

Çeşitli Ülkelerde ve Türkiye’de Hurda ya da Bozuk Güneş Panellerinin Geri Dönüşüm Maliyeti Sorunu!

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com., 16.07.2026 /YZ/

Daha önceki bir dizi yazı ve seminerlerimizde ayrıntılarıyla açıkladığımız gibi Güneş Enerjisinin karanlık yüzünü de iyice görmek ve panellerde ileride ortaya çıkacak zehirli ama yararlı maddeleri de ayrıştırmayı planlamak gerekir (Bkz.x ve xx). Ancak bunları geri dönüştürmek için önce toplamak, taşımak ve depolamak gerekiyor. Tüm bunların ise bir maliyeti olacağı açık. Gelişmiş ülkelerde bile sorun olabilecek bu işlemler, gelişmekte olan ülkelerde ise bunların miktarlarının milyonlarca tonu bulunduğunda çok büyük maliyetler yaratacağı ve bir çok ülkede geri dönüşüm yerine bunların çöplüklere atılıp çürüyecekleri ve içlerindeki zehirli maddelerin eko sisteme geçecekleri düşünülebilir.. Bu yazımızda bu konunun maliyeti üzerinde duracağız.

Resimlerde Güneş panelleri tabakalarının geri dönüşümleriyle, hasar gören bir Güneş tarlası görülüyor.



1. ABD'de Sorun Teknik Değil, Ekonomik!

Avustralya Adelaide Üniversitesi'nin gerçekleştirdiği ve Waste Management dergisinde yayımlandığı belirtilen "Recycling of photovoltaic modules /x/: Technologies, comparative insights, challenges, and future outlooks" başlıklı araştırma kristal silisyum güneş panellerinin geri dönüşümünde temel sorunun teknik değil, ekonomik olduğunu ortaya koymaktadır. **ABD'de bir panelin geri dönüşüm maliyeti 15–45 ABD doları iken düzenli depolama maliyeti yalnızca 1–5 ABD dolarıdır. Geri kazanılan gümüş ve silisyumun ekonomik değeri; toplama, taşıma, sökme ve işleme maliyetlerini karşılamamaktadır.**

Dünya fotovoltaik kurulu gücünün yaklaşık %95'ini kristal silisyum paneller oluşturmaktadır. Bugünkü teknolojiler yüksek saflıkta gümüş ve silisyumu yeterli verimle geri kazanamadığından geri dönüşüm ekonomik değildir. Araştırmaya göre gerekli teknolojik ilerlemeler, atık miktarındaki artış ve uygun yasal düzenlemeler sürerse ekonomik denge ancak 2030'lu yılların başı ve ortalarında sağlanabilir.

IEA-PVPS kestirimlerine göre kullanım ömrünü tamamlayan panel atıkları 2030 yılında normal senaryoda 1,7 milyon tona, erken değişim senaryosunda 8 milyon tona ulaşabilir. 2050 yılında ise dünya genelinde yaklaşık 60 milyon ton panel atığı oluşacağı öngörülmektedir.

First Solar'ın ince film (CdTe) panellerde %90'ın üzerinde malzeme geri kazanımı sağlayabildiği kamuya açık kaynaklarda sıkça belirtilmektedir. Veolia ve Redwood Materials, kristal silisyum paneller için yeni yöntemler

geliştirmektedir. Ancak bugün hiçbir şirket, devlet desteği olmaksızın kristal silisyum panelleri ekonomik ölçekte geri dönüştürememektedir.

Avrupa Birliği'nin WEEE Direktifi, üreticilere geri toplama ve geri dönüşüm sorumluluğu getirerek alternatif bir model oluşturmuştur. Araştırmacılar; üretici sorumluluğu, geri alma programları, depolama kısıtlamaları, geri kazanım standartları ve geri dönüşüme uygun panel tasarımının zorunlu hale getirilmesini önermektedir.

2. Avrupa ve Diğer Ülkelerde Güneş Paneli Geri Dönüşüm Fiyatları?

ABD'deki serbest piyasa modelinin aksine, Avrupa Birliği'nde güneş panellerinin geri dönüşümü Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (WEEE) Direktifi (2012/19/AB) kapsamında düzenlenmektedir. Direktif, "genişletilmiş üretici sorumluluğu" (Extended Producer Responsibility – EPR) ilkesini esas alır: **panel üreticileri ve ithalatçıları, ürünlerinin ömrünün sonunda toplanması ve geri dönüştürülmesinin finansmanından sorumludur. Bu nedenle Avrupa'da kullanıcı için görünür, doğrudan bir "geri dönüşüm faturası" genellikle oluşmaz; maliyet, panelin satış fiyatına eklenen bir eko-katkı payı yoluyla önceden karşılanır.** IRENA ve IEA-PVPS'in 2016 tarihli "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels" raporuna atfen rapordaki kg-başına rakamların teyidi], kolektif EPR sistemleri sayesinde Avrupa'daki fiili birim geri dönüşüm maliyetlerinin kilogram başına yaklaşık 0,06–0,30 avro düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir; bu da panel başına birkaç avro ile birkaç on avro arasında değişen bir aralığa karşılık gelmektedir.

