

YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ · DÖNGÜSEL ELEKTRONİK · HAKEMLİ LİTERATÜR SENTEZİ

Akıllı Telefonların Karbon Ayak İzi: Yaşam Döngüsü, Sistem Sınırları ve Onarımın Rolü

Tüketici elektroniğinde gömülü sera gazı emisyonları, fonksiyonel birim hassasiyeti, karşılığusal ikame dinamikleri ve donanım kullanım ömrünü uzatan atölye mühendislik standartlarının metodolojik incelemesi.

YAYINCI · PUBLISHER

Yeşil Teknoloji Araştırma Merkezi

Yeşil Teknoloji Research Center

RESMİ KAYNAK · OFFICIAL SOURCE

yesilteknoloji.com.tr/arastirma

Kalıcı Kanonik Araştırma Hub'ı

YAZAR · AUTHOR

Gökhan YEŞİL[Google Developer Profile](#) · [LinkedIn](#)

YAYIN TARİHİ · PUBLICATION DATE

Ekim 2026 · İzmir, Türkiye

Editoryal Sürüm 5.0 (Hakemli Sentez)

KALICI ULUSLARARASI TESCİL · DOI

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23417269>

YÖNETİCİ ÖZETİ · AMAÇ VE KAPSAM

Bu yayın; endüstriyel ekoloji alanındaki hakemli literatür bulgularını (Cordella vd., Pamminer vd., Boldoczki vd.) ve uluslararası regülasyonları (ISO 14040:2006, AB Ecodesign), bağımsız bir teknik servis sağlayıcısının saha mühendisliği perspektifiyle sentezler. Karbon muhasebesindeki aşırı basitleştirmeleri ele alarak, donanım onarımının neden tek tip, sabit bir karbon tasarrufu yüzdesiyle temsil edilemeyeceğini açıklar.

Temel İlke: Gömülü emisyonlar, bir akıllı telefonun toplam yaşam döngüsü ayak izinin %70-80'ini oluşturur. Bununla birlikte gerçek karbon tasarrufu; (1) yedek parça imalat yüküne, (2) cihazın kazandığı doğrulanmış ek kullanım ömrüne, (3) karşılığusal ikame oranına ve (4) konsolide lojistiğe doğrudan bağlıdır.

Editoryal ve Metodolojik Beyan: Yeşil Teknoloji tarafından hazırlanan kaynaklı teknik değerlendirme. Bu belge hakemli özgün laboratuvar araştırması veya şirket içi doğrulanmış bağımsız ölçüm sonucu değildir. Doğrulanmamış işletmeye özel karbon tasarrufu rakamları sunmaz.

1. Telefonun Gerçek Çevresel Yükü

Modern tüketici elektroniğinin çevresel yükü ürünün yaşam döngüsünün ilk aşamalarında yoğunlaşır. Kullanım aşamasında prizden çekilen elektrik enerjisiyle (Kapsam 2 emisyonları) baskın hale gelen beyaz eşyaların aksine, akıllı telefonlar tam tersi bir emisyon profili sergiler.

Kapsamlı beşikten-kapıya (cradle-to-gate) yaşam döngüsü analizleri, **bir akıllı telefonun toplam sera gazı (GHG) ayak izinin %70'inden fazlasının kullanıcı cihazı kutusundan çıkarmadan önce ortaya çıktığını** ortaya koymaktadır. Bu yoğun gömülü ayak izinin ana bileşenleri şunlardır:

- Yarı İletken İmalatı:** Aşırı saf silisyum gofret üretimi, aşırı ultraviyole (EUV) fotolitografi ve soygaz kullanımı yoğun Kapsam 1 ve Kapsam 2 emisyonları doğurur.
- Ekran Paneli Takımları:** OLED/AMOLED panel katmanları, alt tabaka kaplama ve sürücü entegrelerinin (IC) üretimi yüksek kimyasal ve ısı enerjisi gerektirir.
- Yüksek Yoğunluklu Baskılı Devre Kartları (PCB):** Değerli metal elektro-kaplaması (altın, bakır, gümüş, paladyum, tantal) yüksek çevresel maliyetli madencilik süreçlerine dayanır.
- Yapısal Metalurji ve Lityum Hücreler:** Alüminyum/titanyum CNC blok işleme, kobalt çıkarma ve lityum-iyon batarya hücresi sentezi önemli gömülü yük taşıyıcıdır.

