

GÜNEŞ PANELLERİNDEKİ ZARARLI MADDELER VE ÇEVREYE ETKİLERİ

Güneş panellerinde zararlı ağır metaller neden var?

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr. Fizik Y.Müh. , ybatakan4@gmail.com. Almanya, 23.09.2026

Giriş

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 toprağa, yağışla yeraltı suyunu ve sonunda besin zincirine karışması, özellikle milyonlarca panelin toplandığı güneş çiftliklerinde önemli bir sorudur. Şiddetli dolu, fırtına, kasırga ve yangın sonucu hasar gören ya da bir süre bakımsız bırakılan güneş çiftlikleri az değildir; bu durum atık yönetimi açısından ayrıca önem taşımaktadır. Konya'daki Karapınar GES gibi tek bir santral 3.256.038 panel içerebilir (Santiye.com.tr, t.y.); Türkiye'nin toplam güneş kurulu gücü 27.638 MW — panel başına 300 W kabul edilirse yaklaşık 92 milyon panele karşılık gelir (GENSED, 2026) — dünyanınki ise 2.392 GW, yani yaklaşık 7,97 milyar paneldir (IRENA, 2026). Dolayısıyla asıl soru, tek bir panelin değil, bu büyüklükteki bir filonun toplamının çevreye etkisidir. Bu yazıda konuya literatür verileriyle bir kez daha, biraz daha derinlemesine bakılmaktadır.



Özet

Fotovoltaik (FV) paneller kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), gümüş (Ag) ve antimon (Sb) gibi potansiyel olarak toksik elementler içerir. Bu çalışma, önce 1 milyon panelli varsayımsal bir güneş enerjisi santralinin (GES), ardından Türkiye ve dünya filusunun metal envanterini ve yönetilmeyen panellerden çevreye geçebilecek miktarı literatür verileriyle tahmin etmektedir. Tek santralde Pb, Ag ve Cd toplamı yaklaşık 9–32 ton, tam hasarda çevreye geçen miktar ise gerçekçi varsayımlarda yaklaşık 1 kg ile birkaç yüz kg'dır. Panel başına ortalama güç 300 W kabul edilerek hesaplandığında, Türkiye'nin 27,6 GW'lık filosu (≈92 milyon panel) yaklaşık 995 ton Pb ve 3.980 ton Sb; dünya filosu (2.392 GW, ≈7,97 milyar panel) yaklaşık 86.100 ton Pb ve 344.400 ton Sb içerir. Yönetilmeyen atıktan Pb salınımı senaryoya göre Türkiye'de yaklaşık 1–100 ton, dünyada yaklaşık 86–8.600 ton olabilir. Risk, tekil olaylardan çok ömür sonu atık yönetimindeki birikimli ihmalden kaynaklanmaktadır.

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.

Yöntem notu: Toplam yük, panel sayısı × teknoloji payı × panel başına kütle ile hesaplanmıştır. Ulusal ve küresel ölçekleme için panel başına ortalama güç **300 W** kabul edilmiş, kurulu güç (MegaWatt, GigaWatt) bu varsayım ile panel sayısına çevrilmiştir (1 GW ≈ 3,33 milyon panel); gerçek filo ortalaması panellerin yaşına ve teknolojisine göre 300–450 W arasında değişebilir. %0,01 ve %1’lik sızıntı oranları senaryo varsayımdır; ≈%10’luk kuramsal (teorik) üst sınır ise alan yaşanmış modüllerde ölçülen TCLP (standart sızıntı testi) verisinden türetilmiştir (Li vd., 2025).

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 varsayımdır; 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: Panel sayısı 300 W/panel varsayımıyla hesaplanmıştır; gerçek filo ortalaması teknolojiye ve yaşa göre değişir (bkz. Yöntem notu). 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 raporun 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.

Tekil bir santralde kilogram düzeyinde kalan salınım, atığı yönetilmeyen bir filo ölçeğinde onlarca–yüzlerce, dünya ölçeğinde binlerce tona çıkabilmektedir. Ancak stokun büyük bölümü camda ve polimerde bağlıdır ve etki ulusal toplamdan çok her alandaki yerel derişime bağlıdır.

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); dolayısıyla Türkiye için burada görünen 25,47 GW, Bölüm 3'te kullanılan GENSED'in (2026) Ağustos 2026 verisi olan 27.638 MW'tan farklıdır.

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
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

Sıra	Ülke	Kurulu güç (GW)	Panel sayısı (milyon, 300 W varsayımı)	Pb+Ag+Cd (ton, orta)
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; santral bazında değil ülke ortalamasında bir tahmindir. Aynı panel sayısına karşılık gelen antimion (camda bağlı) yaklaşık olarak bu sütunun 2,3 katıdır (ör. Çin için ≈173.000 ton). Dünya toplamı, listelenen 30 ülkenin toplamından fazladır; aradaki fark tabloda yer almayan diğer ülkelerden gelir.

