



FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNDE YAŞANAN İKARUS SENDROMU

Aslı BİRTÜRK¹, Melih Soner ÇELİKTAŞ*²

¹Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi Anabilim Dalı, İzmir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-3637-2821>

²Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi Anabilim Dalı, İzmir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-0597-5133>

Anahtar kelimeler

Öz

FV geri dönüşümü; FV atık; kristal silisyum, kritik mineraller; kurulu güç, yenilenebilir enerji

Bu çalışmada, fosile dayalı enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılmasında önemli bir role sahip olan fotovoltaik (FV) sistemler, sürdürülebilirlik kapsamında incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde kullanılan teknolojiler arasında önemli bir paya sahip olan FV sistemler, görünür gelecekte ekonomik ömürlerini tamamladıklarında çevresel ve ekonomik sonuçlara sebep olacaktır. FV modüller ortalama 25-30 senelik ömür süresi boyunca temiz enerji üretimine katkı sağlarken dünyamız için oluşturacağı potansiyel tehlikeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Yakın gelecekte daha yoğun bir şekilde karşımıza çıkacak olan FV modül atıkları ilgili üreticilerin, kullanıcıların, devletlerin ve araştırmacıların daha hızlı bir şekilde sorumluluk alması ve eylem planlarının hayata geçirilebilmesi için FV modüllerin geri dönüştürülerek çeşitli endüstriyel alanlara yeniden kazandırılması ve gerekli girişimlerin politikalarla desteklenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, FV modüllerde yer alan kritik minerallerin hammadde kaynaklarının tükenmesi tehlikesi artarken, geri dönüşümü yapılmadan çevreye bırakılan FV modüller çevresel tehditler oluşturmaya devam edecektir.

Gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin 2050 yılına kadar sahip olacağı FV sistem kurulu güçleri ve oluşacak FV modül atık miktarları on yıllık periyotlarla değerlendirilmiştir. Kurulu güç tahminleri için aylık ve yıllık artışlar ayrı ayrı göz önüne alınarak, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayınlanan verilerle karşılaştırılmıştır. Atık potansiyeli tahminleri, ekonomik ömür sonu ve erken dönem atıkları olarak ele alınmıştır. Toplam atık potansiyeli, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yayınlanan gelecek projeksiyonlarına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, FV kurulu güç tahminlerinin ETKB tahminleri ile benzerlik gösterdiği, atık potansiyelinin IEA ve IRENA'nın ülkemiz için hazırladığı projeksiyonların yaklaşık üç katı büyüklüğünde olacağı görülmektedir. Buna göre, FV modüller geri dönüştürülmediği takdirde, çevresel atık potansiyelinin 2050 yılında 1 milyon 706 bin 159 tona ulaşacağı tahmin edilmektedir.

* soner.celiktas@ege.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1280950

ICARUS SYNDROME IN THE SUSTAINABILITY OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Keywords

PV recycle; PV waste; crystalline silicon; critical minerals; installed power; renewable energy

Abstract

In this study, photovoltaic (PV) systems, which have a key role in reducing the consumption of fossil-based energy resources, are analyzed within the scope of sustainability. PV systems, which have an important share among renewable energy sources, will cause environmental and economic consequences at the end of their economic life. While PV modules contribute to clean energy production for an average lifetime of 25-30 years, they also contain potential dangers for our world. Producers, consumers, governments, and researchers related to PV module wastes, which will be encountered more intensively in the near future, should take responsibility more quickly and initiatives on this issue should be supported by policies.

In this study, the PV system installed capacity and the amount of PV module waste that will be generated in Turkey until 2050 are evaluated in ten-year periods. Monthly and annual increases are considered separately for the installed capacity estimates and compared with the data published by the Ministry of Energy and Natural Resources (MENR). Waste potential estimates are considered as end-of-economic life and early waste. The total waste potential is evaluated according to future projections published by the International Energy Agency (IEA) and the International Renewable Energy Agency (IRENA). The results show that the PV installed capacity estimates are close to the ETKB estimates, and the waste potential will be approximately three times the size of the projections prepared by IEA and IRENA for Turkey. Accordingly, PV module waste potential is estimated to reach 1 million 706 thousand 159 tons in 2050.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 12.04.2023

Kabul Tarihi : 12.07.2023

Research Article

Submission Date : 12.04.2023

Accepted Date : 12.07.2023

Extended Abstract

Introduction

The recycling of PV modules has a key importance in the sustainability of electricity generation from solar energy. Conservation of raw material resources, recycling of wastes into production, economic benefits and protection of the environment are the issues that indicate the importance of PV recycling. In particular, the demand intensity will follow for the recycling facilities to increase, after the PV modules installed in the first decade of the 2000s became unusable. PV module wastes will turn into a rapidly growing problem in countries that do not take the necessary measures for recycling.

Research Purpose

In this study, it is pointed out that the countries that rapidly increase their PV system capacities not only make successful contributions to the green transformation, but also that the developments that appear as success will lead the countries to environmental and economic problems if no measures are taken. In this context, the situation of the World and Turkey in PV recycling has been examined. Regarding the sustainability of PV systems, international developments and future projections were evaluated. This study aims to contribute to the estimation results obtained by evaluating the PV module waste potential in the light of current data, to be prepared for the environmental and economic problems that Turkey will face.