2. Teknik Çerçeve: Onarım Etkisi Neden Sabit Değildir?

Sürdürülebilirlik pazarlamasında sıkça karşılaşılan bir yanılgı, donanım onarımını sabit ve otomatik bir karbon tasarrufu oranı olarak kabul etmektir. ISO 14040 metodolojisinde onarımın çevresel performansı statik değildir; birbiriyle etkileşimli 4 temel parametreye bağlıdır:

YEŞİL TEKNOLOJİ · TEKNİK İÇGÖRÜLER

Onarımın çevresel etkisi neden sabit bir oran değildir?

Araştırmaların sonuçları, karşılaştırma sınırları değiştiğinde farklılaşabilir.

1. Parça üretimi ve onarım yükü

Parça, enerji, taşıma ve başarısız onarım

2. Ek kullanım süresi

Aylar veya yıllar boyunca ek işlevsel kullanım

3. Yeni cihazı ikame etme

Onarım olmazsa kullanıcı ne satın alacaktı?

4. Veri ve sistem sınırları

Üretim coğrafyası, enerji ve LCA varsayımları

Kavramsal çerçeve — ölçülmüş Yeşil Teknoloji saha sonucu değildir.

ISO 14040/14044 ilkeleri doğrultusunda tanımlanabilecek değerlendirme değişkenleri.

Şekil 1. Kavramsal LCA çerçevesi · Akıllı telefon donanım müdahalelerinde net karbon tasarrufunu belirleyen değişkenler. Yeşil Teknoloji tarafından hazırlanmıştır.

PARAMETRE 1 & 2: PARÇA YÜKÜ VE EK KULLANIM ÖMRÜ

Her yedek parça kendi üretim ve nakliye emisyonunu taşır. Yapılan onarım cihaza yalnızca 3 ay ek ömür kazandırıyorsa, parçanın gömülü ayak izi kazanılan sürenin önüne geçebilir. 24 aylık doğrulanmış bir ömür artışı ise yüksek net tasarruf sağlar.

PARAMETRE 3 & 4: İKAME ORANI VE SİSTEM SINIRLARI

Karşılgusal taban çizgisi kritiktir: Onarım kullanıcıyı gerçekten yeni bir cihaz almaktan alıkoymakta mıdır, yoksa kullanıcı ikinci bir cihaz satın almakta mıdır? Sistem sınırları atölye elektriğini ve lojistiği mutlaka içermelidir.

3. Fonksiyonel Birimin (FU) Merkezi Rolü

Çevresel ürün beyanlarında (EPD) ve karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmelerinde, "bir adet üretilmiş telefon" ile "bir adet onarım işlemini" doğrudan kıyaslamak metodolojik bir hatadır. Sistemler ancak zaman içinde sağlanan faydayı tanımlayan ortak bir **fonksiyonel birim** üzerinden karşılaştırılabilir.

ISO 14040 FONKSİYONEL BİRİM TANIMI

"Standart çalışma koşulları altında 24 ay boyunca kesintisiz hücresel telekomünikasyon, veri işleme ve görsel kayıt hizmeti sağlanması."

Her iki alternatif de aynı 24 aylık fonksiyonel birimi sağladığında; mevcut cihazın kullanım ömrünü uzatarak orijinal gömülü karbonunu daha uzun bir süreye yaymanın, sıfırdan yeni bir telefon üretmenin getireceği beşikten-kapıya etkiye kıyasla üstünlüğü hesaplanabilir.

