

Gerçekleri bilelim:

GÜNEŞ ENERJİSİNİN GÖRÜNMEYEN KARANLIK YÜZÜ

DÜNYA'da VE TÜRKİYE'de GÜNCEL DURUM

Hurda Panel Krizi ve Küresel Geri Dönüşüm Açmazı

Hazırlayan: Yüksel Atakan ybatakan4@gmail.com (YZ desteğiyle)

Mayıs 2026



Geri dönüşümleri yapılamayan Hurda Paneller çöplüklerde

ÖZET

Güneş enerjisi, iklim değişikliğiyle savaşmada yenilenebilir bir kaynak olarak sunulmakla birlikte, "temiz enerji" niteliğinden ciddi biçimde sorgulanmaktadır. Bu rapor; fotovoltaik (FV) panel üretiminin karbon yoğunluğunu, Çin'in küresel üretimdeki egemenliğini ve bunun fosil yakıt bağımlılığını, panellerin ömür sonu yönetiminin küresel boyutlarını ve özellikle Türkiye'nin içinde bulunduğu durumu akademik bir perspektifle incelemektedir. IRENA ve IEA-PVPS projeksiyonlarına göre 2030'a kadar 4-8 milyon ton, 2050'ye kadar ise 78 milyon ton FV panel atığı birikmesi beklenmektedir. Avrupa Birliği'nin WEEE direktifi dışında, dünya genelinde FV atıklarına özgü kapsamlı bir yönetmelik altyapısı bulunmamaktadır. Türkiye'de ise kurulu güçteki hızlı artışa karşın panellere özgü geri dönüşüm altyapısı henüz oluşturulmamıştır. Rapor, politika yapıcılara, sektör paydaşlarına ve araştırmacılara yönelik somut önerilerle sonuçlandırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik atık, FV panel geri dönüşümü, karbon ayak izi, IRENA projeksiyonları, Türkiye enerji politikası, ömür sonu yönetimi, genişletilmiş üretici sorumluluğu

1. GİRİŞ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

İklim kriziyle savaşımın merkezine yerleşen güneş enerjisi, geçtiğimiz iki on yılda eşi görülmemiş bir büyüme hızına ulaşmıştır. Küresel FV kurulu kapasitesi 2024 itibarıyla 2 TeraWatt(TW) eşliğini aşmış; 2050 yılına

kadar 75 TW'a ulaşması beklenmektedir (PNAS, 2025). Bu olağanüstü büyüme, iklim politikasında güneş enerjisini vazgeçilmez kılmaktadır.

Ne var ki "yenilenebilir" ve "temiz" kavramları çoğunlukla eşanlamlı kullanılmakta, bu da kamuoyunda ciddi bir algı yanlışlığına yol açmaktadır. Bir enerji kaynağının yenilenebilir olması, üretim ve ömür sonu süreçlerini de kapsayan tüm yaşam döngüsünün temiz olduğu anlamına gelmemektedir. Güneş panelleri, karbon yoğun koşullarda üretilmekte; zararlı maddeler içermekte ve ömürlerini tamamladıklarında büyük çoğunlukla geri dönüşüm altyapısından yoksun bir dünyayla yüz yüze gelmektedir.

Bu rapor söz konusu paradoksu üç temel eksen üzerinden incelemektedir: (1) Özellikle Çin merkezli üretim zincirinin yarattığı karbon yükü, (2) IRENA ve diğer uluslararası kuruluşların öngördüğü FV atık dalgası ve (3) bu dalgayla başa çıkmak için küresel ve ulusal düzeyde mevcut olan —ya da olmayan— altyapı ve yönetmelik kapasitesi. Türkiye, hızla büyüyen FV kapasitesi ve henüz oluşturulmamış geri dönüşüm altyapısıyla bu tartışmanın kritik bir örneğini oluşturmaktadır.