Methods

As in the rest of the world, the renewable energy sector in Turkey is affected by various social, economic, social, and political situations. This effect can last on a monthly or annual basis. For this reason, extrapolation equations have been obtained over both the monthly increase amount and the annual increase amount in the estimation of Turkey's photovoltaic installed power. The amount of PV module waste until 2050 has been determined based on the estimated installed powers. In the next step, the obtained results are compared with the waste amounts estimated by IEA and IRENA for Turkey.

Results and Discussion

Considering the average life of 25 years, it is predicted that Turkey will encounter PV wastes that complete their life in 2043 for the first time. If the PV modules installed in 2018-2025 are not recycled only due to early failures, by 2050, 1361324 tons of modules will reach the end of their life and become waste. The module losses, which became waste in the early period due to the malfunctions in the PV modules installed between 2018-2050, will reach 11436 tons in 2030, 122439 tons in 2040, and 344834 tons in 2050.

IEA and IRENA published a report of PV module waste estimates in June 2016. The fact that the PV systems in Turkey started in 2016 and were 939 MW at the end of the year had an impact on the lower estimate in the report published in June in the same year. The fact that the installed capacity of the PV system has increased by 5 times to 5062 MW at the end of 2018, followed by an average annual increase of 1000 MW clearly shows that the amount of waste to be generated in 2050 will be much higher than the forecast in the report.

It is understood that this study's estimates of waste modules in 2030 and 2040 (due to failure only) and IEA and IRENA estimates are quite close. However, in 2050, when modules that become waste at the end of their life cycle are considered, as well as modules that become unusable in the early period due to failure, it is expected that there will be about three times more waste than IEA and IRENA estimates. Accordingly, if PV modules, which become unusable both at the end of their life and in the early period, are not recycled, 1 million 706 thousand 159 tons of modules will cause environmental and economic problems in Turkey in 2050.

Conclusion

Banning the disposal of PV modules that have completed their economic life should be one of the first political steps that countries will take in this regard. Otherwise, PV modules released into the environment in an uncontrolled manner will cause environmental chaos in many countries until mandatory policies are organized.

For the recycling of materials, it is necessary to bring the minerals in the PV modules back into production at the highest quality possible by emphasizing environmentally friendly, energy efficient, effective, and economical methods. In this regard, module manufacturers and researchers are expected to take joint initiatives. It is clearly seen that Turkey, which has an important position in terms of PV system capacity, will face the problem of PV module waste in the near future, as in the world. It is important that the actions to be taken in this context are carried out in the light of legal regulations. All cooperation in this regard will form the basis for important steps to be taken to ensure Turkey's energy security in the future.

1. Giriş

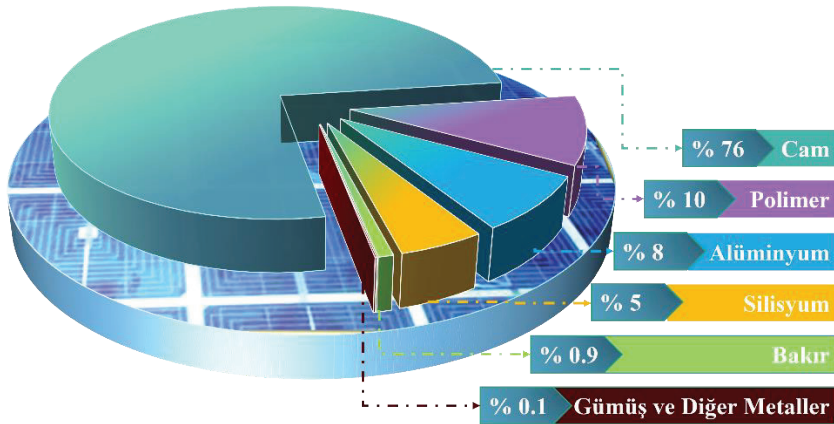
Fotovoltaik (FV) modüllerin geri dönüşümü içinden çıkılamayacak bir labirent haline gelmeden bu konuda çalışan kurum ve kuruluşlar başta olmak üzere sektörün tüm paydaşlarının politika yapımcılarla bir araya gelip yenilenebilir enerji yatırımlarının sürdürülebilirliği konusunda acil eylemde bulunmaları zorunlu hale gelmektedir. Gerek yatırımcıların iştahı gerekse üreticilerin yasal mevzuat eksikliğinden kaynaklanan bu durumdan faydalanmaları, yenilenebilir enerji sektöründe geleceğe dönük bir sarmal oluşturup zamanla İkarus sendromuna dönüşme potansiyeli taşımaktadır. Küresel ölçekte yatırımlar hızla artarken gelecek zaman diliminde yenilenebilir enerjilerin omurgasını oluşturan emtianın tedarikinde yaşanılacak problemler sektör için küresel bir Minotaurus'a dönüşebilir. Burada problem sarmalını oluşturan konu, FV modüllere ekonomik ömrünün sonunda ne olacağından ziyade, enerji üretimindeki dönüşüm hızının artırılarak yenilenebilir enerjiler içerisinde FV kurulum miktarlarının büyümesinin hedefleniyor olmasıdır (Balch ve Armstrong, 2010; Georgakakis ve Lebaron, 2018; Halevi ve Varoufakis, 2003; Heineman, 2011).

