gazı salımı 233,548 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.33). Bu değer temel durumda 257,9715 kg CO₂-eşd olarak belirlenmiş ve süspansiyon olmayan temel senaryoya göre bir miktar

azalış göstermiştir. Hop e-skuterin süspansiyon eklenmiş versiyonunun tüm yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu toplam salım ise 239,2118 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.35).

Xiaomi M365 modeli için ise süspansiyon entegrasyonu sonrasında üretim envanterinde 1,54 kg demir çelik ve 6,82 kg alüminyum gibi malzemelerin yer aldığı görülmektedir. Bu model için üretim kaynaklı toplam sera gazı salımı 114,781 kg CO₂-eşd olarak bulunmuştur (Tablo 5.37). Xiaomi M365'in temel senaryo da 120,6586 kg CO₂-eşd kıyasla küçük bir azalış göstermektedir (Tablo 5.39). Süspansiyon eklenmiş Xiaomi modelinin yaşam döngüsü toplam salımı ise 119,3545 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.39).

Her iki modelde de süspansiyonun üretim kaynaklı salımları azaldığını ve kullanım süresini uzatarak birim mesafe başına düşen salımları azaltabildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.33 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (E-skutere Süspansiyon Eklenmesi)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	152,1877
Pil hücresi, üretildi	GLO	23,8463
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	1,1282
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	1,7096
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0316
Polikarbonat	RER	1,7886
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9907
Sentetik kauçuk	RER	2,6280
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,3136

Tablo 5.33 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları (devamı)

Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	1,4510
Toplam		233,548

Tablo 5.34 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,6757
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	63,7781
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	119,0345
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,1406
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	233,5481
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5735,1634
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	180930,3422
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	37,0553
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,9574
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	243475,5371
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0435
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	9,1845
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,6894
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,7085
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,4601
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	4479,4378
Su tüketimi [56]	m ³	4,5136

Tablo 5.35 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skutere Süspansiyon Eklenmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	22,7076	10285	233,548	97,6
Uluslararası ulaşım	0,0518	10285	0,5330	0,2
Kullanım	0,4981	10285	5,1228	2,1
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0079	0
Toplam	23,2583	10285	239,2118	100

Tablo 5.36 Hop e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0065
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0112
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0233
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,5237
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	17,6268
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0036
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	23,5363
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0009
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,0001
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	0,4592
Su tüketimi [56]	m ³	0,0005

Tablo 5.37 Xiaomi M365 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları

Envanterler (E-skutere Süspansiyon Eklenmesi)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	42,5834
Pil hücresi, üretildi	GLO	17,1132
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	0,4860
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	0,7370
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0136
Polikarbonat	RER	1,7886
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9907
Sentetik kauçuk	RER	2,6280
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002

Tablo 5.37 Xiaomi M365 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim envanterleri sonuçları (devamı)

Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	0,8001
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,1670
Toplam		114,781

Tablo 5.38 Xiaomi M365 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,3745
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	33,4015
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	60,5376
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0865
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	114,7805
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2738,6612
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	131524,8139
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	22,0846
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	0,0260
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	164863,5487
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0388
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	6,6820
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,3548
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,3680
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0001
Karasal asitletme [56]	kg SO ₂ -eşd	0,8677
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	3685,2400
Su tüketimi [56]	m ³	2,8020

Tablo 5.39 Xiaomi M365 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skutere Süspansiyon Eklenmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	15,3041	7500	114,781	96,2
Uluslararası ulaşım	0,0349	7500	0,2619	0,2
Kullanım	0,5739	7500	4,3042	3,6
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7500	0,0079	0
Toplam	15,9139	7500	119,3545	100

Tablo 5.40 Xiaomi M365 e-skutere süspansiyon eklenmesi yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	5,016E-05
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	4,768E-03
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	7,850E-03
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	1,140E-05
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	1,591E-02
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	3,441E-01
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	1,711E+01
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	2,916E-03
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	2,832E-05
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	2,144E+01
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	4,865E-06
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	8,524E-04
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	4,899E-05
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	5,079E-05
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	1,084E-08
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,159E-04
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	4,910E-01
Su tüketimi [56]	m ³	3,848E-04

5.2.5 E-skutere PV Eklenilmesi

Bu senaryoda, e-skuter gövdesine entegre edilen küçük ölçekli fotovoltaik (PV) paneller ile aracın kullanım sırasında kendi enerjisinin bir kısmını karşılayabilmesi durumu değerlendirilmiştir. Bu teknoloji, güneş ışığına maruz

kaldıkça bataryanın kısmen şarj edilmesini mümkün kılmakta ve şehir şebekesinden enerji talebini azaltmayı hedeflemektedir. Ancak PV panellerin üretim süreçleri, kullanılan malzemeler ve eklenen ağırlık gibi unsurlar dikkate alındığında, bu çözümün çevresel etkilerinin net olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hop e-skuteri için PV panel entegre edildiğinde, üretim envanterine 0,4 m²'lik fotovoltaik laminat eklenmiş ve bu durum, demir, silikon, cam ve alüminyum gibi malzemelerde artışa sebep olmuştur. Bu artış, üretim kaynaklı sera gazı salımının da yükselmesine neden olmuştur. Hop e-skuter üretim envanteri, bu senaryoda 1,2 kg plastik ve 0,4 m² PV laminat ek olarak içermektedir. Bu doğrultuda, üretim kaynaklı toplam salım 326 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.41). Hop modelinin tüm yaşam döngüsü boyunca oluşan toplam salımı ise 336,8205 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.43).

Xiaomi M365 e-skuteri için de benzer şekilde 0,4 m² PV panel entegrasyonu yapılmıştır. Bu durumda üretim envanteri, bu senaryoda 1,2 kg plastik ve 0,4 m² PV laminat ek olarak içermektedir. Bu değişiklik, üretim kaynaklı sera gazı salımını 207,232 kg CO₂-eşd seviyesine çıkarmıştır (Tablo 5.45). Yaşam döngüsü boyunca toplam salım 224,6831 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.47).

Hop e-skuter için kullanım aşamasında 10,1878 kg CO₂-eşd ve Xiaomi M365 e-skuter ise 17,1254 kg CO₂-eşd hesaplanmıştır (Tablo 5.43, Tablo 5.47). Kullanım aşamasında şebeke elektriği tüketimi azalmış olsa da, üretimdeki artış bu kazancı dengelemiş hatta bazı durumlarda aşmıştır. Bu bulgu, teknolojik iyileştirme gibi görünen PV panel entegrasyonunun çevresel anlamda her zaman avantajlı olmadığını göstermektedir.

Tablo 5.41 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (E-skutere PV Eklenilmesi)	Konum	Küresel Isınma (kg CO ₂ -eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	146,958
Pil hücresi, üretildi	GLO	23,846
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,279
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,495

Tablo 5.41 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları (devamı)

Işık yayan diyot	GLO	3,729
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	1,076
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	1,665
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,030
Polikarbonat	RER	9,433
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,917
Sentetik kauçuk	RER	2,551
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,000
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,817
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,201
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,952
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	1,353
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,293
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	RER	90,404
Toplam		326,000

Tablo 5.42 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,8697
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	91,3754
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	123,8254
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,1846
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	325,9998
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	5979,4497
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	217557,8572
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	50,0958
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	2,5793
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	286251,6525
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0527

Tablo 5.42 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları (devamı)

Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	9,6788
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NOx-eşd	0,9325
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NOx-eşd	0,9633
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0002
Karasal asitlenme [56]	kg SO2-eşd	1,8153
Karasal ekotoksosite [56]	kg 1,4-DCB	6912,8494
Su tüketimi [56]	m ³	7,5546

Tablo 5.43 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skutere PV Eklenilmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	31,6966	10285	326	96,8
Uluslararası ulaşım	0,0607	10285	0,6246	0,2
Kullanım	0,9906	10285	10,1878	3
Kullanım ömrü sonu	0,0008	10285	0,0083	0
Toplam	32,7487	10285	336,8205	100

Tablo 5.44 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,0001
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	0,0090
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,0128
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,0000
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	0,0327
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	0,6078
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	21,5411
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	0,0040
Arazi kullanımı [56]	m2a crop-eşd	0,0001
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	28,3735
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,0000
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	0,0010
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NOx-eşd	0,0001
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,0000
Karasal asitlenme [56]	kg SO2-eşd	0,0002

Tablo 5.44 Hop e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü salım sonuçları
(devamı)

Karasal ekotoksosite [56]	kg 1,4-DCB	0,5039
Su tüketimi [56]	m ³	0,0006

Tablo 5.45 Xiaomi M365 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim envanter sonuçları

Envanterler (E-skutere PV Eklenilmesi)	Konum	Küresel Isınma (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	RER	37,3539
Pil hücresi, üretildi	GLO	17,1132
Şarj cihazı, elektrik için skuter	GLO	9,2792
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	GLO	20,4946
Işık yayan diyot	GLO	3,7293
Elektrik, orta gerilim, şebekede	TR	0,4339
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	Europe without Switzerland	0,6919
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	Europe without Switzerland	0,0122
Polikarbonat	RER	9,4333
Toz boya, alüminyum levha	RER	0,9173
Sentetik kauçuk	RER	2,5515
Musluk suyu	Europe without Switzerland	0,0002
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	GLO	9,8168
Kaynak, ark, alüminyum	RER	0,2009
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	GLO	3,9518
Çelik, düşük alaşımlı	Europe without Switzerland and Austria	0,7019
Alüminyum, döküm alaşım2	RER	0,1465
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	RER	90,4040
Toplam		207,232

Tablo 5.46 Xiaomi M365 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü üretim salım sonuçları

Etki Kategorisi (üretim)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	0,56852
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	60,99882
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	65,32844
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	0,13047
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	207,23223
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2982,94755
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	168152,32887
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	35,12510
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	1,64788
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	207639,66406
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	0,04806
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	7,17633
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	0,59788
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	0,62281
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	0,00014
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,22298
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	6118,65165
Su tüketimi [56]	m ³	5,84299

Tablo 5.47 Xiaomi M365 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü küresel ısınma sonuçları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	E-skutere PV Eklenilmesi	Kullanım Mesafesi	Toplam Yaşam Döngüsü Sonucu	Pay
	g CO ₂ -eşd/km	Km	kg CO ₂ -eşd	%
Üretim	27,6310	7500	207,232	92,2
Uluslararası ulaşım	0,0423	7500	0,3172	0,1
Kullanım	2,2834	7500	17,1254	7,6
Kullanım ömrü sonu	0,0011	7500	0,0083	0
Toplam	29,9577	7500	224,6831	100

Tablo 5.48 Xiaomi M365 e-skutere PV eklenilmesi yaşam döngüsü salım sonuçları

Etki Kategorisi (yaşam döngüsü)	Referans Birim	Sonuç
İnce partikül madde oluşumu [56]	kg PM2.5-eşd	8,26E-05
Fosil kaynak kıtlığı [56]	kg oil-eşd	8,98E-03
Tatlı su ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	9,43E-03
Tatlı su ötrofikasyonu [56]	kg P-eşd	1,87E-05
Küresel ısınma [56]	kg CO ₂ -eşd	3,00E-02
İnsan kanserojen toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	4,20E-01
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi [56]	kg 1,4-DCB	2,44E+01
İyonlaştırıcı radyasyon [56]	kBq Co-60-eşd	5,13E-03
Arazi kullanımı [56]	m ² a crop-eşd	2,35E-04
Deniz ekotoksitesitesi [56]	kg 1,4-DCB	3,01E+01
Deniz ötrofikasyonu [56]	kg N-eşd	6,80E-06
Mineral kaynak kıtlığı [56]	kg Cu-eşd	1,12E-03
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı [56]	kg NO _x -eşd	8,68E-05
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler [56]	kg NO _x -eşd	9,04E-05
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi [56]	kg CFC11-eşd	2,10E-08
Karasal asitlenme [56]	kg SO ₂ -eşd	1,80E-04
Karasal ekotoksitesite [56]	kg 1,4-DCB	8,86E-01
Su tüketimi [56]	m ³	8,70E-04

5.2.6 Tüm Üretim Senaryoların Karşılaştırmaları

Bu bölümde, Hop ve Xiaomi M365 modellerine ait altı farklı üretim senaryosunun yaşam döngüsü analizine dayalı sera gazı salımları karşılaştırılmıştır. Senaryolar; mevcut temel üretim durumu, İstanbul’da üretim, İstanbul’daki fabrikada PV kullanımı, e-skuter istasyonlarında PV kullanımı, e-skutere süspansiyon eklenmesi ve e-skutere PV panel entegrasyonu olarak tanımlanmıştır. Karşılaştırma ölçütü olarak küresel ısınma potansiyeli esas alınmıştır.