2. FOTOVOLTAİK PANEL ÜRETİMİNİN KARBON BOYUTU

2.1 Yaşam Döngüsü Emisyon Analizi

Fotovoltaik sistemlerin karbondioksit emisyonu değerlendirmesinde "yaşam döngüsü analizi" (Life Cycle Assessment – LCA) yöntemi kullanılmaktadır. IPCC'nin yaygın olarak paylaşılan verileri, ızgara ölçekli güneş FV sistemleri için yaşam döngüsü emisyonlarını 20-50 g CO₂e/kWh olarak tahmin etmektedir. Kömürün 820 g CO₂e/kWh değeriyle karşılaştırıldığında bu oran önemli ölçüde düşük görünmektedir.

Bununla birlikte, araştırmacılar bu rakamların kritik bir metodolojik sorun içerdiğine

dikkat çekmektedir: Söz konusu değerlerin büyük bölümü, Avrupa'nın daha yeşil enerji karmasına dayanan fabrikalardan elde edilen verilerle hesaplanmıştır. Oysa bugün dünyanın en büyük FV üreticisi konumundaki Çin, panel üretiminde daha çok fosil enerji kullanmaktadır ve bu hesaplamada yeterince temsil edilmemektedir (Environmental Progress, 2023).

Tablo 1: Üretim Yerine Göre FV Panel Karbon Ayak İzi — Kuramsal Karşılaştırmama (Gerçek Üretim Rakamı Değil)

Üretim Lokasyonu	Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ e/kWp)	Temel Elektrik Kaynağı	Referans
Çin	~810	Ağırlıklı kömür (%62)	Argonne / Sustainabletimes 2026
Almanya	~580	Karma (yenilenebilir ağırlıklı)	Argonne NL, 2014
AB Ortalaması	~480	Karma (nükleer + yenilenebilir)	Argonne NL, 2014
ABD	~450-600	Bölgeye göre değişen karma	NREL, 2021

Üretim Lokasyonu	Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ e/kWp)	Temel Elektrik Kaynağı	Referans
Kömür Santrali (ref.)	—	Kömür	IPCC (820 g CO ₂ e/kWh)

Kaynak: Argonne National Laboratory (2014); The Sustainable Times (2026); IPCC (2014)

⚠ **Bu tablo nasıl okunmalıdır?** Tablodaki değerler, aynı güneş panelinin farklı ülkelerde üretilmesi durumunda ortaya çıkacak kuramsal karbon ayak izini göstermektedir — gerçek üretim hacimlerini değil. Almanya yılda yalnızca 1-2 GW civarında panel üretmektedir ve küresel üretimdeki payı %1'in altındadır; büyük çaplı üretim altyapısı bulunmamaktadır. Bu nedenle Almanya'nın 580 kg CO₂e/kWp değeri, "Almanya'da Çin kadar panel üretilseydi ne olurdu?" sorusuna verilen akademik bir yanıttır. Değerin Çin'den (810) düşük, AB ortalamasından (480) yüksek olması, Almanya enerji karmasının yenilenebilir ağırlıklı olmakla birlikte hâlâ doğal gaz içermesinden kaynaklanmaktadır. Çin'den ithal edilen panellerin karbon ayak izi ise her zaman ~810 kg CO₂e/kWp değeri üzerinden hesaplanmalıdır.

2.2 Çin'in Küresel Üretimdeki Egemenliği ve Fosil Yakıt Bağımlılığı

Çin, günümüzde küresel FV panel üretiminin %80'inden fazlasını gerçekleştirmekte; polisilikon üretiminin %80'ini, wafer üretiminin ise %97'sini karşılamaktadır (IEA, 2023). Bu olağanüstü yoğunlaşma, küresel FV sektörünün karbon yoğunluğunu doğrudan belirlemektedir.

