Saygın Kaynaklardan YZ Destekli Güncel Bilim ve Teknoloji Yazıları

GÜNEŞ PANELLERİNDEKİ ZARARLI MADDELERİN ÇEVREYE ETKİLERİ

Güneş panellerinde zararlı ağır metaller neden var?

Dünya'daki ve Türkiye'deki Durum

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr. Fizik Y.Müh. , ybatakan4@gmail.com, Almanya, 14.11.2026

ÖZET

Güneş panellerinin elektrik üretebilmesi, ancak yarı iletkenliği sağlayan katkı maddeleriyle olmaktadır; bu katkı maddelerinin bir bölümü zehirli ve zararlı ağır metallerdir. Bu maddelerin panel dışına sızması ya da hasar görüp çevreye terk edilen panellerin zamanla parçalanarak, çürüyerek toprağa, yağışla yeraltı suyuna ve sonunda besin zincirine karışması, özellikle milyonlarca panelin toplandığı güneş çiftliklerinde önemli bir sorun olmakla birlikte gündeme pek gelmemektedir. Şiddetli dolu, fırtına, kasırga ve yangın sonucu hasar gördükten sonra bir süre bakımsız bırakılan güneş çiftlikleri az değildir (aşağıdaki şekiller); bu durum atık yönetimi açısından ayrıca önem taşımaktadır. Örneğin Konya'daki Karapınar GES gibi tek bir santralde 3,26 milyon panel kadar çok sayıda panel bulunabilir (Santiye.com.tr, t.y.); Türkiye'nin toplam güneş kurulu gücü 2026 yılında 27.638 MW — panel başına 300 W kabul edilirse bu güç yaklaşık 92 milyon panele karşılık gelir (GENSED, 2026) — dünyanınki ise 2.392 GW, yani yaklaşık 7,97 milyar paneldir (IRENA, 2026). Dolayısıyla ana sorun, tek bir panelin değil, çok sayıda panelli bir güneş çiftliğindeki çok sayıda panelin herhangi bir etken sonucu bozulduğunda ya da süresini doldurup hurdaya çıkıp çevreye bırakıldığında toplamının çevreye etkisidir. 2018 yılından beri yazdığımız bir dizi yazımızın bu güncellenmiş şeklinde bu konuya literatür verileriyle ve YZ desteğiyle bir kez daha derinlemesine bakıyoruz.





Amaç ve kapsam. Fotovoltaik (FV) güneş panelleri, elektrik üretimini sağlayan yarı iletken yapı, hücre metalleri ve lehim bağlantıları nedeniyle kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), gümüş (Ag) ve antimon (Sb) gibi potansiyel olarak zehirli elementler içerir. Normal işletme koşullarında bu elementler cam ve polimer katmanlar arasında kapsüllenmiş durumdadır ve çevreyle ilişkileri sınırlıdır. Ancak şiddetli dolu, fırtına, kasırga ve yangın gibi karayıkım olaylarıyla hasar gören ya da ömrünü tamamladığı hâlde sökülüp lisanslı bir geri dönüşüm veya temizleme tesisine gönderilmeyen panellerde bu kapsülleme zamanla bozulabilir; açığa çıkan metaller yağışla toprağa, yeraltı suyuna ve sonunda besin zincirine karışabilirler. Bu çalışmamızın amacı, konuyu tek bir panel için değil, milyonlarca panelden oluşan santraller ile ulusal ve küresel filolar ölçeğinde bakmak ve çevreye geçebilecek metal miktarını literatür verileriyle kestirebilmektir.

Dünya'da özellikle gelişmekte olan birçok ülkede panel geri dönüşüm tesisinin bulunmaması da hasarlı ve ömrünü tamamlamış panellerin doğaya bırakılacağının açık göstergesidir.

Yönetilmeyen panel nedir? Panel iki şekilde "yönetilmeyen" hâle gelebilir: (1) ömür sonunda, yani santral kapandığında veya panel değiştirildiğinde eski panelin atık yönetim planı çerçevesinde geri dönüştürülmek yerine çevrede bırakılması, gelişigüzel depolanması ya da düzensiz bir alana atılması; (2) hasar sonrasında, yani kırılan panel parçalarının hızla toplanıp güvenli biçimde temizlenmeleri yerine aylarca veya yıllarca açık havada, toprak ve yağmur suyuyla temas hâlinde kalmaları.