4. Karşılığusal İkame Oranı (Substitution Rate)

Döngüsel elektronik modellemesinde sonuçları en çok etkileyen hassas değişken **ikame oranıdır (α)**:

- $\alpha = 1.0$ (Tam İkame):** Onarılan her cihaz, sıfır bir telefonun üretilmesini ve satın alınmasını %100 oranında önler. Bu teorik tavan piyasa gerçekliğinde neredeyse hiçbir zaman gerçekleşmez.
- $\alpha = 0.5$ (Orta İkame):** Onarım işlemi yeni telefon alımını %50 olasılıkla erteler; tüketicinin yedek cihaz tutma veya model yükseltme eğilimleri dengelenir.
- $\alpha = 0.2$ (Düşük İkame):** Kullanıcı cihazı tamir ettirip çekmecede yedek tutarken aynı zamanda yeni bir ana telefon satın alır.

Güvenilir bir karbon muhasebesi, peşinen %100 ikame varsaymak yerine düşük ($\alpha = 0.25$), orta ($\alpha = 0.50$) ve yüksek ($\alpha = 0.75$) senaryolar üzerinden duyarlılık analizi yürütmeyi zorunlu kılar.

5. Hakemli Akademik Literatür Karşılaştırması

Bağımsız bilimsel araştırmalar, disiplinli sistem sınırları altında incelendiğinde ömür uzatımının sağladığı kazanımları teyit etmektedir:

PAMMINGER VD. (2021) · INT. J. LCA

Bileşen seviyesinde modüler onarım için **%71'e varan**, kapsamlı atölye revizyonu için **%55** ve tam yeniden üretim için **%25** küresel ısınma potansiyeli (GWP) azalması hesaplanmıştır.

BOLDOCZKI VD. (2023) · SCI. TOTAL ENVIRON.

Merkeziyetsiz yerel servis ağlarını ve ikinci el yeniden kullanım platformlarını incelemiş; lojistiğin kritik bir hassasiyet darboğazı olduğunu vurgulayarak toplam çevresel etkide **%25'e varan** tasarruf raporlamıştır.

6. Mühendislik Merceği: Karbon Muhasebesinde Değerlendirme Sınırları

Bir yaşam döngüsü çalışmasının sonucunu belirleyen en kritik karar sınır tanıımıdır. Onarım aşamasını yalnızca teknisyenin lehim istasyonunun veya sıcak hava tabancasının tükettiği elektrikle sınırlamak, tasarruf miktarını yapay olarak şişirir. Kapsamlı bir sistem sınırı şu girdileri içermek zorundadır:

- Yedek parçaların (ekran camı, AMOLED katmanı, batarya hücresi, ara filmler) gömülü üretim emisyonları.
- Motorlu kurye lojistiği, şehirlerarası kargo ve koruyucu paketleme malzemeleri.
- Atölye elektrik tüketimi, termal profilleme ve mikroskop/kalibrasyon ekipmanı enerjisi.
- Başarısız onarım olasılığı (hatanın giderilemediği veya anakartın kurtarılamadığı vakalar).
- Değiştirilen eski arızalı parçanın çevreye zarar vermeden lisanslı WEEE geri dönüşümüne sevk.



Şekil 2. Yeşil Teknoloji tarafından hazırlanan kavramsal süreç ve metodolojik değerlendirme akışı.

KRİTİK MÜHENDİSLİK AYRIMI

"Teknik Olarak Mümkün" ≠ "Ekonomik Olarak Rasyonel" ≠ "Çevresel Olarak Tercih Edilir".

Bir anakart üzerindeki mikro lehimleme teknik olarak mümkün olabilir; ancak yedek parça lojistiği ve teknisyenin saatler süren fırınlama/onarım enerjisi ekonomik ömrünü tamamlamış 8 yıllık bir cihazın artık değerini aşıyorsa, bu işlem ne çevresel ne de rasyonel bir çözüm sunar.