Küresel enerji krizinin yenilenebilir enerji üzerindeki yadsınamaz etkisi de FV sistem kurulum miktarlarındaki artışı tetiklemektedir. 2022 yılı sonunda FV sistemlerin küresel kurulu gücü 1185 GW (yaklaşık 1.2 TW) olarak belirlenmiştir (IEA, 2023). Uluslararası Enerji Ajansı'nın yıllık raporuna göre, 2022-2027 yılları arasındaki yenilenebilir enerji kapasitesi küresel ölçekte 2400 GW'a erişecektir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi kapasitesinin ise, bu beş yıllık süreçte iki kat artması beklenmektedir (IEA, 2022b). Ülkemizdeki PV sistem kurulu gücü artış miktarı da küresel yönelime uyum göstermektedir. Türkiye'nin FV kurulu güç kapasitesi, 2022 yılı sonunda 9.4 GW'a erişmiştir. 2023 yılının ilk yarısında 10 GW eşiğini geçmiştir (TEIAS, 2023; TEIAS, 2022). 2035 yılına kadar Türkiye'deki kurulu gücün mevcut durumun 5 katına ulaşması beklenmektedir (ETKB, 2022).

Dünyadaki FV sistem kurulumlarının %95'ini kristal silisyum (c-Si) modüller oluşturmaktadır (IRENA ve IEA, 2016). Günümüzde, bu oranın %84'ü tek kristalli FV modül kurulumlarını temsil etmektedir. 2019 yılında tek kristalli FV modüllerin oranının %66 olduğu göz önüne alındığında, c-Si teknolojisinin zaman içinde diğer FV teknolojilere karşı önemli bir başarı elde ettiği görülmektedir (Fraunhofer ISE ve PSE Projects GmbH, 2022). Bu bağlamda, c-Si teknolojisinin verim ve maliyet dengesi açısından sektördeki hakimiyetini korumaya devam ettiğini söylemek mümkündür. 2012-2022 yılları arasında, küresel ölçekte FV kapasitesi 100 GW'dan 1 TW'a erişmiştir. Böylelikle, c-Si modüller, temiz enerjiye geçişin hızlanmasında kayda değer katkılarda bulunmuştur (IEA, 2022a).

FV modüllerin farklı güç, verimlilik ve boyuta sahip çeşitleri bulunmaktadır. Tek ve çok kristalli silisyum modüller, cam, polimer, alüminyum, silisyum, bakır, gü-

müş ve çeşitli metaller içermektedir (Şekil 1). Birbirinden farklı FV modül teknolojilerindeki kadmiyum, selenyum ve kurşun gibi tehlikeli malzemelerin kontrolü bir şekilde ayrıştırılması gerekmektedir. Özellikle kurşun, c-Si modüllerde de bulunan, çevresel açıdan tehlikeli bir elementtir. Ayrıca, gümüş, bakır gibi nadir elementler olabildiğince yüksek saflıkta geri dönüştürülmelidir. Silikon, cam gibi gömülü enerji düzeyi yüksek malzemelerin geri dönüşüm kalitesine bağlı olarak yeniden kullanım alanlarının belirlenmesi önem arz etmektedir (IRENA ve IEA, 2016). Yeşil enerji dönüşümü kapsamında incelendiğinde, FV modüllerdeki kritik minerallerin (bakır, alüminyum) hammadde kaynakları arzının artan talebi karşılama yetersiz kalması nedeniyle modüllerdeki minerallerin ekonomik ömürlerinin sonunda yeniden üretime kazandırılması sürdürülebilir üretim açısından bir zorunluluk haline gelmektedir. Önümüzdeki yirmi yıl içinde bakır talebinin neredeyse üç katına çıkacağı, gümüş ve silisyum talebinin %40 artacağı tahmin edilmektedir (IEA, 2021a). Yenilenebilir enerji üretimine önemli katkılar sağlayan fotovoltaik panellerin geri dönüşüm safhasında da çevreye duyarlı bir etki oluşturularak, marjinal fayda prensibinden ödün verilmeden dönüştürülmesi ihtiyaç duyulan bir yaklaşımdır.