Bu yazımızda "Filonun %10'u yönetilmiyor" denmesinin anlamı, panellerin %10'unun ömürlerini tamamladıktan veya hasar gördükten sonra düzgün bir atık yönetim sürecine girmeden alanda bırakıldığı varsayımı anlamındadır.

Yöntem. Önce 1 milyon panelli (900.000 C-Si ve 100.000 CdTe) varsayımsal bir güneş enerjisi santralinin (GES) metal envanteri, panel sayısı × teknoloji payı × panel başına kütle çarpımıyla hesaplanmıştır; panel başına değerler Li vd. (2024, 2025) ve Chowdhury vd. (2026) çalışmalarından alınmıştır. Ardından Türkiye ve dünya filosuna geçilmiş, kurulu güç panel başına ortalama 300 W varsayımıyla panel sayısına çevrilmiştir (1 GW ≈ 3,33 milyon panel); gerçek filo ortalamasının panel yaşına ve teknolojisine bağlı olarak 300–450 W arasında değişebileceği unutulmamalıdır. Çevreye geçen miktar için %0,01 ve %1'lik salınım oranları senaryo varsayımı olarak kullanılmış, yaklaşık %10'luk kuramsal üst sınır ise yaşlanmış modüllerde ölçülen standart sızıntı testi (TCLP) verilerinden türetilmiştir (Li vd., 2025). Antimon yalnızca c-Si camı için hesaplanmış ve camda bağlı olduğundan ayrı gösterilmiş, bakır ise toplam yüke dahil edilmemiştir.

Çalışmanın katkısı. Literatürde panel başına ölçülen metal içeriği ve sızıntı deneyleri genellikle tek panel veya tek santral düzeyinde ele alınmaktadır. Bu çalışma ise aynı panel başına verileri, açıkça belirtilmiş varsayımlarla santral, ülke ve dünya ölçeğine taşımakta; böylece "tek panelde risk düşüktür" sonucunun, milyarlarca panelden oluşan bir filoya doğrudan uygulanamayacağını göstermektedir. Türkiye için güncel kurulu güç verisi (GENSED, 2026) kullanılmış, 2035 öngörüsü ve en çok güneş enerjisi kurulu gücüne sahip 30 ülkeyle karşılaştırma da eklenmiştir.

Bulgular: tek santral. 1 milyon panelli tek bir santralde Pb, Ag ve Cd toplamı düşük, orta ve yüksek senaryolarda sırasıyla yaklaşık 8,6; 18,8 ve 31,6 ton, yani kabaca 9–32 ton arasındadır; Pb tek başına 4,5–15,3 ton, Sb ise 14,4–72,0 ton düzeyindedir. Hasar sonrası hızlı yönetim varsayımında (%0,01) çevreye geçen miktar yaklaşık 1–3 kg, kalıntıların açıkta kaldığı varsayımında (%1) yaklaşık 86–316 kg'dır; kuramsal üst sınır (≈%10) ise Pb için 0,5–1,5 ton, tüm metaller için 0,9–3,2 tondur.

Bulgular: ulusal ve küresel ölçek. Ölçek büyüdükçe tablo belirgin biçimde değişmektedir. **Türkiye'nin 27.638 MW'lık kurulu gücü (GENSED, Ağustos 2026) yaklaşık 92 milyon panele karşılık gelmekte ve yaklaşık 995 ton Pb (415–1.410 ton) ile 3.980 ton Sb içermektedir; 2035 için öngörülen yaklaşık 50 GW'lık kapasitede (≈167 milyon panel) bu değerler yaklaşık 1.800 ton Pb ve 7.200 ton Sb'ye yükselmektedir**. Dünya filosu ise (2.392 GW, IRENA 2026; ≈7,97 milyar panel) yaklaşık 86.100 ton Pb ve 344.400 ton Sb barındırmaktadır. **Yönetilmeyen atıktan Pb salınımı, senaryoya göre Türkiye'de yaklaşık 1–100 ton, dünyada yaklaşık 86–8.600 ton olabilir;** üst değerler, tüm panellerin ufalanıp uzun süre açıkta kaldığı gerçekçi olmayan bir sınırı göstermektedir. **Konya Karapınar GES örneğinde (1.350 MW; 3.256.038 panel), tüm panellerin C-Si olduğu varsayılırsa tek santralde yaklaşık 16–55 ton Pb, 13–55 ton Ag ve 52–260 ton Sb bulunabilir** (ayrıntı: Bölüm 3).