7. Yeşil Teknoloji Saha Mühendisliği Perspektifi

Yeşil Teknoloji, teorik yaşam döngüsü prensiplerini Çiğli merkez donanım laboratuvarı ve Karşıyaka / İzmir kurye altyapısıyla somut atölye standartlarına dönüştürür:

1. Hassas Teşhis ve Donanım Kurtarma (Ezbere Modül Değişimi Yerine)

Geleneksel servis zincirleri sıklıkla sağlam üniteleri kapsayan komple kasa/blok değişimine gider (örneğin yalnızca şarj soketi arızası için tüm alt bordun atılması). Laboratuvarımızda ultrasonik konnektör temizliği, mikrolehimleme ve devre yolu revizyonu önceliklendirilir. Parçanın korunması, yeni parça imalatının getireceği gömülü karbon ayak izini doğrudan önler.

2. Konsolide Kurye Lojistiği

Müşterilerin bireysel araçlarıyla servise gitmesi şehir içi dağınık ulaşım emisyonu üretir. Karşıyaka mobil servis kurye ağıımız, cihaz alım ve teslimatlarını önceden planlanmış toplu rotalarda konsolide ederek Kapsam 3 taşıma emisyonlarını minimuma indirir.

3. Döngüsel Değerleme ve Cihaz Ömrü Yönetimi

/telefon-sat şeffaf değerlendirme motorumuz sayesinde çekmecelerde atıl bekleyen ikinci el cihazlar değerinde nakite çevrilir; donanım revizyonuna, parça döngüsüne veya lisanslı WEEE geri dönüşümüne sevk edilerek elektronik atık oluşumu engellenir.

8. Sık Sorulan Teknik Soru

Soru: Bir telefonun onarımı her zaman daha düşük karbon ayak izi mi üretir?

Cevap: Hayır. Net sonuç; takılan yedek parçanın gömülü imalat ayak izine, müdahale sonrası kazanılan doğrulanmış ek kullanım ömrüne, ikame katsayısına ve lojistik verimliliğine doğrudan bağlıdır.

9. Akademik ve Standart Kaynakça

[CORD] Cordella, M., Alfieri, F., & Sanfelix, J. (2021). *Reducing embodied environmental impacts of smartphones by extending device lifetime*. Journal of Industrial Ecology, 25(5), 1183–1196. DOI: 10.1111/jiec.13119

[LCA] Pamminger, R., Glaser, S., & Wimmer, W. (2021). *Life cycle assessment of second-hand smartphones and repair options*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 26, 1783–1798. DOI: 10.1007/s11367-021-01869-2

[FIELD] Boldoczki, S., Thorenz, A., & Tuma, A. (2023). *Environmental savings of consumer electronics reuse and local repair networks*. Science of The Total Environment, Elsevier. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164802

[ISO] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 — Environmental management: Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO Standartlar Kataloğu.

KURUMSAL DOĞRULAMA & TEKNİK ALTYAPI

Yeşil Teknoloji Donanım Laboratuvarı & İkinci El Cihaz Merkezi

28+ Yıllık Tecrübe

Yeşil Teknoloji Hardware Laboratory & Second-Hand Device Center

Merkez Laboratuvar:

Köyiçi, 8075. Sokak No:6/B, Çiğli / İzmir
Statik korumalı (ESD) laboratuvar, optik mikrolehimleme,
batarya & ekran kalibrasyonu.

Karşıyaka Hizmet Bölgesi:

yesilteknoloji.com.tr/karsiyaka
Motorlu kurye ile teslim tutanağı karşılığı adresten alım ve
güvenli teslimat.

RESMİ WEB SİTESİ

yesilteknoloji.com.tr

KURUMSAL E-POSTA

info@yesilteknoloji.com.tr

İLETİŞİM & WHATSAPP DESTEK

+90 501 359 32 03

Yazar & Kurucu: **Gökhan YEŞİL** · Doğrudan:

gokhan@yesilteknoloji.com.tr

Yazar Profilleri: [Google Developer Profile](#) · [LinkedIn](#) · DOI:

[10.5281/zenodo.23417269](https://doi.org/10.5281/zenodo.23417269)