Hop modelinde temel üretim salımı 257,971 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır. Bu değerin yaklaşık %61,5’i yalnızca alüminyum alaşımı üretiminden kaynaklanmakta olup, en büyük katkı sağlamaktadır (Tablo 5.49, Tablo 5.50). İstanbul’da üretim senaryosu ile bu değer 237,039 kg CO₂-eşd düzeyine inmiştir. Bu düşüş, özellikle ithalat sürecindeki ulaşım salımlarının ortadan kalkması ve üretim kaynaklarının yerelleştirilmesiyle ilgilidir. İstanbul’daki üretim tesisinde PV kullanılması senaryosu ile, aynı şekilde 227,882 kg CO₂-eşd değerine ulaşılmış; bu da enerji girdilerinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıyla

açıklanabilir. E-skuter istasyonlarında PV kullanımı da doğrudan üretim aşamasını değil, kullanım evresini etkilediği için üretim aşamasında benzer bir salım düzeyi 227,882 kg CO₂-eşd hesaplanmıştır. Süspansiyon sisteminin eklendiği senaryoda üretimde kullanılan çelik, kauçuk ve plastik malzemelerdeki artış nedeniyle toplam salım 233,548 kg CO₂-eşd seviyesine yükselmiştir. En yüksek üretim kaynaklı sera gazı salımı ise e-skuter gövdesine PV panel bütünleştirilmesi senaryosunda gerçekleşmiş ve toplam değer 326 kg CO₂-eşd'ye ulaşmıştır. Bu farkın büyük bölümü, fotovoltaik laminat üretiminden kaynaklanan 90,404 kg CO₂-eşd'lik ek yüküdür (Tablo 5.49). Xiaomi M365 modeli için temel üretim salımı 120,659 kg CO₂-eşd olup, yine alüminyum ve elektrik motoru gibi envanterler öne çıkmaktadır. İstanbul'da üretim senaryosunda bu değer 112,807 kg CO₂-eşd'ye, PV kullanılan üretim tesisinde ise 109,115 kg CO₂-eşd'ye düşmüştür. İstasyonlarda PV kullanımı senaryosu üretimde aynı 109,115 kg CO₂-eşd değeri hesaplanmıştır. Çünkü bu senaryo da doğrudan üretim aşamasına müdahale etmemektedir. Süspansiyon eklenmesi ile çelik ve alüminyum içeriklerdeki artış sonucunda üretim salımları 114,781 kg CO₂-eşd'ye çıkmıştır. En yüksek değer, e-skutere PV panel bütünleştirilmesi durumunda 207,232 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmış ve bu senaryo da Hop modelinde olduğu gibi çevresel anlamda en yüksek yükü getirmiştir. PV laminat tek başına bu toplamın yaklaşık %43,6'sını oluşturmaktadır (Tablo 5.51, Tablo 5.52). Hop ve Xiaomi M365 e-skutere PV laminat her iki durumda 90,404 kg CO₂-eşd'ye bir etkiye sahiptir. Hop e-skutere bakıldığında alüminyum, pil hücresi, motor gibi envanterlerinde yüksek gösterse de PV laminat her iki e-skuter içinde önemli etkiye sahiptir (Şekil 5.1, Şekil 5.2)

Genel olarak her iki modelde de en düşük salım değerleri İstanbul'da üretim ve PV destekli üretim senaryolarında gözlemlenmiştir. Bu senaryolar çevresel sürdürülebilirlik açısından en avantajlı seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, doğrudan araca PV panel bütünleştirilmesi günümüz teknolojisiyle yüksek çevresel maliyet getirmektedir. Süspansiyon sisteminin üretim kaynaklı salımları artırmasına karşın, kullanım aşamasındaki potansiyel katkıları sayesinde yaşam döngüsü performansına olumlu etkileri bulunmaktadır (Tablo 5.49, Tablo 5.52)

Tablo 5.49 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanterleri senaryo sonuçları

Envanterler (Hop)	0-Temel Durum (kg CO ₂ -eşd)	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi (kg CO ₂ -eşd)	2-İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması (kg CO ₂ -eşd)	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması (kg CO ₂ -eşd)	4-E-skutere Süspansiyon Eklenmesi (kg CO ₂ -eşd)	5-E-skutere PV Eklenmesi (kg CO ₂ -eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	158,631	146,958	146,958	146,958	152,188	146,958
Pil hücresi, üretildi	25,896	23,846	23,846	23,846	23,846	23,846
Şarj cihazı, elektrik için skuter	9,279	9,279	9,279	9,279	9,279	9,279
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	20,495	20,495	20,495	20,495	20,495	20,495
Işık yayan diyot	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729
Elektrik, orta gerilim, şebekede	15,653	10,232	1,076	1,076	1,128	1,076
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	1,162	1,631	1,631	1,631	1,710	1,665
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	0,050	0,030	0,030	0,030	0,032	0,030
Polikarbonat	1,775	1,754	1,754	1,754	1,789	9,433
Toz boya, alüminyum levha	0,993	0,917	0,917	0,917	0,991	0,917
Sentetik kauçuk	2,955	2,551	2,551	2,551	2,628	2,551
Musluk suyu	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	9,817	9,817	9,817	9,817	9,817	9,817

Tablo 5.49 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları (devamı)|

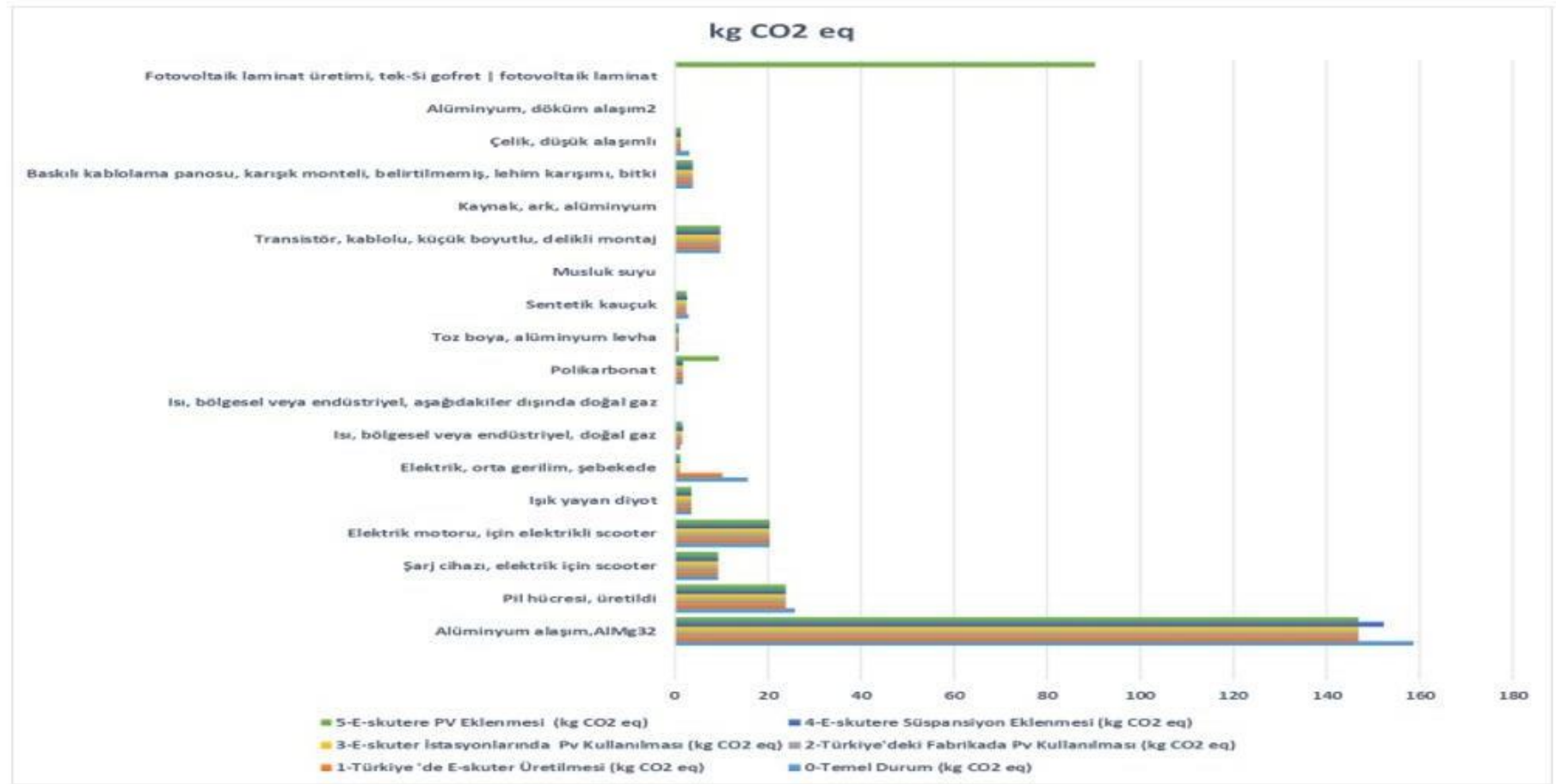
Kaynak, ark, alüminyum	0,213	0,201	0,201	0,201	0,201	0,201
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	3,952	3,952	3,952	3,952	3,952	3,952
Çelik, düşük alaşımlı	3,088	1,353	1,353	1,353	1,451	1,353
Alüminyum, döküm alaşım2	0,282	0,293	0,293	0,293	0,314	0,293
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	90,404
Toplam	257,971	237,039	227,882	227,882	233,548	326,000

Tablo 5.50 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanterleri senaryo sonuçların yüzdelik değerleri