Tablo Ö1. Ölçeğe göre panel sayısı, metal stoku ve Pb salınım aralığının özeti

Ölçek	Panel sayısı	Pb stoku (ton)	Sb stoku (ton, camda bağlı)	Pb salınımı (senaryo aralığı)
1 milyon panelli varsayımsal GES	1 milyon	4,5–15,3	14,4–72,0	1–3 kg ile 86–316 kg (Pb+Ag+Cd)
Konya Karapınar GES	≈3,26 milyon	≈16–55	≈52–260	—
Türkiye (27.638 MW)	≈92 milyon	≈995	≈3.980	≈1–100 t
Türkiye 2035 (≈50 GW)	≈167 milyon	≈1.800	≈7.200	≈1,8–180 t
Dünya (2.392 GW)	≈7,97 milyar	≈86.100	≈344.400	≈86–8.600 t

Not: Panel sayıları 300 W/panel varsayımıyla (Karapınar için gerçek panel sayısıyla) hesaplanmıştır; Pb salınımı Tablo 2 ve 3'teki senaryolara dayanır, üst değerler gerçekçi olmayan bir üst sınırdır.

Bulgular: ülke karşılaştırması. Güneş enerjisi kurulu gücü en yüksek 30 ülke için (Ember kurumuna göre 2025 sonu değerleri) panel başına 300 W ve Tablo 1'in orta değerleri temel alınarak yapılan hesaplamada **Çin, yaklaşık 1.202 GW ve ≈4 milyar panelle yaklaşık 75.000 ton Pb+Ag+Cd yüküyle ilk sıradadır**; onu ABD (211,6 GW; ≈13.200 ton) ve Hindistan (135,5 GW; ≈8.500 ton) izlemektedir. Almanya (≈6.600 ton) ve Japonya (≈5.800 ton) ilk beşi tamamlamaktadır. Listedeki 30 ülkenin ötesindeki diğer ülkeler de eklendiğinde dünya

toplamı yaklaşık 149.500 tona ulaşmaktadır. Türkiye bu listede 25,5 GW ile 13. sırada yer almakta (≈1.592 ton); bu değer, farklı bir kaynağa dayandığı için GENSED'in Ağustos 2026 tarihli, daha güncel verisinden (27,6 GW) farklıdır. Ülke değerleri santral bazında değil, ülke ortalaması düzeyinde bir kestirimdir.

Anahtar kelimeler: güneş paneli, fotovoltaik atık, ağır metaller, kurşun, kadmiyum, antimon, atık yönetimi, Türkiye.

1. PANEL BAŞINA ORTALAMA ZARARLI METAL MİKTARLARI

Güneş panellerinde bulunan ağır metaller ve yarı iletken katkı maddeleri teknolojiye göre değişmekle birlikte, literatürde verilen ortalama değerler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Panel başına tipik içerik ve 1 milyon panelli GES'in toplam envanteri

Element	g/panel	Bulunduğu yer	Düşük (t)	Orta (t)	Yüksek (t)
Kurşun (Pb)	5–17	Lehim kaplaması	4,5	10,8	15,3
Gümüş (Ag)	4–17	Hücre metalizasyonu	3,6	7,2	15,3
Kadmiyum (Cd)	≈5–10	CdTe tabakası	0,5	0,75	1,0
Toplam (Pb+Ag+Cd)			**≈8,6**	**≈18,8**	**≈31,6**
Antimon (Sb)	16–80	Güneş camında bağlı	14,4	43,2	72,0

Kaynaklar ve açıklamalar: Li vd. (2024, 2025); Chowdhury vd. (2026). Varsayım: 900.000 c-Si ve 100.000 CdTe panel. Sb yalnızca c-Si camı için hesaplanmıştır; camda bağlı olduğundan ayrı gösterilmiştir. Bakır toplam yüke dahil edilmemiştir.