IEA verilerine göre, FV panel üretim sürecinde kullanılan enerjinin %80'i elektrik enerjisinden oluşmakta; bu elektriğin %62'si ise kömürle üretilmektedir. Saha araştırmaları, aynı panel modelinin Çin'de üretilmesi durumunda Avrupa'dakine kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek karbon ayak izi bıraktığını ortaya koymaktadır (Argonne National Laboratory, 2014; The Sustainable Times, 2026).

ScienceDirect'te yayımlanan kapsamlı bir LCA çalışması, Çin'deki 1 kWp'lik bir FV modülün ömrü boyunca 1.601 kg sera gazı emisyonuna yol açtığını, ancak bu değer kömür santralinin (4.810 kg) ile karşılaştırıldığında hâlâ belirgin biçimde düşük kaldığını vurgulamaktadır (Frontiers in Energy Research, 2024).

Önemli Not: Çin yavaş yavaş elektrik üretimini yenilenebilir kaynaklara kaydırmaya başladığından FV üretiminin karbon yoğunluğu düşmektedir. NREL, enerji karmasının temizlenmesiyle emisyonların iki kat azalabileceğini tahmin etmektedir. Bununla birlikte bu süreç henüz tamamlanmamış olup mevcut altyapı büyük ölçüde kömüre bağımlı kalmaya devam etmektedir.

2.3 Çin'in Yıllık Panel Üretimi, Üretim Kaynaklı CO₂ Emisyonları ve Ülkelere Göre İhracat Verileri (2024)

2024 yılında Çin, küresel FV panel üretiminin %85'ini tek başına karşılayarak yaklaşık 600-650 GW kapasiteli modül üretmiştir; bunun 235,93 GW'ı ihraç edilmiştir (InfoLink/PV InfoLink, 2025). Üretim sürecinde kullanılan elektriğin %62'sinin kömürden karşılanması nedeniyle bu üretim, IEA verilerine göre her kWp başına ortalama ~810 kg CO₂e emisyonu açmaktadır. Aşağıdaki tablolar; Çin'in yıllık üretim ve ihracat büyüklüğünü, bu süreçteki karbon yükünü ve ihracatın ithalatçı ülkelerdeki CO₂ tasarrufuna olan katkısını özetlemektedir.

Tablo 1a: Çin FV Panel Üretimi ve Üretim Kaynaklı CO₂ Emisyonları (2022-2024)

Yıl	Toplam Üretim (GW)	Dışsatım (GW)	Üretim Kaynaklı CO ₂ (Mt, tahmini*)	Kaynak
2022	~340	154	~276 Mt	IEA (2023)
2023	~500	208	~405 Mt	InfoLink (2025)
2024	~600-650	235,93	~487-527 Mt	InfoLink/Carbon Brief (2025)

* CO₂ tahmini: ~810 kg CO₂e/kWp (Çin ulusal ortalaması, Argonne NL / ScienceDirect 2024) × üretim kapasitesi (GW × 1.000.000 kWp/GW). Bu değer, ulusal enerji karmasında kömür payının azalmasıyla birlikte düşme eğilimindedir.

Tablo 1b: Çin'in Başlıca FV Panel İhracat Pazarları ve Tahmini CO₂ Tasarrufu (2024)