Envanterler (Hop)	0-Temel Durum	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi	2-İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması	4-E-skutere Süspansiyon Eklenmesi	5-E-skutere PV Eklenmesi
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Alüminyum alaşım, AlMg32	61,5	62	64,5	64,5	65,2	45,1
Pil hücresi, üretildi	10	10,1	10,5	10,5	10,2	7,3
Şarj cihazı, elektrik için skuter	3,6	3,9	4,1	4,1	4	2,8
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	7,9	8,6	9	9	8,8	6,3

Tablo 5.50 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanterleri senaryo sonuçların yüzdelik değerleri (devamı)

Işık yayan diyot	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,1
Elektrik, orta gerilim, şebekede	6,1	4,3	0,5	0,5	0,5	0,3
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	0	0	0	0	0	0
Polikarbonat	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	2,9
Toz boya, alüminyum levha	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Sentetik kauçuk	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,8
Musluk suyu	0	0	0	0	0	0
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	3,8	4,1	4,3	4,3	4,2	3
Kaynak, ark, alüminyum	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,2
Çelik, düşük alaşımlı	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
Alüminyum, döküm alaşım2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	0	0	0	0	0	27,7
Toplam	100	100	100	100	100	100



Şekil 5.1 Hop e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları

Tablo 5.51 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları

Envanterler (Xiaomi M365)	0-Temel Durum (kg CO₂-eşd)	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi (kg CO₂-eşd)	2-İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması (kg CO₂-eşd)	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması (kg CO₂-eşd)	4-E-skutere Süspansiyon Eklenmesi (kg CO₂-eşd)	5-E-skutere PV Eklenmesi (kg CO₂-eşd)
Alüminyum alaşım, AlMg32	40,321	37,354	37,354	37,354	42,583	37,354
Pil hücresi, üretildi	18,584	17,113	17,113	17,113	17,113	17,113
Şarj cihazı, elektrik için skuter	9,279	9,279	9,279	9,279	9,279	9,279
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	20,495	20,495	20,495	20,495	20,495	20,495
Işık yayan diyot	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729
Elektrik, orta gerilim, şebekede	6,312	4,126	0,434	0,434	0,486	0,434
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	0,469	0,658	0,658	0,658	0,737	0,692
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	0,020	0,012	0,012	0,012	0,014	0,012
Polikarbonat	1,775	1,754	1,754	1,754	1,789	9,433
Toz boya, alüminyum levha	0,993	0,917	0,917	0,917	0,991	0,917
Sentetik kauçuk	2,955	2,551	2,551	2,551	2,628	2,551
Musluk suyu	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	9,817	9,817	9,817	9,817	9,817	9,817

Tablo 5.51 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları (devamı)

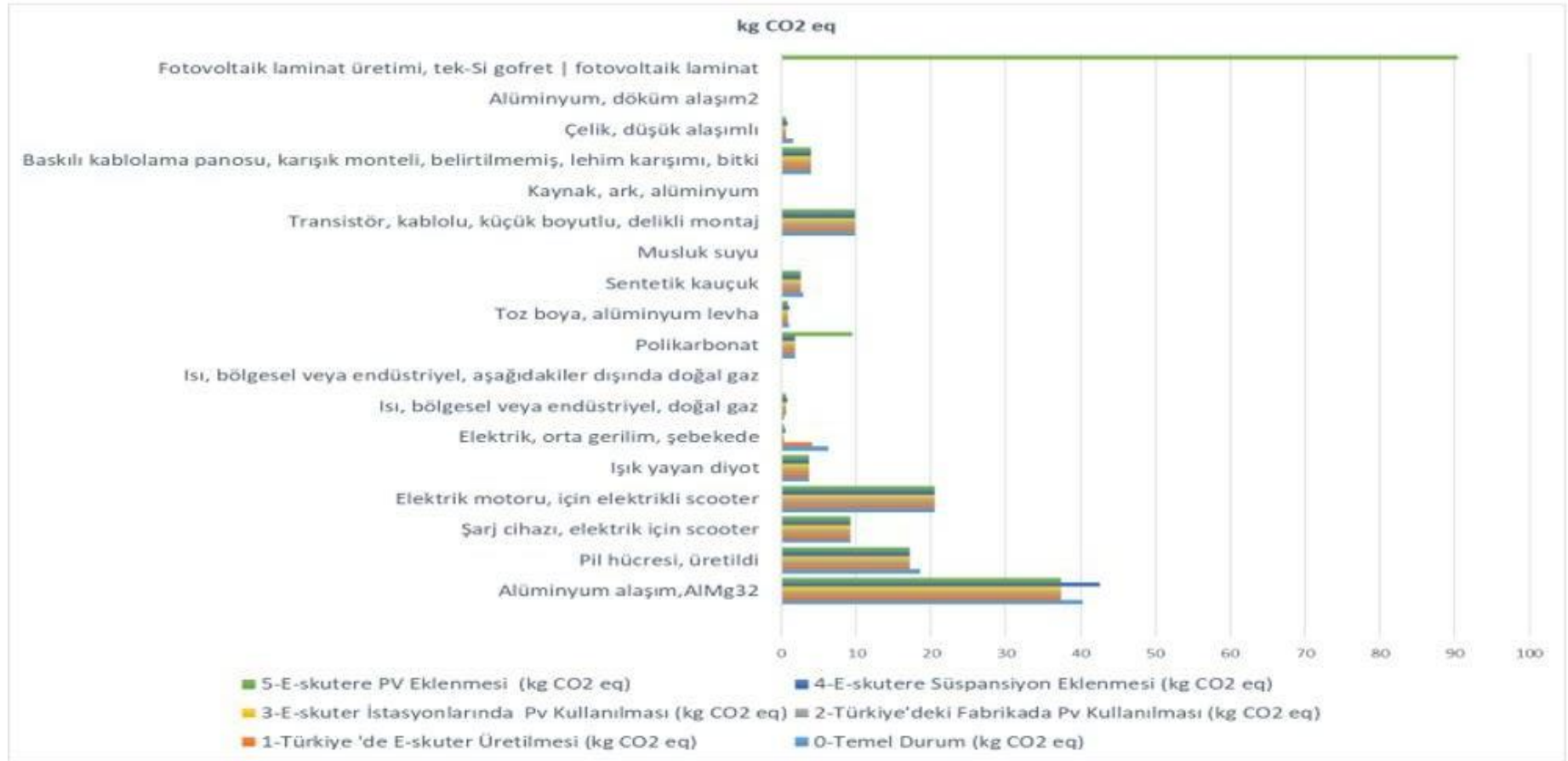
Kaynak, ark, alüminyum	0,213	0,201	0,201	0,201	0,201	0,201
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	3,952	3,952	3,952	3,952	3,952	3,952
Çelik, düşük alaşımlı	1,602	0,702	0,702	0,702	0,800	0,702
Alüminyum, döküm alaşım2	0,141	0,147	0,147	0,147	0,167	0,147
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	90,404
Toplam	120,659	112,807	109,115	109,115	114,781	207,232

Tablo 5.52 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçların yüzdelik değerleri

Envanterler (Xiaomi M365)	0-Temel Durum	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi	2-İstanbul'daki Fabrikada PV Kullanılması	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması	4-E-skutere Süspansiyon Eklenmesi	5-E-skutere PV Eklenmesi
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Alüminyum alaşım, AlMg32	33,4	33,1	34,2	34,2	37,1	18
Pil hücresi, üretildi	15,4	15,2	15,7	15,7	14,9	8,3
Şarj cihazı, elektrik için scooter	7,7	8,2	8,5	8,5	8,1	4,5
Elektrik motoru, için elektrikli skuter	17	18,2	18,8	18,8	17,9	9,9

Tablo 5.52 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçların yüzdelik değerleri (devamı)

Işık yayan diyot	3,1	3,3	3,4	3,4	3,2	1,8
Elektrik, orta gerilim, şebekede	5,2	3,7	0,4	0,4	0,4	0,2
Isı, bölgesel veya endüstriyel, doğal gaz	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
Isı, bölgesel veya endüstriyel, aşağıdakiler dışında doğal gaz	0	0	0	0	0	0
Polikarbonat	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	4,6
Toz boya, alüminyum levha	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,4
Sentetik kauçuk	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	1,2
Musluk suyu	0	0	0	0	0	0
Transistör, kablolu, küçük boyutlu, delikli montaj	8,1	8,7	9	9	8,6	4,7
Kaynak, ark, alüminyum	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Baskılı kablolama panosu, karışık monteli, belirtilmemiş, lehim karışımı, bitki	3,3	3,5	3,6	3,6	3,4	1,9
Çelik, düşük alaşımlı	1,3	0,6	0,6	0,6	0,7	0,3
Alüminyum, döküm alaşım2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fotovoltaik laminat üretimi, tek-Si fotovoltaik laminat	0	0	0	0	0	43,6
Toplam	100	100	100	100	100	100



Şekil 5.2 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü üretim envanter senaryo sonuçları

5.2.7 Tüm Yaşam Döngüsü Senaryoların Karşılaştırmaları

Bu bölümde Hop ve Xiaomi M365 e-skuterler için tanımlanan altı farklı senaryonun, tüm yaşam döngüsünü kapsayan çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Analizler, retim, uluslararası ulaşım, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarını içerecek şekilde toplam sera gazı salımlarını gram CO₂-eşd/km cinsinden sunmaktadır. Değerlendirme, e-skuter başına bir kilometrelik kullanım bazında yapılmıştır.

Hop modelinde en yüksek toplam sera gazı salımı, gövdeye PV panel bütünleştirilmesi senaryosunda gerçekleşmiş olup 32,749 g CO₂-eşd/km olarak hesaplanmıştır. Bu senaryoda özellikle üretim aşaması, 31,6966 g CO₂-eşd/km ile tüm yaşam döngüsünün %96,8'sinde yer alan aşaması oluşturmaktadır. Süspansiyon ekleme senaryosu ise 22,7076 g CO₂-eşd/km üretim salımı ile orta düzeyde bir çevresel yk getirmiş; düşük kullanım aşaması 0,4981 g CO₂-eşd/km sayesinde toplam salım 23,258 g CO₂-eşd/km ile en düşük değerlere yaklaşmıştır. En düşük toplam değer ise istasyonlarda PV kullanımı senaryosunda 25,709 g CO₂-eşd/km elde edilmiştir. Burada retim yükü düşük seviyedeyken kullanım aşamasıda yalnızca 3,4945 g CO₂-eşd/km ile dikkat çekmiştir. Temel durumda ise toplam yaşam döngüsü salımı 33,797 g CO₂-eşd/km olup, PV panel entegrasyonuna sahip senaryoya kıyasla yalnızca %3,2 daha yüksektir (Tablo 5.53, Tablo 5.54).