2. TAM HASAR DURUMUNDA ÇEVREYE GEÇEBİLECEK MİKTAR

Tam hasar senaryosunda (dolu, fırtına, yangın) cam yapı bozulur ve kapsülleme zayıflar; üst cam yokluğunda Pb açığa çıkması (ekstraksiyonu) 4,1–8,8 kat artar (Sharma vd., 2021). Buna karşın CdTe modüllerinde yangında Cd'nin %99,5–99,96'sı erimiş camda tutulur (Fthenakis vd., 2005).

Tablo 2. Tek santral (1 milyon panel): senaryolara göre çevreye geçebilecek miktar

Senaryo	Varsayım	Çevreye geçen miktar
Normal işletme (panellerde bozulma olmadığı varsayılmış)	Sağlam, kapsüllü paneller	Az
Tam hasar, hızlı yönetim	Pb+Ag+Cd'nin %0,01'i	≈1–3 kg
Tam hasar, kalıntı açıkta	Pb+Ag+Cd'nin %1'i	≈86–316 kg
Kuramsal (teorik) üst sınır (Pb)	Pb'nin ≈%10'u	≈0,5–1,5 ton
Kuramsal (teorik) üst sınır (tümü)	Pb+Ag+Cd'nin ≈%10'u (aşırı temkinli)	≈0,9–3,2 ton

Not: %0,01 ve %1 oranları senaryo varsayımıdır; alana özgü çalışmalarla düzeltilmelidir.

3. ULUSAL VE KÜRESEL ÖLÇEK

Panel sayısı, panel başına ortalama güç 300 W kabul edilerek kurulu güçten türetilmiştir (1 GW ≈ 3,33 milyon panel). Tablo 3'teki Pb ve Sb miktarları bu panel sayısı üzerinden, Tablo 1'deki panel başına değerlerle hesaplanmıştır; parantez içindeki sayılar düşük–yüksek aralığını gösterir.

Tablo 3. Ulusal ve küresel ölçek: panel sayısı, metal stoku (ton) ve yönetilmeyen panellerden Pb salınımı

Filo (kurulu güç ve panel sayısı)	Pb stoku (t)	Sb stoku (t, camda bağlı)	Pb salınımı: filonun %10'u, %1 salınım	Pb salınımı: tamamı, %1 – %10 salınım
1 GW (≈3,33 milyon panel)	≈36 (15–51)	≈144 (48–240)	≈0,04 t (≈40 kg)	≈0,4 – 3,6 t
Türkiye, 27.638 MW (≈92 milyon panel)	≈995 (415–1.410)	≈3.980 (1.327–6.633)	≈1,0 t	≈10 – 100 t
Türkiye 2035, ≈50 GW (≈167 milyon panel)	≈1.800 (750–2.550)	≈7.200 (2.400–12.000)	≈1,8 t	≈18 – 180 t
Dünya, 2.392 GW (≈7,97 milyar panel)	≈86.100 (35.880–122.004)	≈344.400 (114.816–574.080)	≈86 t	≈860 – 8.600 t

Not: Gerçek filo ortalaması teknolojiye ve yaşa göre değişir (bkz. Yöntem). Son sütunun üst değeri (%10), tüm panellerin ufalanıp uzun süre açıkta kaldığı gerçekçi olmayan bir üst sınırdır. **Türkiye rakamı GENSED'in (2026) Ağustos 2026 verisidir (27.638 MW); Tablo 4'teki 30 ülke sıralaması farklı bir kaynağın (Ember, 2025 sonu) verisini kullandığından Türkiye için orada 25,47 GW görünür.**

Örnek: Konya Karapınar GES. Santraldeki yaklaşık 3,3 milyon panelin tümünün c-Si olduğu ve Tablo 1'deki panel başına değerlerin geçerli olduğu varsayılırsa, tek başına bu santralde yaklaşık 16–55 ton Pb (orta: ≈39 ton), 13–55 ton Ag (orta: ≈26 ton) ve 52–260 ton Sb (orta: ≈156 ton) bulunabilir. Santralin gerçek ortalama panel gücü (1.350 MW ÷ 3.256.038 panel ≈ 415 W) bu yazının diğer bölümlerinde kullanılan 300 W varsayımından yüksektir; bu nedenle aynı kapasitede fakat 300 W'lık panellerle kurulu bir santral, Karapınar'dan daha fazla panel ve dolayısıyla daha fazla ağır metal içerecektir. Bu hesap santralin gerçek panel bileşimine dayanan bir ölçüm değil, yalnızca ölçek göstergesidir.