Ülke / Bölge	İthal Edilen Miktar (GW)	Tahmini Yıllık CO ₂ Tasarrufu (Mt CO ₂ /yıl)**	Notlar
Avrupa (toplam)	94,4	~90-105 Mt	Hollanda en büyük ithalatçı (%40 pay); İspanya 10,57 GW ile 2. sırada. Avrupa'da ithalat 2023'e göre %7 düştü.
Brezilya	22,5	~21-25 Mt	Amerika kıtasının %68'ini tek başına alan Brezilya, 2024'te yıllık bazında %9 artış kaydetti.
Pakistan	16,91	~15-18 Mt	Asya-Pasifik bölgesinin %25'ini aldı; 2023'e göre %127 patlama yaşandı. Elektrik talebinin hızla büyümesiyle öne çıkan bir pazar.
Hindistan	16,73	~15-18 Mt	Asya-Pasifik bölgesinin %24'ünü aldı. Hindistan, yerli üretimi teşvik politikasına rağmen ithalata devam ediyor.
Orta Doğu (toplam)	28,79	~27-33 Mt	2023'e göre %99 büyüme. Suudi Arabistan, BAE ve Mısır'ın yenilenebilir enerji programları talebi hızlandırıyor.
Afrika (toplam)	11,36	~10-13 Mt	2023'e göre %43 artış. G. Afrika bölgenin %34'ünü aldı (3,81 GW); Fas %10 ile ikinci.
Amerika kıtası (toplam)	33,28	~31-38 Mt	2023'e göre %10 artış. Brezilya toplamın %68'ini oluşturuyor; Şili %7 ile ikinci.
TOPLAM İHRACAT	235,93	~220 Mt (tüm temiz enerji ihracatı)	2023'e göre %13 artış. Solar panel ihracatı tek başına ~280 MtCO ₂ /yıl tasarruf sağlıyor (Carbon Brief, 2025).

** CO₂ tasarrufu tahmini: Her ülkenin elektrik şebekesindeki karbon yoğunluğu (carbon intensity) ve ithal edilen GW kapasitesi esas alınarak hesaplanmıştır. Ortalama kapasite faktörü %15-20 (güneşe göre değişen), panel ömrü 25-30 yıl kabul edilmiştir. Metodoloji: Carbon Brief / Lauri Myllyvirta (2025); InfoLink PV InfoLink (2025); PV Magazine (2025)

3. KÜRESEL FV ATIK PROJEKSİYONLARI

3.1 IRENA ve IEA-PVPS Projeksiyonları

IRENA ve IEA'nın Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı (PVPS) tarafından ortaklaşa hazırlanan 2016 tarihli çalışma, FV panel atık hacimlerine ilişkin gerçekleştirilen ilk sistematik ve küresel ölçekli projeksiyon çalışması niteliğindedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler, sonraki tüm araştırmaların temel referans noktasını oluşturmaktadır.

Tablo 2: Küresel Birikimli FV Panel Atık Projeksiyonları

Yıl	Birikimli Atık (Milyon Ton)	Senaryo	Kaynak
2021	0,2 Mt	Gerçekleşen veri	IRENA (2023)
2030	4 Mt	1,5°C Senaryosu	IRENA (2023)
2030	~8 Mt	Erken kayıp senaryosu	IRENA/IEA-PVPS (2016)
2030	~1 Mt	ABD ulusal tahmini	US EPA (2025)
2030	~1 Mt (Çin)	Çin ulusal tahmini	China ECOPV Alliance
2040	~50 Mt	1,5°C Senaryosu	IRENA (2023)
2050	78 Mt	Temel senaryo	IRENA/IEA-PVPS (2016)
2050	~17,7 Mt geri kazan.	Geri dönüşüm potansiyeli	IRENA (2023)

Kaynak: IRENA (2016, 2023); IEA-PVPS (2016); US EPA (2025); China ECOPV Alliance

3.2 Ülke Bazında Tahminler

G20 üyesi ülkeler, öngörülen toplam FV atığının büyük bölümünden sorumlu olacaktır. Çin, mevcut kurulu kapasitesi nedeniyle en yüksek miktarda hurdaya ayrılacak FV modülünü depolamak zorunda kalacak ülke konumundadır. PNAS'ta yayımlanan 2025 tarihli makalede, Çin Yeşil Tedarik Zinciri İttifakı'nın tahminlerine göre ülkenin 2030'a kadar 1-4 milyon ton, 2050'ye kadar ise 55-66 milyon ton FV atığıyla yüzleşmesi beklenmektedir.