Xiaomi M365 modelinde ise sonuçlar daha belirgindir. PV panel entegre edilen senaryoda toplam yaşam döngüsü salımı 29,958 g CO₂-eşd/km ile en yüksek değer olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, PV laminatların üretim aşamasında oluşturduğu yüksek salımın yanı sıra kullanım sırasında sağladığı elektrik katkısının yeterince dengeleyici olmamasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, en düşük çevresel yk süspansiyon senaryosunda gözlemlenmiş; toplam değer yalnızca 15,914 g CO₂-eşd/km olmuştur. Bu senaryoda üretim değeri 15,3041 g CO₂-eşd/km, kullanım ise 0,5739 g CO₂-eşd/km değerinde hesaplanmıştır. Temel senaryo 26,868 g CO₂-eşd/km, İstanbül'da üretim 25,253 g CO₂-eşd/km ve PV destekli üretim ise 24,761 g CO₂-eşd/km değerine sahiptir. En dikkat çekici senaryo, istasyonlarda PV kullanılması olup, toplam salımı yalnızca 17,692 g CO₂-eşd/km seviyesine çekmiştir. Bu sonuç, kullanım sırasında doğrudan şebekeye bağımlılığı azaltmasıyla açıklanabilir (Tablo 5.55, Tablo 5.56).

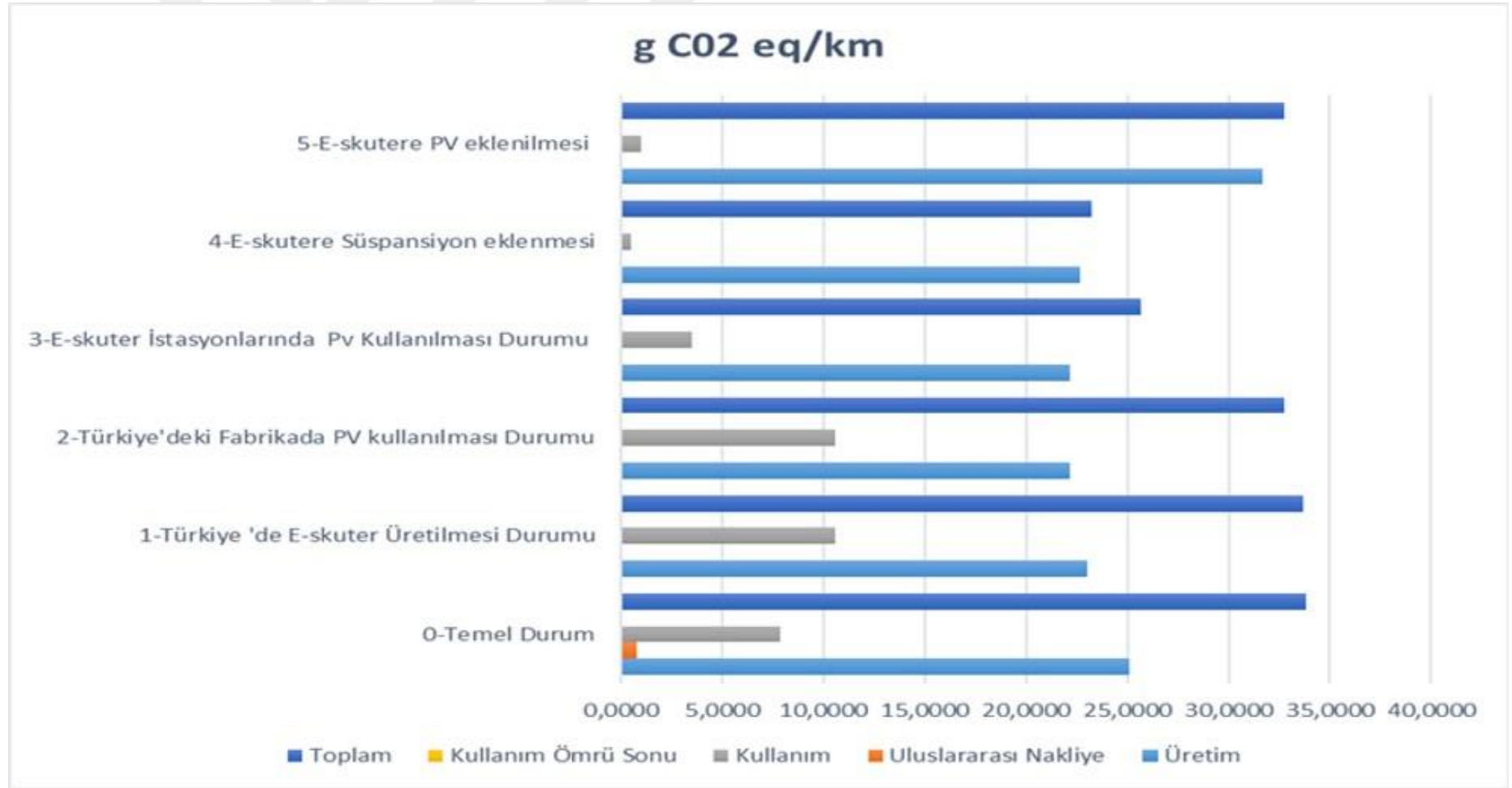
Her iki modelde de PV panelin doğrudan araca bütünleştirilmesi senaryosu, yüksek üretim yükü sebebiyle çevresel açıdan en maliyetli çözüm olarak öne çıkmaktadır (Şekil 5.3, Şekil 5.4). Buna karşılık, süspansiyon sistemi entegre edilen senaryolar, kullanım ömrü boyunca düşük enerji tüketimi ve uzun süreli dayanıklılık sağlamaları nedeniyle en düşük çevresel etkiyi sunan seçenekler olmuştur. İstanbul’da üretim ve yenilenebilir enerji ile üretim senaryoları ise istikrarlı bir iyileşme sağlamakta, hem üretim hem de ulaşım aşamalarındaki salımları düşürmektedir (Tablo 5.53, Tablo 5.55).

Tablo 5.53 Hop e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları

Hop E-skuter	Birim	Üretim	Uluslararası Nakliye	Kullanım	Kullanım Ömrü Sonu	Toplam
0-Temel Durum	g CO ₂ -eşd/km	25,0823	0,8232	7,8903	0,0008	33,797
1-İstanbul’da E-skuter Üretilmesi Durumu	g CO ₂ -eşd/km	23,0470	0,0572	10,5640	0,0008	33,669
2-İstanbul’daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	22,1568	0,0572	10,5640	0,0008	32,779
3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	22,1568	0,0572	3,4945	0,0008	25,709
4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	g CO ₂ -eşd/km	22,7076	0,0518	0,4981	0,0008	23,258
5-E-skutere PV eklenilmesi	g CO ₂ -eşd/km	31,6966	0,0607	0,9906	0,0008	32,749

Tablo 5.54 Hop e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçların yüzdelik değerleri

Hop E-skuter	Birim	Üretim	Uluslararası Nakliye	Kullanım	Kullanım Ömrü Sonu	Toplam
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0-Temel Durum	g CO ₂ -eşd/km	74,2	2,4	23,3	0	100
1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu	g CO ₂ -eşd/km	68,5	0,2	31,4	0	100
2-İstanbul'daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	67,6	0,2	32,2	0	100
3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	86,2	0,2	13,6	0	100
4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	g CO ₂ -eşd/km	97,6	0,2	2,1	0	100
5-E-skutere PV eklenilmesi	g CO ₂ -eşd/km	96,8	0,2	3	0	100



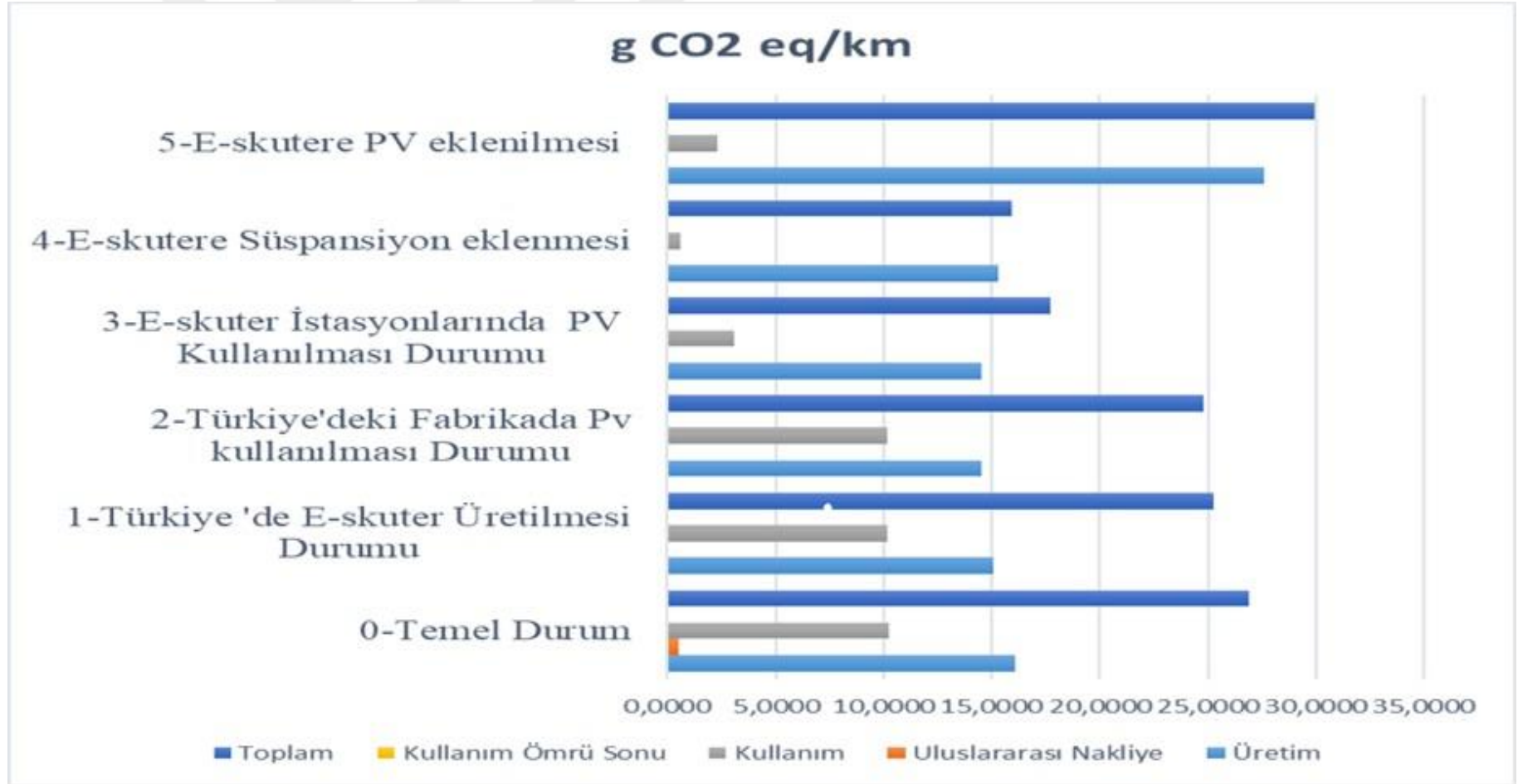
Sekil 5.3 Hop e-skuter yaşam döngüsü senarvo sonuçları