4. EN ÇOK GÜNEŞ ENERJİSİ KURULU GÜCÜNE SAHİP ÜLKELER

Tablo 4, güneş enerjisi kurulu gücü en yüksek 30 ülkeyi; panel başına 300 W varsayımıyla hesaplanan panel sayısı ve bu panel sayısına karşılık gelen yaklaşık Pb+Ag+Cd yüküyle (Tablo 1'in orta değerleri) birlikte göstermektedir. Veriler Ember'in 2025 sonu verilerine dayanmaktadır (BAE ve Suudi Arabistan için 2024).

Tablo 4. Güneş enerjisi kurulu gücünde ilk 30 ülke (2025 sonu) ve tahmini ağır metal yükü

Sıra	Ülke	Kurulu güç (GW)	Panel sayısı (milyon, 300 W varsayımı)	Pb+Ag+Cd (ton, orta)
1	Çin	1.202,2	4.007 (4 Milyar)	75.136
2	ABD	211,6	705	13.226
3	Hindistan	135,5	452	8.469
4	**Almanya**	106,3	354	6.642
5	Japonya	92,2	307	5.763
6	Brezilya	64,7	216	4.043
7	İspanya	47,2	157	2.951
8	İtalya	41,2	137	2.574
9	Avustralya	41,1	137	2.567
10	Fransa	31,2	104	1.952
11	Güney Kore	30,4	101	1.897

Sıra	Ülke	Kurulu güç (GW)	Panel sayısı (milyon, 300 W varsayımı)	Pb+Ag+Cd (ton, orta)
12	Hollanda	25,9	86	1.617
13	**Türkiye (2025 değeri)**	25,5	85	1.592
14	Polonya	25,4	85	1.589
15	Birleşik Krallık	21,7	72	1.354
16	Vietnam	19,2	64	1.203
17	Tayvan	15,5	52	967
18	Meksika	12,9	43	808
19	Şili	12,1	40	759
20	Güney Afrika	11,3	38	704
21	Yunanistan	11,1	37	692
22	Belçika	10,4	35	650
23	Avusturya	10,3	34	644
24	İsviçre	9,1	30	569
25	Macaristan	8,2	27	511
26	İsrail	7,4	25	460
27	Portekiz	7,0	23	434
28	Tayland	6,8	23	427
29	BAE	6,5	22	406
30	Suudi Arabistan	6,2	21	387
—	**Dünya toplamı**	**2.391,5**	**≈7.972 (≈7,97 milyar)**	**≈149.500**

Kaynak: Ember, aktaran Wikipedia "Solar power by country" (Haziran 2026 erişimi); BAE ve Suudi Arabistan 2024 verisidir. Pb+Ag+Cd sütunu, Tablo 1'in orta değerleri ve 300 W/panel varsayımıyla yazar tarafından hesaplanmıştır. Aynı panel sayısına karşılık gelen antimon (camda bağlı) yaklaşık olarak bu sütunun 2,3 katıdır (ör. Çin için ≈173.000 ton).

5. TARTIŞMA

Toprak ve su. Pb toprağa bağlanarak sınırlı hareket ederken Cd daha hareketli ve biyoyararlıdır; bitkilerce alınarak besin zincirine girebilir (Kabata-Pendias, 2011). Sonuç, çoğunlukla yerel toprak kirliliğidir. Suya geçiş riski asidik toprak, yüksek yağış ve kırılmayla artmakta, CdTe çözünürlüğü pH ve oksijene bağlı olmaktadır (Zeng vd., 2015). Yeraltı suyu riski, yerel koşullara bağlı olarak düşük–orta (nitel) değerlendirilmiştir.