Hindistan'da FV atık miktarının 2030'a kadar 200.000 ton, 2050'ye kadar ise yaklaşık 1,8 milyon tona ulaşması beklenmektedir (IEEFA, 2023). ABD ise 2050 itibarıyla dünyada en fazla ömrünü tamamlamış panel barındıran ikinci ülke konumuna gelecektir.

4.1 Panel Bileşimi ve Tehlikeli Maddeler

Bir güneş paneli ağırlıklı olarak cam (%75), polimer (%10), alüminyum (%8), silikon (%5) ve bakırdan (%1) oluşmaktadır. Bunların yanı sıra kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), selenyum (Se), krom (Cr) ve arsenik (As) gibi ağır metaller de eser miktarlarda bulunmaktadır (ScienceDirect, 2021).

Tablo 3: FV Panel Türlerine Göre Tehlikeli Madde İçeriği

Panel Türü	Tehlikeli Maddeler	Tehlike Düzeyi	Yaygınlık
Monokristal Si (c-Si)	Kurşun (lehim), kadmiyum	Orta	En yaygın (%85+)
Polikristal Si	Kurşun (lehim)	Orta	Yaygın
Kadmiyum Tellür (CdTe)	Kadmiyum, tellür	Yüksek	Artıyor (~%5)
CIGS/CIS	Kadmiyum, selenyum, indiyum	Yüksek	Sınırlı
Amorf Si	Hekzafloroetan (üretimde)	Düşük-Orta	Azalıyor

Kaynak: MLI Environmental (2026); US EPA (2025); ScienceDirect (2021)

4.2 Sızıntı ve Toprak/Su Kirliliği Riski

Kullanım ömrü devam eden, sağlam kapsüllü paneller çevrelerine ağır metal sızdırmamaktadır. Asıl risk, panellerin hasarlı hale gelmesi veya düzensiz biçimde bertaraf edilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Laboratuvar koşullarında yürütülen TCLP (Toksikite Karakteristik Sızma Prosedürü) testleri, **hasarlı panellerde kurşun konsantrasyonunun 9,3 mg/L düzeyine ulaşabildiğini ortaya koymuştur; bu değer, pek çok ülkenin düzenleyici sınır değerlerinin üzerindedir (ScienceDirect, 2021).**

ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), kurşun veya kadmiyum içeriği nedeniyle pek çok ticari ölçekli güneş panelinin RCRA kapsamında tehlikeli atık olarak sınıflandırıldığını teyit etmektedir. Ne var ki bireysel kullanıcılar ufak üretici muafiyetinden yararlanmakta; bu durum, düzensiz bertarafın önünde önemli bir düzenleyici boşluk yaratmaktadır.5. KÜRESEL GERİ DÖNÜŞÜM ALTYAPISININ DURUMU

5.1 Teknik ve Ekonomik Güçlükler

Güneş panellerinin geri dönüşümü, birbirine yapıştırılmış çok katmanlı yapıları nedeniyle teknik açıdan son derece güçtür. Paneller; cam, alüminyum çerçeve, encapsülan polimer (EVA), silikon hücreler, bakır iletkenler ve gümüş kontaklar gibi farklı malzemelerin mekanik olarak birbirine bağlandığı karmaşık bileşenler içermektedir. Bu heterojen yapı, tam ayrışmayı sağlayacak standart bir geri dönüşüm yönteminin önünde ciddi bir engel oluşturmaktadır.

Mevcut geri dönüşüm kapasitesinin yetersizliği hem miktar hem de kapsam bakımından kaygı vericidir. AB, küresel düzeyde en ileri mevzuat altyapısına sahip bölge olmasına karşın, 2023 yılındaki toplam AB geri dönüşüm kapasitesi yalnızca 40.000 ton düzeyinde kalmış; bu rakam, mevcut hurdaya ayrılan panel miktarının üçte birinden azını karşılamaktadır (PNAS, 2025).