Tablo 5.55 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları

Xiaomi M365 E-skuter	Birim	Üretim	Uluslararası Nakliye	Kullanım	Kullanım Ömrü Sonu	Toplam
0-Temel Durum	g CO ₂ -eşd/km	16,0878	0,5387	10,2406	0,0011	26,868
1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu	g CO ₂ -eşd/km	15,0409	0,0374	10,1739	0,0011	25,253
2-İstanbul'daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	14,5486	0,0374	10,1739	0,0011	24,761
3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	14,5486	0,0374	3,1044	0,0011	17,692
4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	g CO ₂ -eşd/km	15,3041	0,0349	0,5739	0,0011	15,914
5-E-skutere PV eklenilmesi	g CO ₂ -eşd/km	27,6310	0,0423	2,2834	0,0011	29,958

Tablo 5.56 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçların yüzdelik değerleri

Xiaomi M365 E-skuter	Birim	Üretim	Uluslararası Nakliye	Kullanım	Kullanım Ömrü Sonu	Toplam
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0-Temel Durum	g CO ₂ -eşd/km	59,9	2	38,1	0	100
1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu	g CO ₂ -eşd/km	59,6	0,1	40,3	0	100
2-İstanbul'daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	58,8	0,2	41,1	0	100
3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	g CO ₂ -eşd/km	82,2	0,2	17,5	0	100
4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	g CO ₂ -eşd/km	96,2	0,2	3,6	0	100
5-E-skutere PV eklenilmesi	g CO ₂ -eşd/km	92,2	0,1	7,6	0	100



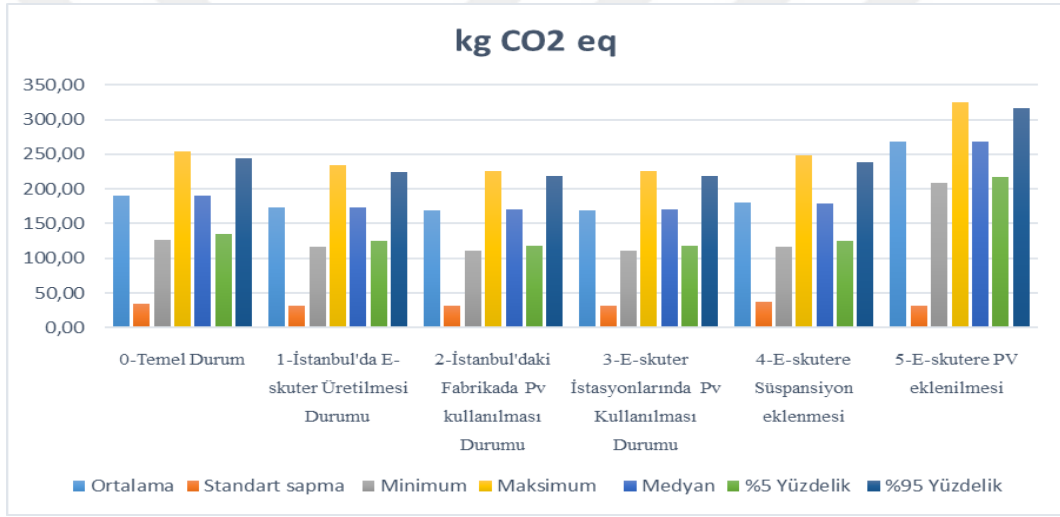
Şekil 5.4 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü senaryo sonuçları

5.3 Monte Carlo Sonuçlarının Yorumu

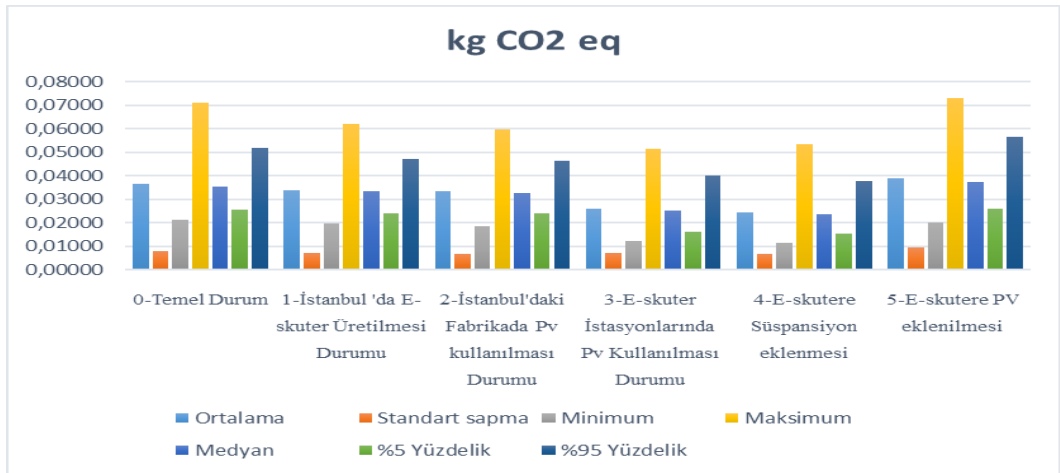
Monte Carlo benzetimi, belirsizliklerin etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş ve Xiaomi M365 modeline ait farklı üretim ve yaşam döngüsü senaryolarının çevresel performansındaki değişkenlikler detaylı şekilde analiz edilmiştir. Benzetimler, her bir senaryo için ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler ile %5 ve %95 yüzdelerik dilim sonuçlarını sunmakta; böylece sistematik ve rassal belirsizliklerin etkisi ortaya konulmaktadır. Üretim fazına ilişkin bulgular aşağıda sunulmuştur (Tablo 5.57). Temel durumda üretim kaynaklı ortalama sera gazı salımı 190,56 kg CO₂-eşd, maksimum ise 253,46 kg CO₂-eşd olarak belirlenmiştir. İstanbul'da üretim senaryosunda ortalama değer 173,87 kg CO₂-eşd ile %8,7 daha düşük olup; maksimum değeri ise 233,83 kg CO₂-eşd olarak kaydedilmiştir. İstanbul'daki fabrikada PV kullanılması ve istasyonlarda PV kullanılması senaryoları da ortalama olarak sırasıyla 169,60 kg CO₂-eşd değerine sahiptir ve temel senaryoya göre %11 civarında azalma sağlamaktadır. Süspansiyon eklenmesi senaryosu ortalama 180,88 kg CO₂-eşd değeri ile orta düzeyde bir etkiye sahiptir. Buna karşın, e-skutere PV panel bütünleştirilmesi senaryosu üretim aşamasında en yüksek çevresel etkiyi oluşturarak ortalama 267,92 kg CO₂-eşd, maksimum 324,26 kg CO₂-eşd değerine ulaşmıştır. Ayrıca bu senaryonun %95 yüzdelerik değeri 316,52 kg CO₂-eşd ile diğer tüm senaryoların oldukça üzerindedir (Tablo 5.57). Bu durum, PV laminat üretim süreçlerindeki yüksek belirsizlik ve enerji yoğunluğuna işaret etmektedir.

Yaşam döngüsü aşamasındaki Monte Carlo analizleri aşağıda yer almaktadır (Tablo 5.54). Temel senaryoda yaşam döngüsü başına ortalama salım 0,03660 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmış; %95 yüzdelerik değeri ise 0,05166 kg CO₂-eşd seviyesindedir. İstanbul'da üretim senaryosunda bu ortalama 0,03396 kg CO₂-eşd'ye, PV kullanılan üretim senaryosunda ise 0,03345 kg CO₂-eşd'ye düşmüştür. İstasyonlarda PV kullanımı senaryosu, ortalama değeri 0,02614 kg CO₂-eşd ile en düşük çevresel etkiye sahip ikinci seçenek olarak öne çıkmaktadır. Süspansiyon senaryosu da düşük üretim ve kullanım salımlarıyla birlikte ortalama 0,02453 kg CO₂-eşd değerine sahip olup, %95 yüzdelerik sınırı yalnızca 0,03779 kg CO₂-eşd olarak en düşük senaryo olarak öne çıkmaktadır. Bu, hem belirsizliğin düşük hem de çevresel etkinin sınırlı olduğunu göstermektedir. PV entegrasyonlu senaryo ise yaşam döngüsü boyunca ortalama 0,03876 kg CO₂-eşd ile en yüksek etkiye

sahiptir. %95 yüzdelik değeri 0,05664 kg CO₂-eşd seviyesindedir ve bu, diğer tüm senaryolardan belirgin şekilde yüksektir (Tablo 5.58). Sonuç olarak, Monte Carlo analizleri göstermektedir ki, PV panel entegrasyonu dışındaki tüm senaryolar temel duruma göre çevresel avantaj sağlamaktadır (Şekil 5.5, Şekil 5.6). Özellikle PV kaynaklı üretim senaryoları, salımları düşürmekte ancak yaşam döngüsü üzerindeki etkisi sınırlı kalmaktadır. Süspansiyon entegrasyonu, üretim açısından küçük artışlara sebep olsa da yaşam döngüsü performansı bakımından en istikrarlı ve düşük belirsizlik taşıyan senaryo olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, belirsizlik dâhilinde dahi sürdürülebilir sonuçlar sunabilen yaklaşımlar, yalnızca mutlak salım değeriyle değil, varyans ve güven aralığı ile birlikte değerlendirilmelidir (Tablo 5.57, Tablo 5.58)



Şekil 5.5 Xiaomi M365 e-skuter üretim Monte Carlo sonuçları



Şekil 5.6 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü Monte Carlo sonuçları

Tablo 5.57 Xiaomi M365 e-skuter üretim Monte Carlo sonuçları

Xiaomi M365 E-skuter (Üretim)	0-Temel Durum	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu	2- İstanbul'daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	5-E-skutere PV eklenilmesi
Referans birim	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd
Ortalama	190,56	173,87	169,60	169,60	180,88	267,92
Standart sapma	35,07	31,72	31,83	31,83	36,74	32,45
Minimum	126,51	116,13	111,44	111,44	117,34	208,60
Maksimum	253,46	233,83	226,27	226,27	248,05	324,26
Medyan	190,41	173,57	170,72	170,72	179,69	268,80
%5 Yüzdelik	134,95	125,16	118,58	118,58	125,89	216,83
%95 Yüzdelik	244,39	224,21	217,95	217,95	238,49	316,52

Tablo 5.58 Xiaomi M365 e-skuter yaşam döngüsü Monte Carlo sonuçları

Xiaomi M365 E-skuter (Yaşam Döngüsü)	0-Temel Durum	1-İstanbul'da E-skuter Üretilmesi Durumu	2-İstanbul'daki Fabrikada PV kullanılması Durumu	3-E-skuter İstasyonlarında PV Kullanılması Durumu	4-E-skutere Süspansiyon eklenmesi	5-E-skutere PV eklenilmesi
Referans birim	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd	kg CO ₂ -eşd
Ortalama	0,03660	0,03396	0,03345	0,02614	0,02453	0,03876
Standart sapma	0,00794	0,00718	0,00689	0,00731	0,00683	0,00939
Minimum	0,02105	0,01960	0,01840	0,01219	0,01125	0,02006
Maksimum	0,07094	0,06204	0,05963	0,05151	0,05347	0,07294
Medyan	0,03553	0,03328	0,03261	0,02515	0,02362	0,03733
%5 Yüzdelik	0,02572	0,02389	0,02382	0,01605	0,01533	0,02606
%95 Yüzdelik	0,05166	0,04700	0,04617	0,04024	0,03779	0,05664

6.1 Bulguların Literatürle Karşılaştırılması

Bu çalışmada, Hop ve Xiaomi M365 e-skuterler için yaşam döngüsü analizine (YDA) dayalı olarak geliştirilen altı senaryonun çevresel performansları değerlendirilmiş ve literatürdeki benzer araştırmalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, mikromobilité sistemlerinin çevresel etkisinin özellikle üretim ve kullanım fazındaki değişkenlere oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir.