Hava, yangın ve sağlık. Yangın durumunda kısa vadeli risk, itfaiye ve saha çalışanlarının solunum yoluyla etkilenmeleridir; ancak Pb için FV'ye özgü nicel yangın verisi sınırlıdır. Sağlık açısından Pb nörotoksiktir, Cd ise IARC Grup 1 kanserojendir (IARC, 2012). Kronik düşük doz etkilenme uzun vadeli risk oluştururken ani etkilenme yalnızca karayıkım durumlarında söz konusudur.

- **Kurumsal değerlendirmeler:** NREL araştırmacıları toksisite kaygılarının büyük ölçüde güncel olmayan verilere dayandığını ileri sürerler (Mirletz vd., 2023); **asıl kaygıları atık hacmidir (2050'ye kadar 54–160 milyon ton güneş paneli atığı bekleniyor).** ABD Enerji Bakanlığı da 2050 FV atığının belediye elektronik atığının %7–12'si olabileceğini belirtir.

- **Teknoloji ve mevzuat:** İncelenen 33 modülden yalnızca üçü (eski, yaşlanmış, şeritli c-Si) Pb için TCLP sınırını aşmıştır; modern hücre, tel bağlantı ve cam–cam yapıda sızıntı potansiyeli daha düşüktür (Li vd., 2025).

Türkiye için çıkarımlar. Türkiye'nin 2026 panel stoku yaklaşık 995 ton Pb ve 3.980 ton Sb içermekte, 2035 için öngörülen kapasite artışıyla bu stokun yaklaşık 1.800 ton Pb ve 7.200 ton Sb'ye, yani neredeyse iki katına çıkması beklenmektedir. **Dolayısıyla ömür sonu atık yönetiminin, panellerin büyük bölümü henüz işletme ömrünün başındayken planlanması gerekmektedir.** Türkiye'de AEEE Yönetmeliği (RG 26.12.2022, 32055) geçerli olmakla birlikte, büyük santral panellerinin kapsamı ayrıca doğrulanmalıdır. Karapınar gibi çölleşmiş arazide kurulu tesislerde besin zincirinin doğrudan etkilenmesi sınırlı olsa da, aynı varsayım tarım alanlarına, su havzalarına ya da yağışı yüksek bölgelere kurulu santraller için geçerli değildir.

Yorum ve sınırlılıklar. Sonuçlar kestirim niteliğindedir ve birkaç varsayıma duyarlıdır. Panel başına 300 W kabulü, Karapınar örneğinde olduğu gibi gerçek panel gücü bundan yüksekse panel sayısını ve metal miktarını olduğundan fazla, düşükse eksik gösterir. %0,01, %1 ve %10 oranları gözlenmiş değil, senaryo değerleridir ve alana özgü ölçümlerle düzeltilmelidir. Stokun büyük bölümü camda ve polimerde bağlı olduğundan çevresel etki, ulusal ya da küresel toplamdan çok her alandaki yerel derişime bağlıdır. Buna karşın tek bir santralde kilogram düzeyinde kalan salınım, atığı yönetilmeyen bir filo ölçeğinde onlarca–yüzlerce, dünya ölçeğinde binlerce tona çıkabilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Risk, tekil olaylardan çok ömür sonu atık yönetimindeki birikimli ihmalden kaynaklanmaktadır: tek santralde düşük ve yerel kalan risk, panel sayısı ve yönetilmeyen atık payı arttıkça binlerce–on binlerce tonluk bir stok nedeniyle orta–yüksek düzeye çıkabilmektedir. Kritik etmenler atık yönetimi ve hasara hızlı müdahaledir. **Bu doğrultuda şu öneriler getirilmektedir: (i) söküm ve lisanslı geri dönüşümü kapsayan bir atık planı ve bu planın finansmanı; (ii) hasar sonrası kırık parçaların hızla toplanması, toprak ve su örneklemesi ile hasar öncesi baz ölçüm yapılması; (iii) kurşunsuz lehim ve antimonsuz cam gibi alternatiflerin yaygınlaştırılması; (iv) Türkiye'de kullanılan paneller için alana özgü sızıntı testleri yapılması; (v) ulusal panel envanteri çıkarılması, ömür sonu atık miktarının kestirilmesi ve genişletilmiş üretici sorumluluğunun uygulanması.**