Tablo 4: Ülke/Bölge Bazında FV Geri Dönüşüm Yönetmelik Karşılaştırması

Ülke/Bölge	Yönetmelik Durumu	Geri Dönüşüm Kapasitesi	Notlar
Avrupa Birliği	WEEE Direktifi (2012/19/AB) – kapsamlı	~20 tesis / 40.000 t/yıl (2023)	Üreticiye genişletilmiş sorumluluk uygulanıyor
Japonya	Özel FV geri dönüşüm yönetmeliği (2022)	Gelişmekte	METI koordinasyonu

Ülke/Bölge	Yönetmelik Durumu	Geri Dönüşüm Kapasitesi	Notlar
ABD	Federal mevzuat yok; CA ve WA eyalet düzeyinde	Sınırlı, eyalete göre değişen	SEIA gönüllü program yönetiyor
Çin	Taslak yönetmelik – henüz yürürlükte değil	Yetersiz	Dünya'nın en büyük üreticisi; mevzuat gecikmesi
Hindistan	E-atık kapsamında – FV'ye özgü değil	Çok sınırlı	2030 için 200.000 ton atık öngörülüyor
Türkiye	Genel e-atık yönetmeliği kapsamında; özgü yönetmelik yok	Yok (2026 itibarıyla)	Hızla büyüyen kurulu güç
Diğer Gelişmekte olan Ülkeler	Büyük çoğunluğunda hiç yok	Yok veya ihmal edilebilir	Düzensiz bertaraf yaygın

Kaynak: PNAS (2025); ScienceDirect (2024); IndexBox (2026); IEA-PVPS (2016)

5.2 Geri Dönüşümün Ekonomik Boyutu

Geri dönüşümün önündeki en kritik engellerden biri ekonomik fizibilitedir. Cam, mevcut panelin kütleli açıdan en büyük bileşenini oluştururken geri kazanım değeri oldukça düşük kalmaktadır. Değerli malzemeler ise çok küçük miktarlarda bulunmaktadır: her bir panelde yaklaşık 20 gram gümüş, 10 gram bakır ve 500 gram silikon mevcuttur.

IRENA ve IEA-PVPS'in tahminlerine göre ömür sonu panellerden geri kazanılabilecek ham maddelerin değeri, 2030 yılına kadar 450 milyon dolara, 2050 itibarıyla ise 15 milyar dolara ulaşacaktır. Bu rakamlar, köklü bir geri dönüşüm sektörünün ekonomik açıdan sürdürülebilirliğini ortaya koymaktadır; ancak söz konusu potansiyelin hayata geçirilmesi önemli başlangıç yatırımlarını ve güçlü bir politika çerçevesini gerektirmektedir.

6. TÜRKİYE'NİN KONUMU VE YAPISAL SORUNLAR

6.1 Türkiye'nin FV Sektörü Büyümesi

Türkiye, özellikle 2019 sonrasında güneş enerjisi kurulu kapasitesini hızla artırmıştır. Ülke, enerji bağımsızlığı ve yenilenebilir enerji hedefleri doğrultusunda FV yatırımlarını önemli ölçüde teşvik etmiştir. Bu büyüme, on yıllar sonra çok daha büyük boyutlara ulaşacak bir atık dalgasının temellerini şimdiden atmaktadır; ne var ki bu gerçek, günümüzde yeterince gündemde yer bulmamaktadır.

6.2 Yönetmelik Boşluğu

2026 itibarıyla Türkiye'nin FV panellerine özgü bir Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (GÜS) yönetmeliği bulunmamaktadır. Ömrünü tamamlamış paneller, genel e-atık kapsamında değerlendirilen Atık Yönetimi Yönetmeliği çerçevesinde ele alınmaktadır (IndexBox, 2026). Bununla birlikte bu çerçeve, FV atığının kendine özgü özelliklerini (hacim, tehlikeli madde içeriği, parçalı toplanma lojistiği vb.) karşılamaktan uzaktır.