Hop e-skuterlerinde temel senaryo toplam sera gazı salımı 33,797 g CO₂-eşd/km olarak hesaplanmıştır. İstanbul'da üretim ve PV destekli üretim senaryolarında bu değerler sırasıyla 33,669 ve 32,779 g CO₂-eşd/km'ye düşmüştür. En düşük değer ise süspansiyon eklenmesi senaryosunda 23,258 g CO₂-eşd/km hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Xiaomi M365 e-skuterinde temel durumda değeri 26,868 g CO₂-eşd/km, en düşük değer ise süspansiyon senaryosunda 15,914 g CO₂-eşd/km olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.53, Tablo 5.55). Bu veriler, model bazında %30'dan fazla iyileşme potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, Hollingsworth ve diğ. (2019) tarafından paylaşımlı e-scooterlar için yapılan çalışmayla karşılaştırıldığında tutarlıdır [3]. Söz konusu çalışmada, 12,5 kg olan bir dockless skuterin yaşam döngüsü iki yıl boyunca kullanılmasını sağlaması durumunda ortalama yaşam döngüsü salımlarını 141 g CO₂-eşd/yolcu-mil'le düşürür olarak belirlenmiş ve Monte Carlo analizi sonuçlarında 202 g CO₂'nin ortalama bir değer olarak belirlenmiştir [3]. Bu değerler, bizim çalışmamızda hesaplanan 12,5 kg olan Xiaomi M365 e-skuterin temel durumda 7500 km kullanım ömrünün dikkate alındığımız 201,510 g CO₂-eşd değeri gösterir. Bu da makalenin yaptığımız tez çalışması ile ortaya konulan sonuçların örtüşmekteğini göstermektedir. Hop e-skuter için bu karşılaştırma yapmak doğru

olmaz çünkü hem e-skuterin ağırlık olarak fazla olması ve kullanım ömrünün dockless skutere göre uzun olmasından dolayıdır.

De Bortoli ve Christoforou (2020) ise Paris'te paylaşımlı skuterlerin ortalama GWP değerini 91 g CO₂-eşd/km olarak vermiştir [40]. Lizbon'da yapılan yaşam döngüsü analizinde ise bu değer 85–120 g CO₂-eşd/km aralığında rapor edilmiştir [67]. Dolayısıyla bu tez çalışmasının değerleri, özellikle bireysel kullanım senaryosu varsayıldığı için, paylaşımlı sistemlere göre oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Bu da, araçların paylaşım döngüsündeki lojistik süreçlerinin (toplama, şarj, bakım) çevresel yükü ciddi biçimde artırdığını ortaya koyan sonuçlarla örtüşmektedir [3], [68].

Süspansiyon eklenmesi senaryosunda elde edilen düşük toplam değer, literatürde yeterince vurgulanmamış bir sonucu desteklemektedir. Riga'da yapılan bir araştırmada dayanıklılığı artıran donanımların kullanım süresini uzattığı ve böylece kilometre başına çevresel etkinin azaldığı gösterilmiştir [69]. Bu tezde de benzer şekilde, Xiaomi M365 modelinde süspansiyon ile donatılan versiyonun kilometre başına salımı 15,914 g CO₂-eşd/km seviyesine inmiş, bu değer en yakın literatür verisinden dahi %70 daha düşük olmuştur.

E-skutere PV panel entegrasyonu yapılan senaryoda ise Hop modeli için 32,749 g CO₂-eşd/km, Xiaomi modeli için ise 29,958 g CO₂-eşd/km değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, görünüşte temel senaryodan sadece %10–20 daha düşük gibi görünse de, YDA çalışmalarıyla karşılaştırıldığında üretim yükünün çok arttığı ve bu nedenle kullanımda elde edilen kazancın dengelenemediği anlaşılmaktadır. Lin ve Huang (2021), Tayvan'da PV destekli skuter sistemlerinde üretim kaynaklı salımların %35 daha yüksek olduğunu ve kullanımda sadece %8–10 iyileşme sağlandığını belirtmiştir [70]. Bu bulgular, tezdeki analizlerle oldukça benzerlik göstermektedir.

Ayrıca bu çalışmanın Monte Carlo analiziyle belirsizlikleri değerlendirmesi, literatürde önerilen ancak nadiren uygulanan bir yaklaşımdır. Navarro ve diğ. (2021), Barselona'daki YDA çalışmasında istatistiksel varyansın sonuçlar üzerindeki etkisini %15'e kadar değiştirebildiğini rapor etmiştir [71]. Tezde yer alan bu durum sayısal olarak desteklenmiş (Tablo 5.53, Tablo 5.54). Xiaomi için PV senaryosunun %95 üst limiti 0,05664 kg CO₂-eşd/km gibi kritik bir değere

çıkıştır. Bu da karar vericilerin ortalama değil, güven aralığı odaklı değerlendirme yapmasının önemini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının bulguları hem yönsel hem de niceliksel olarak uluslararası literatürle büyük ölçüde örtüşmektedir. Üstelik e-skuterler özelinde, üretim yeri, şarj ve donanım özelliklerinin sistematik biçimde analiz edilmesi, mevcut araştırmalara kıyasla daha ayrıntılı bir perspektif sunmaktadır.

(Tablo 5.53, Tablo 5.55)

6.2 Sürdürülebilir Ulaşım Politikalarına Etkileri

Bu çalışmada elde edilen bulgular, mikromobilité sistemlerinin özellikle kent içi kısa mesafeli yolculuklarda çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu potansiyel, yalnızca araçların “kullanım anı” değil, aynı zamanda üretim, bakım, enerji temini ve ömür sonu yönetimi gibi tüm yaşam döngüsü süreçleri dikkate alındığında anlam kazanmaktadır. Dolayısıyla e-skuter sistemleri, doğru planlandığında sürdürülebilir ulaşım politikalarının ayrılmaz bir parçası olabilir; aksi halde beklenen çevresel katkıyı gösterememekte ve hatta tersine etki yaratabilmektedir.

Bu tezde analiz edilen senaryolar göstermektedir ki, üretimin İstanbul’da gerçekleştirilmesi ve PV destekli tesislerde yapılması gibi yaklaşımlar, karbon salımlarında anlamlı azalmalar sağlamaktadır (Tablo 5.53, Tablo 5.55). Bu sonuçlar, Paris, Lizbon ve Lima gibi kentlerde yapılan vaka çalışmalarında da benzer şekilde gözlemlenmiştir. De Bortoli ve Christoforou (2020), e-skuterlerin gerçek anlamda sürdürülebilir bir ulaşım aracı olabilmesi için üretim ve dağıtım süreçlerinin yerelleştirilmesinin şart olduğunu vurgulamıştır [40].

Ayrıca, bu çalışmada süspansiyon sisteminin bütünleştirilmesi gibi teknik iyileştirmelerin, hem üretim kaynaklı salımları düşük tutması hem de kullanıcı konforunu artırarak sistemin kullanım ömrünü uzatması nedeniyle çevresel performansı olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, mikromobilitenin sürdürülebilirliği üzerine yapılan son sistematik literatür taramalarıyla da örtüşmektedir [4]. Sürdürülebilir bir mikromobilité stratejisi yalnızca karbon salımı azaltımına değil, aynı zamanda kullanım ömrünü

uzatmaya, bakım sıklığını azaltmaya ve kaynak verimliliğini artırmaya da odaklanmalıdır.

PV panel entegrasyonu gibi yüksek teknoloji içeren çözümler ise bu analiz kapsamında dikkatli değerlendirilmelidir. PV panelin üretim kaynaklı salım yükü, kullanımda sağladığı enerji katkısını gölgede bırakacak düzeydedir. Riga ve Tayvan örneklerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir [69], [70]. Bu durum, politika yapıcılarının yalnızca “yenilenebilir enerji” gibi kavramların cazibesine kapılmadan, her çözümün yaşam döngüsü düzeyinde analizini yapmaları gerektiğini göstermektedir.

Bulgular ayrıca, şarj altyapısında yenilenebilir enerji kaynaklarının zorunlu hale getirilmesi, dayanıklı ve modüler e-skuter tasarımının teşvik edilmesi, süreç içi karbon ayak izinin düzenli raporlanması, ve paylaşımlı sistemlerde lojistik optimizasyonun zorunlu tutulması gibi politika araçlarının etkinliğini desteklemektedir. Lizbon’da yürütülen e-skuter YDA çalışmasında, istasyon bazlı PV kullanımının toplam yaşam döngüsü salımını %15 azaltabileceği ortaya konmuştur [67].

Bununla birlikte, İstanbul’daki e-skuter uygulamalarında, karbon ayak izi düşük süspansiyon sistemlerinin örnek alınarak tasarım ve üretim süreçlerine bütünleştirilmesi mümkündür. Bu politikalar, sadece son kullanıcı davranışlarını değil, sistemin üretim ve dağıtım stratejilerini de doğrudan etkilemektedir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen senaryolar, e-skuter sistemlerinin kentsel ulaşımın sürdürülebilirliğine katkı sunabilmesi için çok boyutlu bir politika yaklaşımına ihtiyaç duyduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu politikalar; teknik tasarım, enerji altyapısı, üretim lokasyonu ve kullanım süresi gibi unsurları entegre şekilde ele alan, veri temelli ve yaşam döngüsü odaklı olmalıdır.

6.3 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Güçlü Yönleri

Bu çalışma, mikromobilité sistemlerinin çevresel performansını yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) yöntemiyle inceleyen ve Hop ile Xiaomi M365 modellerini farklı senaryolar altında karşılaştıran özgün bir analiz ortaya koymaktadır. Literatürdeki birçok YDA çalışması, tek model veya sınırlı senaryo ile analiz yaparken, bu tez çalışması altı farklı üretim ve kullanım senaryosu

kapsamında sistematik bir değerlendirme sunarak, İstanbul özelinde sürdürülebilir mikromobilité altyapısının planlanmasına yönelik değerli bulgular ortaya koymuştur.

Çalışmanın güçlü yönlerinden ilki, kapsamlı senaryo çeşitliliği ve her senaryonun üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsünün analiz edilmesidir. Bu yönüyle, yalnızca “kullanım sıfır salımlıdır” varsayımının ötesine geçilerek, e-skuter sistemlerinin gerçek çevresel etkileri ortaya konmuştur. Süspansiyon entegrasyonu ve PV panel uygulaması gibi farklı teknik senaryoları YDA düzeyinde analiz edilmesi, literatürde nadir görülen bir yaklaşımdır ve çalışmayı özgün kılmaktadır [68].