Şekil 1. Tipik Bir FV Modülde Bulunan Minerallerin Kütlece Dağılımı

Literatür incelendiğinde, kristal silisyum panellerin geri dönüşümü için birbirinden farklı yöntemlerin uygulanmış olduğu görülmektedir. Kristal silisyum panellerin geri dönüşümünde çoğunlukla mekanik, kimyasal ve termal yöntemler (Kim ve Lee, 2012; Akimoto, Iizuka ve Shibata, 2018; Wang, Song, Zhang, Zhuang, Ma ve Bai, 2019) öne çıkmaktadır. Kullanılan bu yöntemlerin büyük çoğunluğu, yalnızca fotovoltaik paneller için değil ekonomik değere sahip birçok farklı ürünün geri dönüşümü için kullanılan geleneksel geri dönüşüm yöntemleridir. Ancak, geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin fotovoltaik paneller kapsamında

daha dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı fotovoltaik modüllerde, irdelenmesi gereken en önemli noktalardan biri de çevreye olan etkisidir. Fotovoltaik panellerin delaminasyon işlemi sırasında, EVA (etilen vinil asetat) katmanın panel içindeki diğer malzemelere yapışması en önemli sorunlardan biridir (Li ve diğ., 2022). Özellikle, EVA katmanının ayrılması için kimyasal işlemlerin sıkça kullanılması, geri dönüşüm prosesleri esnasında çevreye zarar veren ve toksik etki yaratan kimyasal atık oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, fotovoltaik modüllerin geri dönüşümü için modüllerdeki her bir katmanın kendi özelinde irdelenerek, yenilikçi yöntemlerle ele alınması akademik araştırmalarda öncelenen bir gerekliliktir. Literatürdeki yenilikçi yöntemlere bakıldığında, çeşitli organik çözücülerle ayrıştırılması ya da farklı alanlarda farklı amaçlarla kullanılan yeni teknolojilerin fotovoltaik panellerin geri dönüştürülmesi alanında da kullanılmasıyla ilgili çalışmalar olduğu görülmektedir (Latunussa ve diğ., 2016; Chowdhury ve diğ., 2020).

Dünya genelinde bugüne kadar FV modül geri dönüşümü özelinde yasal bir mevzuat yayınlanmadığı bilinmektedir. Ancak, Avrupa'nın WEEE - Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları Direktifi'nde (2012/19/EU), fotovoltaik modüllerin de diğer elektrikli ve elektronik cihazlar gibi değerli ikincil hammadde kaynaklarının geri kazanımı için özel işlemlerden geçirilerek geri dönüşümünün üreticiler tarafından sağlanması gerektiği belirtilmiştir (Council of the European Union, 2019). Kurulumların artışı ile birlikte her yıl katlanarak büyüyen fotovoltaik modül potansiyel atıklarının geleceği için yalnızca bu kapsamda ele alınan özel bir direktif yayınlanması gerektiğinin sinyalleri Uluslararası Enerji Ajansı gibi önemli kurumlar tarafından verilmektedir. Bu kapsamda değerlendirilen en önemli konular, fotovoltaik modüllerin içerdiği değerli kritik mineraller özelinde incelenmiştir. Değerli minerallerin hammadde kaynaklarının, artan üretim talebi nedeniyle 2050 yılına kadar beklenenin üzerinde azalacağı öngörülmesi, hem ekonomik hem de çevresel açıdan fotovoltaik modüllerin geri dönüşümünün yakın gelecekte Avrupa'da zorunluluk haline geleceğini açıkça göstermektedir (IEA, 2021a).

Bu çalışmada öncelikli olarak, FV sistem kapasitelerini hızla artıran ülkelerin yeşil dönüşüme başarılı katkılar sağlamanın yanısıra, başarı olarak görünen gelişmelerin önlem alınmadığı takdirde, kendilerini bekleyen çevresel ve ekonomik problemlere sürükleyeceğine dikkat çekilmiştir. Bu kapsamda, Dünyanın ve ülkemizin FV geri dönüşümündeki durumu incelenmiştir. FV sistemlerin sürdürülebilirliği hususunda, uluslararası gelişmeler ve gelecek projeksiyonları değerlendirilmiştir. FV modül atık potansiyelinin güncel veriler ışığında değerlendirilmesi ile elde edilen tahmin sonuçlarının, Türkiye'nin karşılaştığı çevresel ve ekonomik problemlere karşı hazırlıklı olabilmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. FV Modüllerin Sürdürülebilirliği