Mevcut tablonun öne çıkan sorunları şöyle sıralanabilir: FV atığına özgü yönermelik yokluğu; belirlenmiş geri dönüşüm tesisi bulunmaması; üretici geri alma yükümlülüğünün tanımlanmamış olması; dağınık kurulum yapısının toplanma lojistiğini güçleştirmesi ve panel bileşim bilgisinin standartlaşmamış olması nedeniyle sınırlı teknolojik kapasite.

6.3 Mevcut Aktörler ve Altyapı Eksikliği

IndexBox'ın 2026 piyasa araştırmasına göre Türkiye'de bazı genel e-atık geri dönüşüm tesisleri (İZAYDAŞ, ITC Recycling gibi) mevcuttur; ancak bunlar FV modüllerine özgü olarak donatılmamıştır. PV Recycling Turkey ve GreenSolar Recycling gibi yan aktörler, kısıtlı ölçekte çalışmaya başlamış olsa da sektörün bütününe yönelik kapasiteden uzakta kalmaktadır. Avrupa merkezli teknoloji ve ekipman tedarikçileri ortak girişim seçeneklerini araştırmaktadır; bu durum, yatırım için elverişli bir fırsata işaret etmektedir.

7. POLİTİKA ÖNERİLERİ

7.1 Uluslararası Düzeyde

1. Küresel FV atık yönetim standartlarının oluşturulması için IRENA, IEA ve BM çatısı altında bağlayıcı bir çerçeve anlaşması müzakere edilmelidir.
2. Üretici sorumluluğunu güvence altına almak üzere büyük FV üreticilerini kapsayan uluslararası bir GÜS (Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu) fonu oluşturulmalıdır.
3. Çin başta olmak üzere büyük üreticilerin FV üretimindeki fosil yakıt kullanımını azaltmaya yönelik programlar geliştirilmelidir.
4. LCA metodolojisinde kullanılan enerji karması verilerinin şeffaflığı ve doğrulanabilirliği standartlaştırılmalıdır.

7.2 Türkiye İçin Öneriler

5. FV panellerine özgü, üretici/ithalatçıyı sorumlu kılan bir GÜS yönetmeliği en kısa sürede çıkarılmalıdır.
6. İzmir, Ankara veya İstanbul gibi büyük sanayi merkezlerinde pilot FV geri dönüşüm tesisleri kurulmalı; kamu-özel ortaklığı modeli tercih edilmelidir.
7. Satılan her panel için nihai geri dönüşüm maliyetini karşılayacak bir depozito-iade sistemi hayata geçirilmelidir.
8. Üniversiteler, TÜBİTAK ve özel sektörle ortak yürütülecek Ar-Ge programları aracılığıyla yerli geri dönüşüm teknolojisi geliştirilmeli ve ülkenin bu alanda bir bölgesel merkeze dönüşmesi hedeflenmelidir.
9. AB üyelik süreci kapsamında WEEE direktifine uyum zorunluluğu değerlendirilmeli ve bu doğrultuda uyum takvimi belirlenmelidir.

8. SONUÇ

Güneş enerjisi, küresel enerji dönüşümünün vazgeçilmez bir bileşenidir ve iklim kriziyle mücadelede kritik bir rol üstlenmektedir. Ne var ki bu potansiyelin gerçek anlamda gerçekleştirilmesi, sektörün tüm yaşam döngüsü boyunca karşılaştığı çevresel sorunların dürüstçe ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu rapor, üç kritik bulguyu ortaya koymaktadır: Birincisi, özellikle fosil yakıta bağımlı Çin üretim altyapısı bağlamında FV panel üretiminin karbon ayak izi, kamuoyundaki algının çok ötesinde karmaşık bir yapıya sahiptir. İkincisi, IRENA'nın 2030 yılı için 4-8 milyon ton olarak öngördüğü hurda panel dalgası, büyük çoğunluğunun geri dönüştürülemeyeceği bir altyapıyla karşılaşacaktır; zira AB'deki 20 tesiste dahil mevcut küresel kapasite, bu hacme yanıt vermekten uzaktır. Üçüncüsü, Türkiye'de özgün bir yönetmelik ya da altyapı bulunmamakta; bu durum, yüzleşilmesi kaçınılmaz olan bir kriz için zemin hazırlamaktadır.