5. TARTIŞMA

- **Toprak:** Pb toprağa bağlanarak sınırlı hareket eder; Cd daha hareketli ve biyoyararlıdır, bitkilerce alınarak besin zincirine girebilir (Kabata-Pendias, 2011). Sonuç yerel toprak kirliliğidir; Karapınar çölleşmiş arazide kurulduğundan doğrudan besin zincirinin etkilenmesi sınırlıdır.
- **Su:** Risk asidik toprak, yüksek yağış ve kırılmayla artar; CdTe çözünürlüğü pH ve oksijene bağlıdır (Zeng vd., 2015). Yeraltı suyu riski, yerel koşullara bağlı olarak düşük–orta değerlendirilmiştir (nitel).
- **Hava ve yangın:** Kısa vadeli risk solunum yolu etkilenmesi (maruziyeti) ile itfaiye ve saha çalışanlarıdır; Pb için PV'ye özgü nicel yangın verisi sınırlıdır.
- **Sağlık:** Pb nörotoksiktir; Cd ve As IARC Grup 1 kanserojendir (IARC, 2012). Kronik düşük doz etkilenmesi uzun vadeli risktir; akut etkilenme yalnızca felaket durumunda 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'de AEEE Yönetmeliği (RG 26.12.2022, 32055) geçerlidir; büyük santral panellerinin kapsamı ayrıca doğrulanmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tek bir santralde — örneğin bu yazıdaki 1 milyon panelli varsayımsal GES ölçeğinde — risk düşük ve yereldir; ancak panel sayısı arttığında (3,3 milyon panelli Karapınar gibi) ve filo ölçeğinde (bir ülkenin veya dünyanın tüm güneş santralleri toplamında) toplam stok binlerce–onbinlerce tona ulaşır ve risk, yönetilmeyen atık payına bağlı olarak orta–yüksek düzeye çıkabilir (Bir çok ülkede geri dönüşüm tesisi yoktur ve atık durumdaki panel çifliklerinin doğaya bırakıldığı / bırakılacağı hesaplanmalıdır). Kritik etmenler atık yönetimi ve işe hızlı el koymadır. Öneriler: (i) söküm ve lisanslı geri dönüşümü kapsayan atık planı ve finansmanı; (ii) hasar sonrası kırık parçaların hızlı toplanması, toprak-su örnekleme ve hasar öncesi baz ölçüm; (iii) kurşunsuz lehim ve antimonsuz cam gibi seçenekler; (iv) Türkiye'de kullanılan paneller için alana özgü sızıntı testleri; (v) ulusal panel envanteri ve ömür sonu hesaplanan atık kestirimi ile genişletilmiş üretici sorumluluğu önem kazanmaktadır.

Not: Bu yazımızdaki "Yönetilmeyen", sözcüğünün anlamı:

Paneller ömrünü tamamladıklarında veya hasar gördüklerinde, o panellerin uygun şekilde toplanıp, sökülüp, lisanslı bir geri dönüşüm veya atıkları ortadan kaldırma tesisine gönderilmemesi durumu. Yani panel iki şekilde "yönetilmeyen" hale gelebilir:

1. **Ömür sonunda:** Santral kapandığında veya panel değiştirildiğinde, eski panelin bir atık yönetim planı çerçevesinde sökülüp geri dönüştürülmesi yerine sahada bırakılması, gelişigüzel depolanması veya düzensiz bir alana atılması.
2. **Hasar sonrasında:** Dolu, fırtına veya yangın gibi bir olaydan sonra kırılan panel parçalarının hızla toplanıp güvenli şekilde bertaraf edilmesi yerine, aylarca veya yıllarca açık havada, toprakla ve yağmur suyuyla temas halinde bırakılması.

Yazımızın mantığı şuydu: panel sağlam ve yerinde durduğu sürece içindeki kurşun, kadmiyum gibi maddeler cam ve polimer katmanlar arasında kapsüllü kalır, dolayısıyla çevreyle ilişkisi sınırlıdır. Bu kapsülleme ancak panel "yönetilmeyen" hale geldiğinde — yani kontrolsüz biçimde açıkta, parçalanmış olarak uzun süre kaldığında — bozulur ve içindeki maddelerin yağışla yıkanarak toprağa ve suya karışma riski artar. Yani "filonun %10'u yönetilmiyor" ifadesi, "santraldeki panellerin %10'unun ömür sonunda veya hasar sonrasında düzgün bir atık yönetim sürecine girmeden alandabırakıldığı" varsayımı anlamına geliyor.

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](#)
[GÜNEŞ PANELELERİ VERİMLİĞİ VE TİCARİ 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: Kaynakça 6 kalemle sınırlandırılmıştır (30 ülke tablosu için Ember/Wikipedia kaynağı eklendiği için önceki 5 kalemlik listeye bir kalem daha eklenmiştir). 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 / As / Se / Cu: Kurşun / Gümüş / Kadmiyum / Antimon / Arsenik / Selenyum / 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)
Yönetilmeyen (panel): Panelin, ömrünü tamamladığında veya hasar gördüğünde uygun şekilde toplanıp sökülerek lisanslı bir geri dönüşüm/ geri dönüşüm tesisine gönderilmemesi; bunun yerine alanda bırakılması, gelişigüzel depolanması ya da hasar sonrası açıkta, toprak ve yağmur suyuyla temas hâlinde uzun süre kalması durumu