Dünyadaki fotovoltaik kurulumlarının başladığı milenyumla birlikte günümüze kadar geçen süreçte her geçen yıl kurulu gücün arttığı açıkça görülmektedir. Çeşitli ülkelerin güneş enerjisi alanında izlediği politikalara bakıldığında, yakın gelecekte bazı ülkelerin kurulu gücünde büyük sıçramalar görüleceği öngörülebilmektedir. Avrupa Birliği, 250 m²'den büyük zemin alanına sahip tüm eski ve yeni binalarda çatı üstü fotovoltaik panellerin kurulumunu önümüzdeki yıllarda zorunlu hale getirmektedir. Konutlarda ise on yıl içerisinde tüm yeni binalarda çatı üstü FV sistemler zorunlu olacaktır. Ayrıca, Avrupa Komisyonu Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle doğalgaz tedarikinde yaşanan problemlere önlem olarak, REPowerEU - Rus fosil yakıtlarına bağımlılığı hızla azaltma ve yeşil geçişi hızlandırma planını sunmuştur. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın kademeli olarak bitirilmesi ve iklim değişikliği ile mücadele edilmesi doğrultusunda Avrupa Birliği Yeşil Dönüşüm kapsamında güçlenmeyi hedeflemektedir (European Commission, 2022b). Bu doğrultuda belirlenen eylem planına göre, önümüzdeki birkaç yıl içinde FV sistem kurulu gücünü mevcudun iki katına çıkarılması ve 2030'a kadar toplam FV kurulu gücün yaklaşık 600 GW'a ulaşması için Güneş Enerjisi Stratejisi yayınlanmıştır. Stratejiler kapsamında değerlendirilen FV sistemlerin sürdürülebilirliği ile ilgili olarak, Ecodesign ve Energy Labelling düzenlemelerinin revizyonu yapılacaktır. Bu revizyon, FV modüllerin verimliliği, dayanıklılığı, temin edilebilirliği ve geri dönüştürülebilirliği kapsamında olacaktır. FV modüllerin geri dönüşümü, 2012 yılından itibaren Avrupa Komisyonu tarafından mevzuatlar aracılığıyla gündeme getirilmektedir. En belirgin yoğunlukta ilk FV modül atık miktarının 2025 yılında ortaya çıkacağı ve yıllar içinde atık miktarının artarak çok kısa sürede FV modül geri dönüşüm endüstrisi ihtiyacını beraberinde gerektireceği vurgulanmaktadır. Bu vurgudaki dikkat çeken nokta ise, geri dönüşümün daha yenilikçi bir hale gelmesi gerektiğidir (European Commission, 2022a). Bu kapsamda, 2023 yılında yapılacak revizyonda FV modül geri dönüşümü adına Avrupa'da önemli adımlar atılması beklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması ve fosil enerji kaynaklarına bağımlılığın azaltılması yaygın ve haklı bir görüştür. Ancak, sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde değerlendirildiği takdirde, FV modüllerin yalnızca kapasite artışına olan etkisi değil, gelecekte sebep olacağı çevresel atık potansiyeline dikkat çekilmelidir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından 2016 yılında yayınlanan gelecek projeksiyonuna göre, 2050 yılına kadar tüm dünyada 78 milyon ton fotovoltaik modül atığı meydana gelecektir (IRENA ve IEA, 2016). Projeksiyonun yapıldığı 2016 yılına göre, son 5 senelik fotovoltaik kurulu güç kapasitelerine bakıldığında; 2011 yılında 72 GW, 2012 yılında 101 GW, 2013 yılında 137 GW, 2014 yılında 175 GW, 2015 yılında 223 GW ve 2016 yılında 295 GW olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, 2016 yılı sonrası artan kurulu güç hızına bağlı

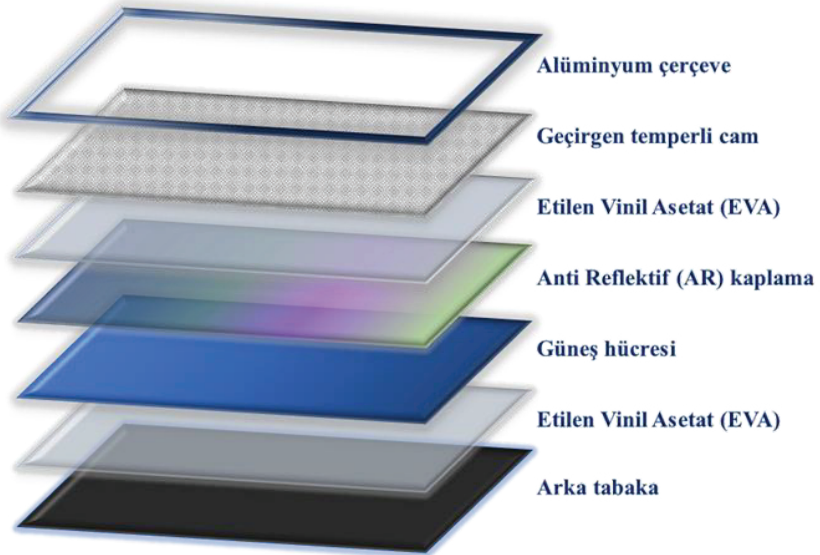
olarak, öncesindeki kurulum artışına göre, 2050 yılına gelindiğinde tahmin edilen atık miktarından daha fazla atık ortaya çıkacağı sonucuna varılmaktadır. Öyle ki, 2016 yılı sonrasında senelik kurulu güç kapasitesinde 100 GW'ın üzerinde artış meydana gelmiştir (IRENA, 2022). Her yıl artan fotovoltaik sistem kapasitesi göz önüne alındığında, 2030 yılı itibariyle atık potansiyelinin ve geri dönüşüm tesislerinin artacağı açıkça görülmektedir.

2.1 FV Geri Dönüşümün Dünya'daki Durumu

Çeşitli katmanlardan oluşan c-Si modül teknolojisinin (Şekil 2) yüksek saflıkta geri dönüştürülebilmesi için sürecin gelişmiş yenilikçi yöntemlerle yürütülmesi gerekmektedir (Peplow, 2020). Atık probleminin her geçen yıl daha belirgin bir hale gelmesine paralel olarak, yenilikçi yöntemler ortaya koyan bilimsel çalışmalar ve endüstriyel alanda gelişmeler artmaktadır (Maani, Celik, Heben, Ellingson ve Apul, 2020; NREL, 2021a).