Fransa

Fransa'da güneş panellerinin toplanması ve geri dönüştürülmesinden, üreticilerin oluşturduğu ve devlet tarafından yetkilendirilen kolektif bir eko-organizma olan SOREN (eski adıyla PV Cycle France) sorumludur. Sistem, panelin gücüne göre değişen ve satış anında tahsil edilen bir eko-katkı payı üzerinden finanse edilmektedir; toplama noktaları çoğu bölgede kullanıcıya ücretsiz sunulmaktadır. ADEME raporlarına atfen, bu modelin panel başına maliyeti nispeten öngörülebilir ve düşük tuttuğu, ancak kristal silisyum panellerin geri kazanım oranlarının hâlâ malzeme bazında sınırlı kaldığı belirtilmektedir.

Almanya

Almanya'da WEEE Direktifi'nin ulusal uyarlaması olan ElektroG çerçevesinde, PV Cycle Deutschland üreticiler adına toplama ve geri dönüşüm yükümlülüğünü yerine getirmektedir. Publicover'a (2026) atfen Almanya'daki asıl sorunun geri dönüşümün teknik olarak mümkün olmaması değil, geri kazanılan malzemelerin (özellikle cam ve alüminyum dışındaki yüksek saflıktaki gümüş ve silisyumun) ekonomik değeri ile işleme maliyeti arasındaki "maliyet açığı" (Kostenlücke) olduğu vurgulanmaktadır. Kilogram başına maliyetlerin, kolektif finansman sayesinde ABD'deki bireysel/piyasa bazlı maliyetlerin genellikle altında kaldığı belirtilmektedir.

İtalya ve İspanya

İtalya'da RAEE sistemi, İspanya'da ise Ambilamp ve Fundación ECOLEC gibi yetkilendirilmiş yönetim kuruluşları, WEEE Direktifi'nin ulusal uygulamaları çerçevesinde güneş panellerinin toplanmasını ve geri dönüştürülmesini organize etmektedir. Her iki ülkede de model Fransa ve Almanya'dakine benzer şekilde üretici finansmanına dayanmakla birlikte, panel başına birim maliyetlere ilişkin ayrıntılı ve karşılaştırılabilir kamu verisi Fransa ve Almanya'ya kıyasla daha sınırlıdır.

Japonya

Japonya'da Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI), 2022 yılından itibaren Feed-in Tariff (FIT) ve FIP destekli güneş enerjisi santralleri için işletme süresi boyunca kademeli olarak biriktirilen zorunlu bir "geri dönüşüm/imha rezerv fonu" uygulamasını yürürlüğe koymuştur. Bu model, ABD'deki gibi panel ömrünün

sonunda ortaya çıkan ani ve yüksek maliyeti, santralin ekonomik ömrüne yayarak önceden fonlamayı amaçlamaktadır. Rezerv tutarının kurulu güce ve panel tipine göre değiştiği, ancak somut geri dönüşüm birim fiyatlarına ilişkin bağımsız ve güncel verilerin sınırlı olduğu belirtilmektedir.

Avustralya

Avustralya'da güneş paneli geri dönüşümü için ulusal düzeyde zorunlu bir üretici sorumluluğu programı bulunmamaktadır; tartışmalar "product stewardship" (ürün yönetimi) çerçevesinde sürmektedir. Victoria eyaleti, 2019 yılından bu yana fotovoltaik panellerin düzenli depolama alanlarına atılmasını yasaklayan ilk ve tek eyalettir; bu durum, ulusal bir sistemin yokluğunda geri dönüşümün depolamaya kıyasla belirgin şekilde daha pahalı kaldığı bir tablo ortaya çıkarmaktadır. Sustainability Victoria yayınlarına atfen panel başına maliyetlerin eyaletten eyalete büyük farklılıklar gösterdiği ve ulusal ölçekte standart bir fiyatlandırmanın henüz oluşmadığı belirtilmektedir.