İkinci önemli güçlü yön, Monte Carlo benzetimi kullanılarak belirsizliklerin istatistiksel olarak modellenmesidir. Literatürde belirsizliklerin çoğu zaman göz ardı edildiği veya sabit varsayımlarla sınırlandırıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise her senaryo için %5–%95 güven aralıkları belirlenmiştir. Bu durum, sürdürülebilirlik analizlerinde sadece ortalama değerlerin değil, sonuçlardaki varyansın da karar vericiler için kritik önemde olduğunu ortaya koymuştur [71], [72].

Üçüncü güçlü yön ise İstanbul bağlamında yürütülen ilk kapsamlı mikromobilité YDA uygulamalarından biri olmasıdır. İstanbul’da üretim yapılması, yerli PV sistemlerinin kullanılması gibi senaryolar, yerel altyapının sürdürülebilir ulaşım sistemlerine etkisini nicel olarak değerlendirmiştir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca akademik katkı sunmakla kalmamış, aynı zamanda belediyelere, ulaşım planlamacılarına ve özel sektör uygulayıcılarına veri tabanlı yönlendirmeler sağlamıştır.

Buna karşılık çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. En önemli sınırlılık, değerlendirme kapsamının yalnızca küresel ısınma potansiyeli (GWP, CO₂-eşd) ile karşılaştırılmış olmasıdır. Su tüketimi, asidifikasyon, fotokimyasal ozon oluşumu gibi diğer çevresel etki kategorileri bu çalışmada tablolar halinde bilgi verilmiştir. Oysaki bazı donanım elemanlarının su ayak izi ya da toksik etkileri açısından da ciddi sonuçlar doğurabileceği bilinmektedir [3].

Bir diğer sınırlılık, kullanım verilerinin varsayımlara dayanmasıdır. Ancak bu tez çalışmasında, bu faktörlerin tümü sabit kabul edilmiş ve ortalama kullanım

değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla bu yönüyle, çalışmanın senaryolar arası karşılaştırma gücü yüksek olsa da gerçek dünya performansını yansıtma düzeyi sınırlıdır.

Ayrıca Hop e-skutere ait bazı üretim envanter verileri literatür tahminleri ve firma beyanlarına dayalı olarak modellenmiştir. Özellikle parça bazlı malzeme yoğunluğu ya da üretim enerjisi gibi verilerde firmalar arası farklılıklar olabileceğinden, bu durum sonuçlarda sınırlı da olsa bir belirsizlik kaynağıdır. Ancak Monte Carlo analizleri ile bu risk azaltılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma YDA temelli mikromobilité analizleri içinde hem senaryo çeşitliliği hem de yöntem derinliği ile dikkat çekmektedir. Sınırlılıklarına rağmen, sağlam veri temeli, belirsizlik analizi ve İstanbul bağlamında yerel odaklı değerlendirme yapması sayesinde sürdürülebilir ulaşım sistemleri tasarımı ve politika önerileri açısından yüksek katma değer sunmaktadır.

7 SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, İstanbul’da yaygın olarak kullanılan iki farklı paylaşımlı elektrikli skuter modeli olan Hop ve Xiaomi M365’in yaşam döngüsü analizleri (YDA) gerçekleştirilmiştir. Üretim, ulaşım, kullanım ve ömür sonu aşamalarına ilişkin çevresel etkiler ayrı ayrı değerlendirilmiş; beş sürdürülebilirlik senaryosu altında bu etkilerin nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca Xiaomi M365 modeli için Monte Carlo benzetimi ile seçilen yedi parametredeki belirsizliklerin sistem performansına etkileri değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, her iki modelde de en yüksek çevresel etki üretim ve kullanım aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Hop modelinde üretim kaynaklı salım 257,971 kg CO₂-eşd iken, Xiaomi M365 modelinde bu değer 120,659 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır. Bu farkın temel nedeni, Hop modelinin gövde ve batarya yapısının daha ağır olmasıdır. Nakliye aşamasında ise Çin’den taşınan araçlar için yüksek salım değerleri gözlenmiş; yerli üretim senaryosu ile bu etki %18–20 oranında azaltılmıştır.

Senaryo analizleri sonucunda, özellikle e-skutere süspansiyon eklendiği senaryolar çevresel performansı önemli ölçüde iyileştirmiştir. Xiaomi M365 için süspansiyon eklendiği senaryosunda toplam GWP %40,78 daha düşük bulunmuş; Hop e-skuterin ise bu oran %31,19’tür.

Monte Carlo benzetimi ile analiz edilen yedi parametre arasında, özellikle kullanım ömrü, enerji tüketimi ve şarj başına gidilen mesafe gibi faktörlerin GWP üzerinde yüksek varyans oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, karar vericilerin ortalama değerlere değil, güven aralıklarına dayalı stratejiler belirlemesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tez bulguları, aşağıdaki önerileri ortaya koymaktadır:

- İstanbul’da e-skuter üretiminin teşvik edilmesi, ithalattan kaynaklanan ulaşım salımlarını azaltacaktır.
- Üretim tesislerinde ve istasyonlarda PV kullanımı desteklenmeli, böylece şarj kaynaklı salımlar düşürülebilir.
- Kullanım ömrünü uzatan teknik iyileştirmeler (örneğin süspansiyon bütünleştirilmesi) yaygınlaştırılmalı; bu sayede hem bakım sıklığı hem de parça değişimi azaltılabilir.
- Yerel yönetimler, PV destekli şarj altyapılarına yatırım yapmalı ve mikromobilité kullanımını artıracak yollar planlamalıdır.
- Üreticiler, modüler tasarıma ve geri dönüştürülebilir malzeme kullanımına yönlendirilmelidir.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca iki e-skuter modeli üzerinden sınırlı kalmayıp, aynı zamanda üretim yeri, enerji türü, tasarım özellikleri gibi parametrelerin sistematik biçimde yaşam döngüsü boyunca etkilerini ortaya koymuştur. Mikromobilité sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından çevresel etkilerini değerlendirirken, yalnızca bugünün teknolojik koşullarına değil, geleceğin sistem ihtiyaçlarına da odaklanmak gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılacak daha kapsamlı, çok boyutlu ve senaryo temelli çalışmalar, kentlerin düşük karbonlu ulaşım politikalarının tasarımına doğrudan katkı sunacaktır. Gelecek çalışmalarda, sosyal ve ekonomik etkilerin de entegre edildiği çok kriterli yaşam döngüsü analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] “Elektrikli scooter nedir- birlashop,” Tutkusu Kalite Olanlar İçin, Birlashop, <https://www.birlashop.com/blog/icerik/elektrikli-scooter-nedir>, erişim:05.06.2025.
- [2] Ecoinvent Centre (2021), Ecoinvent Data v3. 8, Zurich, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2021.
- [3] J. Hollingsworth, B. Copeland, and J. X. Johnson, “Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters,” *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 8, p. 084031, Aug. 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab2da8.
- [4] S. Gössling, “Integrating e-scooters in urban transportation: problems, policies, and the prospect of system change,” *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 79, p. 102230, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102230.
- [5] Anonim (2025), https://tr.wikipedia.org/wiki/Scooter_payla%C5%9F%C4%B1m_sistemi#cite_note-16, erişim: 23.04.2025
- [6] Dündar, S., Şentürk Berktaş, E. ve Ceren Höke, M., "Modelling the effects of e-scooters in urban traffic using artificial neural networks," 2022.
- [7] Bird, “Life cycle analysis reveals vast co2 emissions gap between cars and scooters,” (2020). <https://www.bird.co/be/blog/life-cycle-analysis-CO2-emissions-gap-between-cars-scooters/>, erişim: 23.04.2025
- [8] S. Shaheen, A. Cohen, and I. Zohdy, “Shared mobility: current practices and guiding principles,” Apr. 01, 2016. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/42193>
- [9] G. Midgley, "The role of systems thinking in transport planning," *Transport Policy*, vol. 70, pp. 150–160, 2018.
- [10] I. Docherty, G. Marsden, and J. Anable, “The governance of smart mobility,” *Transportation Research Part a Policy and Practice*, vol. 115, pp. 114–125, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.09.012.
- [11] “What is micromobility and how is it changing urban commuting?” <https://www.hologram.io/blog/what-is-micromobility/>, erişim:03.02.2025
- [12] L. Shaheen ve S. Guzman, “Paylaşımlı mikromobilite ve toplu taşıma entegrasyonu”, *Transp. Res. Rec.*, cilt 2672, no. 8, s. 86–94, 2018.
- [13] D. Reck et al., "Modes of electric micro-mobility use: a european perspective," *Transportation Research Part D*, vol. 94, 2021.

- [14] S. Shaheen and A. Cohen, "Shared micromobility policy toolkit: docked and dockless bike and scooter sharing" UC Berkeley Recent Work, Apr. 2019, doi: 10.7922/G2TH8JW7, <https://escholarship.org/uc/item/00k897b5>
- [15] A. Polat, İ. Adalıoğlu, M. C. Erdoğan ve G. Sarısoy, "Paylaşımlı elektrikli skuter kullanımının araştırılması: istanbul ili örneği," Gazi Journal of Engineering Sciences, cilt 9, no. 2, ss. 360–379, Ağustos 2023. Erişim: makaleye ResearchGate ya da dergipark üzerinden ulaşabilirsiniz.
- [16] Dünder, S., Şentürk Berktaş, E., Tanyel, S. ve Günay, G., "A study on the impact of e-scooters on urban traffic," 2025.
- [17] B. Yaprak, C. Pense, A. Ercan, and S. Doğan, "Navigating the e-scooter market in türkiye: a theory-guided qualitative analysis," Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 264–284, Mar. 2025, doi: 10.51513/jitsa.1632459.
- [18] N. Zuniga-Garcia, M. Tec, J. G. Scott, and R. B. Machemehl, "Evaluation of e-scooters as transit last-mile solution," Transportation Research Part C Emerging Technologies, vol. 139, p. 103660, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.trc.2022.103660.
- [19] C. S. Kopplin, B. M. Brand, and Y. Reichenberger, "Consumer acceptance of shared e-scooters for urban and short-distance mobility," Transportation Research Part D Transport and Environment, vol. 91, p. 102680, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2020.102680.
- [20] J. Hobusch, N. Kostorz, G. Wilkes, and M. Kagerbauer, "E-Scooter – freizeitspaß oder alternatives mobilitätsangebot? = e-scooter- just for fun or an alternative mobility service," 2021. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000129770>
- [21] J. Degele, A. Gorr, K. Haas, D. Kormann, S. Krauss, P. Lipinski, M. Tenbih, C. Koppenhoefer, J. Fauser, D. Hertweck, "Identifying e-scooter sharing customer segments using clustering," 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), pp. 1–8, Jun. 2018, doi: 10.1109/ice.2018.8436288.
- [22] Günay, G., Dünder, S. ve Dilekçi, S., "Effects of automobile ownership on e-scooter choices: the istanbul case," Cities, cilt 165, s. 106161, 2025.
- [23] E. Y. Özeltürkay, D. Yalçıntaş ve S. Oğuz, "E-Scooter kullananlar ve kullanmayanlar açısından e-scooter kullanmanın yararları ve engelleri: pilot bir çalışma," Sosyal ve Mesleki Hayatta İnovatif Yaklaşımlar, cilt 7, sy. 1, ss. 14–26, 2023, Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3056590>
- [24] Dünder, S., Alp, S., Günay, G. ve Dursun, O., "E-skuter kullanıcılarının tür seçim tercihlerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi," 1. Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Konferansı, Ankara, Türkiye, 2025.
- [25] Kadıköy Belediyesi, "Kadıköy Belediyesi'nden 'scooter' açıklaması: 'kaldıracağız...' 2023, <https://www.cumhuriyet.com.tr/turkiye/kadikoy-belediyesinden-scooter-aciklamasi-kaldiracagiz-2024329>, erişim: 18.05.2025
- [26] BBC News, "Paris, şehir merkezinde elektrikli scooter'ları yasaklamak için oy kullandı," BBC News, Temmuz 2023, <https://www.bbc.com/news/world-europe-66230074>, erişim: 19.12.2024