FV modüllerin geri dönüşümü esnasında izlenen adımlar genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır;

- Alüminyum çerçevenin ve bağlantı kutusunun çıkarılması
- Camın ve silisyum hücrenin polimer katmanlardan uzaklaştırılması
- Değerli mineraller (bakır, gümüş, kalay gibi) başta olmak üzere geri kazanılan tüm minerallerin ayrıştırılması ve saflaştırılması



Şekil 2. Tipik Bir Kristal Silisyum FV Modülün Katmanları

Geleneksel geri dönüşüm alanında cam ve metallerin geri dönüşümü zaten yapılmaktadır ancak FV modüllerin geri dönüşümünün özel olarak incelenmesindeki temel zorluğun sebebi silisyum katmanının ön ve arka yüzeyine lamine edilmiş olan EVA katmanıdır. EVA katmanı reçine yapısı nedeniyle diğer katmanlara yapışarak geri dönüştürülmek istenen minerallerin miktarını ve saflığını etkilemektedir (Dias, Javimczik, Benevit, ve Veit, 2017; EPA, 2022). Yapılan deneysel çalışmalara göre, laboratuvar ortamında FV modüllerdeki minerallerin her biri için toplam geri dönüşüm oranı ortalama %95 seviyelerine ulaşmıştır (Deng, Zhuo, ve Shen, 2022; Latunussa, Ardente, Blengini, ve Mancini, 2016). Bu çalışmalar teknolojik hazırlık seviyesi olarak 4-6 arasında olup gerçek ortama taşınmamıştır.

Henüz spesifik bir yasal mevzuat bulunmamasına rağmen sektörel açıdan da girişimler bulunmaktadır. Avrupa'daki ilk fotovoltaik modül geri dönüşüm tesisi, 2018 yılında Fransa'da Veolia tarafından açılmıştır. Geltz Umwelt-Technologies isimli Alman Şirketi, geri dönüşüm tesisinde fotovoltaik modüllerden %95 oranında silisyum mineralini geri kazanabildiklerini açıklamıştır. Fotovoltaik modül geri dönüşüm alanında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) ilk şirket Recycle PV Solar'ın, Avrupa'da da tesisleri bulunmaktadır. FV sektörünün önemli paydaşları tarafından kurulan PV CYCLE, Avrupa'da 300'den fazla atık toplama merkezine, atık modül transferi sorumluluğunu üstlenmiştir. Girişimler olması rağmen, ortaya çıkabilecek zorlukların düzenlenmesinde görev alacak paydaşların katılımını arttırmak amacıyla teşvik mekanizmalarının gerekliliği bu noktada dikkat çekmektedir. Genel olarak fotovoltaik modüllerin geri dönüşümü alanında öne çıkan diğer şirketler; First Solar (ABD), Reclaim PV (Avustralya), PV Cycle (Belçika), Cleanlites Recycling (ABD) ve Solucciona Energia (İspanya) olarak karşımıza çıkmaktadır (Curtis ve diğ., 2021; IRENA and IEA, 2016; Sharma, Pandey ve Kolhe, 2019; Tao ve diğ., 2020).

WEEE direktifinde, tüm AB ülkelerindeki atık yönetiminden modül üreticilerinin sorumlu olduğu açıkça belirtilmektedir. Japonya'nın Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI) ve Çevre Bakanlığı tarafından WEEE direktifinde olduğu gibi ömrünü tamamlayan FV modüllerin toplanması, geri dönüştürülmesi ve işlenmesine yönelik sorunlar için yol haritası belirlenmiştir. Geri dönüşümü destekleyici gönüllü derneklerin (JPEA) yayınladığı öneriler aracılığıyla da gerekli geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi için kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır (Sharma ve diğ., 2019).

ABD genelinde de FV sistemler özelinde yasal bir mevzuat bulunmamaktadır. Ancak, eyaletlerin kendi sınırları dahilinde belirlediği sorumluluklar vardır. Buna göre, Washington, ekonomik ömrünü tamamlayan FV modüllerin geri alınımı-