Güney Kore ve Çin

Güney Kore, 2023 yılı itibarıyla güneş panellerini de kapsayacak şekilde genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) düzenlemelerini yürürlüğe koymuştur ancak birim maliyetlere ilişkin ayrıntılı veri kısıtlıdır. Dünyanın en büyük panel üreticisi ve önümüzdeki on yılda en büyük panel atığı hacimlerinden birini üretmesi beklenen **Çin'de ise ulusal düzeyde oturmuş, zorunlu bir geri dönüşüm rejimi henüz bulunmamaktadır; çeşitli iller ve şirketler düzeyinde pilot toplama ve geri dönüştürme programları yürütülmektedir.**

Türkiye

Türkiye'de kurulu güneş enerjisi kapasitesi, YEKA GES ihaleleri ve lisanssız çatı üstü uygulamalarının yaygınlaşmasıyla son on yılda hızla artmıştır; bu da orta ve uzun vadede önemli miktarda panel atığının gündeme geleceği anlamına gelmektedir. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği (AEEE Yönetmeliği), AB'nin WEEE Direktifi ile büyük ölçüde uyumlu bir çerçeve sunsa da, fotovoltaik panellere özgü, zorunlu ve işlerlik kazanmış ayrı bir toplama/geri dönüşüm rejimi (Fransa'daki SOREN veya Almanya'daki PV Cycle Deutschland benzeri kolektif bir eko-organizma) henüz oturmamıştır. Panel başına veya kilogram başına resmî ve kamuya açık bir birim geri dönüşüm fiyatı şu ana kadar yayımlanmamıştır. Uygulamada, ekonomik ölçekte çalışan özel bir PV geri dönüşüm tesisi henüz sınırlı sayıdadır. Bu tablo, Türkiye'nin şu an için ABD'ye benzer şekilde -güçlü bir üretici sorumluluğu mekanizması olmaksızın- geri dönüşümün düzenli depolamaya kıyasla nispeten pahalı kaldığı bir aşamada olduğuna işaret etmektedir.

3. Karşılaştırmalı Tablo (20 kg Standart Panel Üzerinden)

Not: Rakamlar farklı düzenleyici modeller arasındaki yapısal farkı göstermek için derlenmiş kaba tahminlerdir; kesin fiyat teklifi olarak okunmamalıdır. Kaynak sütunundaki atıflar bağımsız olarak teyit edilmemiştir.

Ülke / Bölge	Düzenleyici Model	20 kg Panel Başına Maliyet tahmini)	Kaynak
ABD	Gönüllü / eyalet bazlı; üretici sorumluluğu yaygın değil	15–45 \$ (düzenli depolama: ~1–5 \$)	Kwong ve ark. (2026)*; IEA-PVPS
AB (genel)	WEEE Direktifi (2012/19/AB) – zorunlu EPR	1,2–6 € (0,06–0,30 €/kg üzerinden); eko-katkı payıyla önceden finanse	RENA & IEA-PVPS (2016)*; PV CYCLE
Fransa	SOREN (eski PV Cycle France) – tek yetkili eko-organizma	2–5 € eko-katkı payı; toplama doğru yerde ücretsiz	ADEME*; SOREN yıllık raporları*

Almanya	ElektroG (WEEE ulusal ayarlaması) – PV Cycle Deutschland	~2–6 € (düşük onlarca sent/kg); üretici finansmanlı	Publicover (2026)*; Stiftung EAR*
İtalya / İspanya	RAEE (İtalya) / Ambilamp, Fundación ECOLEC (İspanya)	Benzer aralık (~2–6 €); ayrıntılı veri sınırlı	Ulusal WEEE kayıt kuruluşları*
Japonya	METI kılavuzları (2022) – FIT/FIP zorunlu rezerv fonu	~15–35 \$ karşılığı (birkaç bin yen) rezerv	METI (2022)*
Avustralya	Ulusal zorunlu program yok; Victoria'da 2019'dan bu yana depolama yasağı	Kaba tahminle ~15–25 AUD; yayalet göre büyük fark	Sustainability Victoria*; hükümet artışmaları
Güney Kore	2023 itibarıyla PV'yi kapsayan EPR	Kamuya açık ayrıntılı veri sınırlı	Kore Çevre Bakanlığı*
Çin	Ulusal zorunlu rejim henüz yok; pilot programlar	Kamuya açık fiyat verisi sınırlı	EA ve sektör raporları*
Türkiye	WEEE Yönetmeliği yürürlükte; PV'ye özgü EPR henüz yok	Doğrulanmamış aralıkla ~10–25 \$ karşılığı (tahmini)	GENSED*; ETKB YEGM*