Güneş enerjisinin hem gerçekten yenilenebilir hem de gerçekten temiz olabilmesi için; üretim kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılması, sağlam geri dönüşüm altyapılarının kurulması ve üretici sorumluluğunu güvence altına alan kapsamlı politika çerçevelerinin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu adımlar atılmaksızın güneş enerjisi, yalnızca karbonu görünmez kılacak ve katı atık sorununu ileriki kuşaklara miras bırakacak bir geçiş teknolojisi olarak kalmaya mahkûm olacaktır.

9. KAYNAKLAR /I/

- Argonne National Laboratory (2014). Solar panel manufacturing is greener in Europe than China. Argonne National Laboratory Press Release. <https://www.anl.gov/article/solar-panel-manufacturing-is-greener-in-europe-than-china-study-says>
- Environmental Progress (2023). Solar panels are three times more carbon-intensive than IPCC claims. Environmental Progress Investigation Report. <https://environmentalprogress.org/big-news/2023/7/3/solar-panels-are-three-times-more-carbon-intensive>
- Frontiers in Energy Research (2024). A comparative study on the combination of life cycle assessment and ecological footprints: solar photovoltaic power generation vs. coal power generation in Ningxia. Frontiers in Energy Research, 12, 1375820. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1375820>
- IEA (2023). Solar PV Global Supply Chains. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- IEEFA (2023). Role of recycling for resilient solar photovoltaic supply chains. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. <https://ieefa.org/resources/role-recycling-resilient-solar-photovoltaic-supply-chains>
- IndexBox (2026). Solar panel recycling market in Turkey. IndexBox Market Intelligence Report. <https://www.indexbox.io/store/turkey-solar-panel-recycling-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/>
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution. Cambridge University Press.
- IRENA (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. International Renewable Energy Agency and IEA Photovoltaic Power Systems Programme. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- IRENA (2023). Circular economy: Solar PV panels end-of-life management. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Circular-economy>
- MLI Environmental (2026). Regulation and management of solar panel waste. MLI Environmental Blog. <https://mlienvironmental.com/blog/regulation-and-management-of-solar-panel-waste/>
- NREL (2021). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. National Renewable Energy Laboratory. <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/end-of-life-management-solar-photovoltaic-panels-2>
- PNAS (2025). How to tackle the looming challenge of solar PV panel recycling. Proceedings of the National Academy of Sciences, 122(27). <https://doi.org/10.1073/pnas.2417921122>
- ScienceDirect (2021). Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. Science of the Total Environment, 780, 146645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146645>
- ScienceDirect (2024a). Carbon footprints of solar panels in China provinces based on different production and waste treatment scenarios. Journal of Cleaner Production, 436, 140564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140564>
- ScienceDirect (2024b). Managing photovoltaic waste: Sustainable solutions and global challenges. Solar Energy, 278, 112734. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112734>
- ScienceDirect (2024c). A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook. Journal of Cleaner Production, 445, 141092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141092>
- The Sustainable Times (2026). What the carbon footprint of solar panels tells us about the future of clean energy. <https://thesustainabletimes.com/what-the-carbon-footprint-of-solar-panels-tells-us-about-the-future-of-clean-energy/>
- US EPA (2025a). End-of-life solar panels: Regulations and management. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>

US EPA (2025b). Solar panel frequent questions. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-frequent-questions>

USITC (2024). Solar panel recycling and end-of-life considerations. Executive Briefings on Trade, US International Trade Commission. https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_gracia_sardana_solar_panel_circularity.pdf