- [27] S. Dewey ve J. Fyhri, "E-scooter'ların çevresel etkileri: yaşam döngüsü değerlendirmesi", *Transp. Res. D*, cilt 67, s. 363–375, 2019.
- [28] P. Fishman, "The public acceptance of electric scooters: a review", *Transp. Res. A*, cilt 86, s. 123-134, 2016.
- [29] P. Fishman, M. Schepers ve T. Kamphuis, "Electric scooters: transportation culture and the role of micro-mobility", *Transp. Res. Rec.*, cilt 2542, s. 1-10, 2014.
- [30] M. Li, X. Guo ve L. Tang, "Micro-mobility in urban transportation: a systematic review," *Transp. Res. D*, cilt 93, 2021.
- [31] J. Teixeira, R. Lopes ve M. Silva, "Micromobility user behavior and impact", *J. Transp. Eng.*, cilt 147, sayı 7, 2021.
- [32] Y. Zhang and Z. Mi, "Environmental benefits of bike sharing: a big data-based analysis," *Applied Energy*, vol. 220, pp. 296–301, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.101.
- [33] Ulu, İ. M. ve Dündar, S., "Mikromobilite taşıtlarının çevre üzerindeki etkilerinin incelenmesi- istanbul bağdat caddesi örneği," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, cilt 40, no. 1, s. 149-160, 2025.
- [34] Dündar, S., Günay, G., Şentürk Berktaş, E., Karlikanovaite Balıkçı, A. ve Ulu, İ. M., "Mikromobilite- ulaşım mucizevi bir çözüm mü, yoksa bir hayal kırıklığı mı?", *İdealkent*, cilt 13, sayı 36, s. 234-253, 2022.
- [35] B. Moreau, L. Dubroca, and J. Froehly, "Life cycle assessment of electric scooters in urban transport," *Journal of Cleaner Production*, vol. 315, 2021.
- [36] Umweltbundesamt, "Electric scooters – environmental effects and regulatory needs," German Environment Agency, 2020, <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/electric-scooters-environmental-effects>, erişim:18.04.2025
- [37] A. Nikiforiadis, E. Paschalidis, N. Stamatiadis, A. Raptopoulou, A. Kostareli, and S. Basbas, "Analysis of attitudes and engagement of shared e-scooter users," *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 94, p. 102790, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102790.
- [38] D. J. Reck, H. Martin, and K. W. Axhausen, "Mode choice, substitution patterns and environmental impacts of shared and personal micro-mobility," *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 102, p. 103134, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.103134.
- [39] H. Moreau, L. De Jamblinne De Meux, V. Zeller, P. D'Ans, C. Ruwet, and W. M. J. Achten, "Dockless e-scooter: a green solution for mobility? comparative case study between dockless e-scooters, displaced transport, and personal e-scooters," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, p. 1803, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12051803.
- [40] A. De Bortoli and Z. Christoforou, "Consequential lca for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris," *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122898, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122898.

- [41] JB Guinée ve diğerleri, Yaşam döngüsü değerlendirmesi el kitabı: ISO standartlarına yönelik operasyonel rehber, Springer, 2011.
- [42] ISO 14040:2006, "Environmental management – life cycle assessment – principles and framework," 2006, <https://www.iso.org/standard/37456.html> erişim:20.03.2025
- [43] C. R. Cherry, J. X. Weinert, and Y. Xinmiao, "Comparative environmental impacts of electric bikes in China," *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 14, no. 5, pp. 281–290, May 2009, doi: 10.1016/j.trd.2008.11.003.
- [44] A. De Bortoli and Z. Christoforou, "Consequential lca for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris," *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122898, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122898.
- [45] M. Echeverría-Su, E. Huamanraime-Maquín, F. I. Cabrera, and I. Vázquez-Rowe, "Transitioning to sustainable mobility in Lima, Peru. Are e-scooter sharing initiatives part of the problem or the solution?," *The Science of the Total Environment*, vol. 866, p. 161130, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161130.
- [46] ISO 14040:2006, "Environmental management – Life cycle assessment – principles and framework," International Organization for Standardization, 2006, erişim:25.04.2025
- [47] G. Finnveden et al., "Recent developments in life cycle assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [48] J. Laurent, P. Clavreul, and T.H. Christensen, "Assessing uncertainty in lca: a review of quantitative approaches," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2895–2906, 2016.
- [49] P. B. Beaumont and K. Hughes, "Uncertainty in lca: the role of monte carlo simulation," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, pp. 100–112, 2020.
- [50] M. K. Zimmermann et al., "Assessing shared micro-mobility sustainability through probabilistic lca modeling," *Science of the Total Environment*, vol. 761, 2021.
- [51] F. Mueller and J. Bringezu, "Using monte carlo methods in transportation-related lca: a case study on electric scooters," *Transportation Research Part D**, vol. 103, 2022.
- [52] C. Mutel, "Brightway: an open source framework for life cycle assessment," *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 12, p. 236, Apr. 2017, doi: 10.21105/joss.00236.
- [53] "openLCA.org | openLCA is a free, professional Life Cycle Assessment (LCA) and footprint software with a broad range of features and many available databases, created by GreenDelta since 2006." <https://www.openlca.org/>

- [54] ISO, Environmental Management- Life Cycle Assessment- Principles and Framework (ISO 14040:2006), International Organization for Standardization, Geneva, 2006.
- [55] Ecoinvent Association, Ecoinvent Database Version 3.9, Zürich, Switzerland, 2022. <https://www.ecoinvent.org>, erişim: 20.05.2025
- [56] openlca 3.8 ecoinvent, Dataset documentation <https://v38.ecoquery.ecoinvent.org/Details/LCI/2A4BC788-D0F2-49D8-90AE-CECD4FAF3E7F/290C1F85-4CC4-4FA1-B0C8-2CB7F4276DCE>, erişim:20.05.2025
- [57] openlca 3.8 ecoinvent, Dataset documentation <https://v38.ecoquery.ecoinvent.org/Details/LCI/28323E82-59DE-4B1E-8435-88908B005543/290C1F85-4CC4-4FA1-B0C8-2CB7F4276DCE>, erişim:20.05.2025
- [58] E-skuter üretim malzemeleri: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftr.made-in-china.com%2Fco_leaderway01%2Fproduct_Scooter-Accessories-Electric-Mobility-Scooter-Repair-Parts-Self-Balancing-Electric-Scooter_eosessyoy.html&psig=AOvVaw19IckOcp7Aj7ShWGUzLT7p&ust=1752715242845000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCPDt9bObwI4DFQAAAAAdAAAAABAL, erişim:28.06.2025.
- [59] Fotovoltaik laminat malzemesi kaynak: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fturkish.alibaba.com%2Fpromotion%2Fpromotion_photovoltaiic-laminate-promotion-list.html&psig=AOvVaw2M9500687tqEr917mcl6GL&ust=1750825471217000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCKjzjambiY4DFQAAAAAdAAAAABBQ, erişim:28.06.2025.
- [60] Openlca özellikleri: belirsizlik analizi, <https://support.ecoinvent.org/uncertainties>, erişim: 28.06.2025.
- [61] openLCA Resmi Dokümantasyon. (2024). OpenLCA kullanım kılavuzu, https://greendelta.github.io/openLCA2-manual/advanced_top/monte_carlo.html, erişim: 28.06.2025.
- [62] P. Liu, L. Liu, X. Xu, Y. Zhao, J. Niu, and Q. Zhang, "Carbon footprint and carbon emission intensity of grassland wind farms in Inner Mongolia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 313, p. 127878, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127878.
- [63] M. F. Astudillo and A. Azarijafari, "Guidelines for parameters in transport LCA: A focus on micromobility," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, pp. 1844–1857, 2021. doi: 10.1007/s11367-021-01942-6.
- [64] A. T. Hendrickson et al., "Modeling variability and uncertainty in electric scooter environmental performance using monte carlo simulation," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 95, p. 102854, 2021. doi: 10.1016/j.trd.2021.102854.
- [65] Ş. Güleç and A. Tok, "Elektrikli mikromobilite araçlarının yaşam döngüsü değerlendirmesi: Türkiye örneği," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*,

- vol. 10, no. 2, pp. 598–608, 2022. [Çevrim içi]. Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jesd>
- [66] N. Breetz, "How long do shared e-scooters last? An empirical analysis of fleet longevity," *Res. Transp. Econ.*, vol. 90, p. 101080, 2021. doi: 10.1016/j.retrec.2021.101080.
- [67] A. F. Reis, P. Baptista, and F. Moura, "How to promote the environmental sustainability of shared e-scooters: A life-cycle analysis based on a case study from Lisbon, Portugal," *Journal of Urban Mobility*, vol. 3, p. 100044, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.urbmob.2022.100044.
- [68] J. Schünemann, N. Schelte, S. Finke, and S. Severengiz, "Life cycle assessment of the tier mobility e-scooter sharing systems using the tier v e-scooter," Aug. 2021, <https://production.web.cms.tier.exu.dev/uploads/TIER-V-LCA-Publication.pdf>.
- [69] A. Rubenis, A. Laizans, and A. Zvirbule, "Effect of shared electric scooters on urban green house gas emissions: case of Rīga," *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, vol. 22, pp. 247–258, Dec. 2022, doi: 10.5593/sgem2022v/4.2/s19.31.
- [70] Y.-H. Chien, I.-Y. L. Hsieh, and T.-H. Chang, "Beyond personal vehicles: how electrifying scooters will help achieve climate mitigation goals in Taiwan," *Energy Strategy Reviews*, vol. 45, p. 101056, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.esr.2023.101056.
- [71] P. Felipe-Falgas, C. Madrid-Lopez, and O. Marquet, "Assessing environmental performance of micromobility using LCA and self-reported modal change: the case of shared e-bikes, e-scooters, and e-mopeds in Barcelona," *Sustainability*, vol. 14, no. 7, p. 4139, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14074139.
- [72] L. Gebhardt, S. Ehrenberger, C. Wolf, and R. Cyganski, "Can shared e-scooters reduce co₂ emissions by substituting car trips in germany?" *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 109, p. 103328, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103328.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Atak, D, Yardım, M. S. (2025). “Sürdürülebilirlik için E-Skuter Yaşam Döngüsü”, Grad Symposium2025-Mühendislikte Sürdürülebilir Çözümler Sempozyumu, 15 Mayıs 2025, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