4. Genel Değerlendirme

Ülkeler arası karşılaştırma, güneş paneli geri dönüşümünün ekonomik sürdürülebilirliğinin büyük ölçüde düzenleyici çerçeveye bağlı olduğunu göstermektedir. ABD gibi üretici sorumluluğunun zorunlu olmadığı piyasalarda geri dönüşüm, düzenli depolamaya kıyasla açıkça pahalı kalmakta ve bu da paneli düzenli depolama alanına gönderme yönünde ekonomik bir teşvik yaratmaktadır. Buna karşın Avrupa Birliği'nde olduğu gibi zorunlu üretici sorumluluğu ve kolektif eko-organizma modelinin uygulandığı ülkelerde, maliyet kullanıcıdan görünür şekilde talep edilmese de satış fiyatına içselleştirilmekte ve toplama/geri dönüştürme altyapısı daha sistematik biçimde finanse edilmektedir. Japonya'daki rezerv fonu modeli ise maliyeti panelin işletme ömrüne yayarak benzer bir öngörülebilirlik sağlamaya çalışmaktadır. Avustralya, Güney Kore, Çin ve Türkiye gibi ülkelerde ise ulusal ölçekte oturmuş bir sistemin henüz bulunmaması, hem fiyatlandırmanın parçalı kalmasına hem de kamuya açık, karşılaştırılabilir veri eksikliğine yol açmaktadır. **Türkiye özelinde, artan kurulu güce rağmen fotovoltaik panellere özgü bir üretici sorumluluğu mekanizmasının henüz oluşturulmamış olması, gelecekteki atık hacmi büyüdükçe ele alınması gereken bir politika boşluğu olarak öne çıkmaktadır.**

Önemli metodolojik not: Bu raporda ülkeler arası doğrudan sayısal karşılaştırma yapılırken, maliyetin kimin tarafından üstlenildiği (kullanıcı/belediye vs. üretici) farkı gözden kaçırılmamalıdır. **AB'deki düşük görünen "kullanıcı maliyeti", toplama-taşıma-işleme giderlerinin ortadan kalktığı anlamına gelmez;** bu maliyetler eko-katkı payı yoluyla tüketiciye zaten satış fiyatı üzerinden yansıtılmaktadır. **Dolayısıyla ham rakam karşılaştırması yerine, "kim öder" ve "toplam sistem maliyeti" ayrımı yapılarak okunmalıdır.**

Kaynaklar

(x)/ Kwong, P., ve ark. (2026). Recycling of photovoltaic modules: Technologies, comparative insights, challenges, and future outlooks. Waste Management.
Publicover, B. (2026, 5 Haziran). Das zentrale Problem beim Photovoltaik-Recycling: Die Kostenlücke zwischen Wiederverwertung und Entsorgung. Energiewende – Jürgen Schöttle.
International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). PV Module End-of-Life raporları.

International Renewable Energy Agency (IRENA) & IEA-PVPS. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels.

Avrupa Parlamentosu ve Konseyi. (2012). 2012/19/AB sayılı Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (WEEE) Direktifi.

SOREN (eski adıyla PV Cycle France). Yıllık faaliyet ve geri dönüşüm raporları.

ADEME (Agence de la transition écologique). Fotovoltaik panel atık yönetimi raporları.

PV CYCLE. Avrupa fotovoltaik toplama ve geri dönüşüm istatistikleri.

Stiftung Elektro-Altgeräte Register (Stiftung EAR) / PV Cycle Deutschland. ElektroG kapsamında PV panel geri dönüşüm verileri.

Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI). (2022). FIT/FIP kapsamındaki güneş enerjisi santralleri için geri dönüşüm/imha rezerv fonu rehberi.

Sustainability Victoria. Fotovoltaik panel atık yönetimi ve düzenli depolama yasağı ile ilgili yayınlar.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). Çin ve küresel fotovoltaik atık yönetimi üzerine sektör raporları.

Kore Çevre Bakanlığı. Genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) düzenlemeleri.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği (AEEE Yönetmeliği).

GENSED (Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Sanayicileri Derneği). Türkiye güneş enerjisi sektör raporları.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM). Güneş enerjisi kurulu güç ve YEKA GES verileri.

(xx) <https://www.radyasyonyatakan.com/yazi/gunes-enerjisinin-karanlik-yuzu-10-dakikalik-video-y-atakan>

(xxx) 11.04.2026 Ankara Kızılay iş merkezi ve 22.04.2026 İstanbul Marmara üniv.seminerlerim