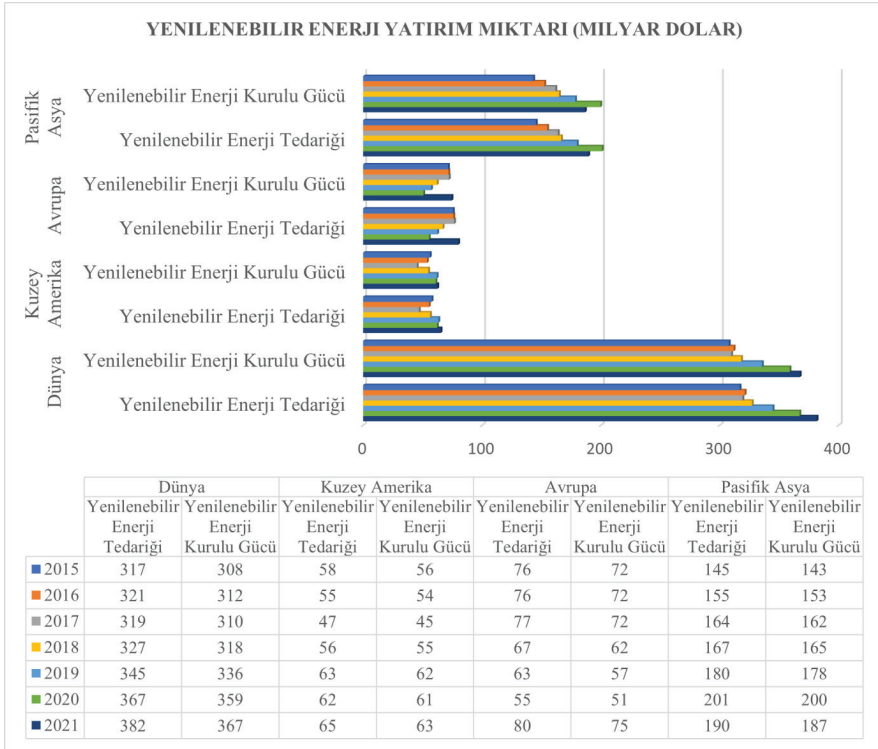
nı ve geri dönüşümünü destekleyen programı senato kararı ile kabul etmiştir. Kaliforniya'da, FV modül atıkların sınıflandırılması girişimi sayesinde regülasyonların düzenlenmektedir (Fthenakis ve diğ., 2020). First Solar'ın taahhüt ettiği gibi, FV modüllerin üreticiler tarafından geri dönüştürülmek üzere toplanması regülasyonların geliştirilmesinin önünü açacaktır. Ancak her üreticinin, geri dönüşüm tesisi girişiminde bulunmayacağı göz önüne alınarak, atıkların toplanması ve ilgili geri dönüşüm tesislerine transfer edilmesinde rol alması önemli bir katkı sunabilecektir. Bu durumda, ülkelerin kendi içindeki politikaları çeşitli farklılıklara sebep olabileceği için devlet kurumlarının iş birliği önem arz etmektedir (IRENA ve IEA, 2016).

Bu konuların planlı bir şekilde ele alınabilmesi için ilgili politikaların oluşturulması gerekmektedir. Geri dönüşüm süreçlerinde gerekli nakliye, depolama, proseslenme, yeniden kullanım için endüstriyel üretime ulaştırma gibi konular açıklığa kavuşturulmalıdır. Buna binaen ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, FV geri dönüşümün dögüsel ekonomiye etkisine dikkat çekmektedir. Gelecek öngörülerine göre, 2030 yılına kadar ABD'de FV geri dönüşümden kazanılan değerli minerallerin getirisi 60 milyon USD'a erişebilir, 2050 yılında ise bu miktar 2 milyar USD'na yükselebilir. Ancak, ABD'de FV geri dönüşüm için bir teşvik mekanizması da bulunmamaktadır. Atık haline gelen FV modüllerin, geri dönüşüm yapan ülkelere transfer edilmesi de bir başka yaklaşımdır ancak bu seçenek de kendi içinde uluslararası anlaşma düzenlemeleri gereksinimine neden olacaktır (NREL, 2021b).

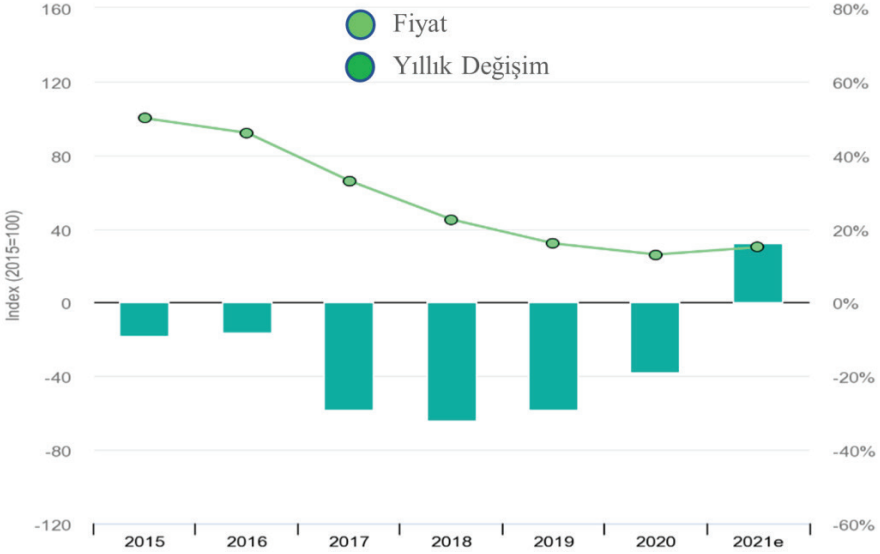
Dünya genelinde yenilenebilir enerji yatırımları artış göstermektedir. Farklı olarak, Avrupa kıtasında (Türkiye dahil) yatırım miktarlarında (kurulu güç ve tedarik) bir önceki yıla kıyasla düşüş yaşanmıştır (Şekil 3). Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle, Avrupa'nın Rusya'ya olan enerji bağımlılığı, doğalgaz tedariginde tehdit oluşmasına sebep olmuştur. Önemli bir farkla yatırımların yükseliş yaşadığı bu yılda, Avrupa dışı bağımlılığı azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji yatırımlarına ağırlık vermiştir. Avrupa Birliği REPowerEU planı ile stratejik yol haritasını açıklamıştır. 2022 yılında, diğer yıllardaki yatırımlara kıyasla, ilk kez toplam 440 milyar doların üzerinde FV sistemlere yatırım yapılmıştır. Bu durum, yenilenebilir enerji yatırımlarının öne çıkan çeşitlerinden biri olan güneş enerjisi yatırım trendlerinin daha da yükselişine neden olmuştur (European Commission, 2022a, 2022b; IEA, 2022c).