Temel mesaj. Güneş panelleri sağlam ve yerinde durdukları sürece çevreye etkileri çok azdır; sorun, hasar görmüş ya da ömrünü tamamlamış panellerin kontrolsüz biçimde doğaya bırakılmasıyla başlar. Panel sayısı milyonlara ulaştığında ise küçük görünen oranlar bile doğaya ton düzeyinde metal yayılımı anlamına gelebilmektedir. Bu nedenle asıl sorun ve önlem, panellerin kurulum aşamasından başlanarak söküm, toplama ve lisanslı geri dönüşümü kapsayan yaşamları boyunca planlanıp yönetilmesidir.

Bu konuyla ilgili önceki yazılarımızdan bazı linkler:

Çeşitli Ülkelerde ve Türkiye'de Hurda ya da Bozuk Güneş Panellerinin Geri Dönüşüm Maliyeti Sorunu YZ Y.Atakan 16.07.2026 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan

GÜNEŞ ENERJİSİNİN GÖRÜNMEYEN KARANLIK YÜZÜ DÜNYA'da VE TÜRKİYE'de GÜNCEL DURUM Y.Atakan 13.05.2026 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan

GUNES PANELLERİ VERIMLIGİ VE TICARI DURUMUYLA İLGİLİ BİR ARAŞTIRMA YZ Y.Atakan 09.02.2026 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan

Güneş Enerjisi Gerçekten Temiz ve Ucuz mu? Hurda panellerdeki zararlı ve zehirli katkı maddeleri çevreye yayılmamalı Y.Atakan 24.12.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan

KAYNAKLAR:

Chowdhury, P., vd. (2026). Necessity for recycling photovoltaic glass… *Solar Energy Materials and Solar Cells, 295*, 114012.

Ember (2025 verisi), aktaran Wikipedia. *Solar power by country* (Haziran 2026 erişimi). https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country

GENSED (2026) ve IRENA (2026). *Türkiye ve dünya güneş enerjisi kurulu gücü verileri* (TEİAŞ verileri; Renewable capacity statistics 2026, IRENA).

Li, F., vd. (2025). Photovoltaic module leach testing… *J. Environ. Manage., 377*, 124666.

Mirletz, H., vd. (2023). Unfounded concerns about photovoltaic module toxicity and waste are slowing decarbonization. *Nature Physics, 19*, 1376–1378.

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. IRENA & IEA-PVPS.

Not: Fischer, Fthenakis, Hallam, IARC, Kabata-Pendias, NREL, Santiye.com.tr, Sharma, U.S. DOE ve Zeng vd. dahil tam kaynakça, aynı çalışmanın akademik sürümünde yer almaktadır.

KISALTMALAR VE TERİMLER

FV: Fotovoltaik (güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren teknoloji)

GES: Güneş Enerjisi Santrali

c-Si: Kristal silisyum (yaygın panel teknolojisi)

CdTe: Kadmiyum tellürür (ince film panel teknolojisi)

Pb / Ag / Cd / Sb / Cu: Kurşun / Gümüş / Kadmiyum / Antimon / Bakır (element simgeleri)

W, MW, GW: Watt, Megawatt (1.000 kW), Gigawatt (1.000 MW = 1 milyar W) — kurulu güç birimleri

t, kg: Ton, kilogram — kütle birimleri (1 t = 1.000 kg)

TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure — ABD EPA'nın standart sızıntı (ekstraksiyon) testi; bir malzemeden suya ne kadar madde geçebileceğini ölçer

IARC: International Agency for Research on Cancer — Dünya Sağlık Örgütü'ne bağlı Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı

AEEE: Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar

RG: Resmî Gazete

IRENA: International Renewable Energy Agency — Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı

IEA-PVPS: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme — Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı

NREL: National Renewable Energy Laboratory — ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı

U.S. DOE: United States Department of Energy — ABD Enerji Bakanlığı

GENSED: Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği

TEİAŞ: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

vd.: ve diğerleri (birden çok yazarlı kaynaklarda kullanılır)

t.y.: tarih yok (kaynağın yayın tarihi belirtilmemiş)