Uluslararası Enerji Ajansının 2022 yılında yayınladığı rapora göre, yenilenebilir enerji kaynakları kapasitesi 2026 yılında %95 oranında artacaktır (IEA, 2022c). Bu yükselişten en fazla pay alacak yenilenebilir enerji kaynaklarından birinin de güneş enerjisi olması beklenmektedir. Yıllar içinde FV modüllerin maliyetinde meydana gelen düşüş (Şekil 4), güneş enerjisini diğer yenilenebilir enerji tekno-

lojilerinin arasındaki en ucuz enerji üretim seçeneklerinden biri konumuna getirmiştir (IEA, 2022c). Şekil 4’de görüldüğü üzere, Covid-19 pandemisi nedeniyle yaşanan talep daralmasıyla 2020 ve 2021 yıllarındaki maliyet düşüşünde duraklama meydana gelmiştir. Dünyada yaygın etki yaratan gelişmeler maliyet eğrisini zaman zaman etkilese de mevcut öngörülere göre, FV sistem maliyetlerin sınırlı bir miktar daha düşeceği ve kapasite artışı nedeniyle öncü konumunu güçlendireceği görülebilmektedir. FV sistemlerin sektördeki varlığını güçlendirmesi, yenilenebilir enerji yatırımlarındaki payının artmasına, gelecekteki FV modül atık miktarının da paralel olarak artmasına neden olacaktır. Özellikle, 2000’li yılların ilk on senesinde kurulan FV modüllerin ömürlerini tamamlamasıyla birlikte, bir müddet sonra seri bir şekilde geri dönüşüm yapan tesislerin artması için talep yoğunluğu da ard arda gelecektir. Geri dönüşüm için gerekli önlemleri almayan ülkelerde, FV modüllerin atık yığını haline gelmesi, hızla büyüyen bir probleme dönüşecektir.



Şekil 3. 2015-2021 Yılları Arasında Kurulu Güç ve Tedarik Kapsamında Yapılan Yenilenebilir Enerji Yatırımları (IEA, 2021b)



Şekil 4. 2015-2021 Yılları Arasında FV Modül Maliyetlerinin Eğilimi (IEA, 2022c)

2.2 Türkiye’de FV Geri Dönüşümün Durumu

Güneş enerjisi elektrik üretim kapasitesi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kayda değer bir yükseliş göstermektedir (Çanka, 2015). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yapılan projeksiyon çalışmalarına göre, Türkiye’nin 2035 yılındaki yenilenebilir enerjiden elde edilen toplam elektrik kurulu gücü 189,7 GW, kaynaklar arasında en büyük paya sahip olan güneş enerjisi kurulu gücü ise 52,9 GW olarak tahmin edilmektedir (ETKB, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın (IRENA) ortak yayınladığı gelecek projeksiyonuna göre, Ülkemizde 2030 yılında 12.500 ton, 2040 yılında 120.000 ton, 2050 yılında 600.000 ton FV modül atık haline gelecektir (IRENA ve IEA, 2016).

Türkiye’de de diğer ülkelerde olduğu gibi FV modüllerin geri dönüşümüne yasal mevzuatlarda henüz yer verilmemiştir. Endüstriyel açıdan da, FV sistemlerin geleceğine dair bir girişim bulunmamaktadır. Bilimsel çalışmalar açısından değerlendirildiğinde, henüz çevreye duyarlı özgün bir FV geri dönüşüm yönteminin gerek ülkemizde gerekse küreselde ortaya konmadığı görülmektedir. Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) tarafından yayınlanan rapora göre, Türkiye’de FV teknolojiler alanında çalışan toplamda 10 adet enstitü/merkez/bölüm bulunmaktadır (TÜBA, 2018). Bilimsel açıdan çalışma imkanına sahip sınırlı sayıda kurum bulunmasına rağmen, çoğu kurumun köklü geçmişe sahip olması nedeniyle FV

modüllerin geri dönüşüm ihtiyacı için endüstriyi destekleyebilecek araştırma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

3. Yöntem

Gerçekleştirilen çalışmada ülkemizdeki FV modüllerin gelecekte yaratacağı atık potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme için öncelikle, Türkiye'nin 2050 yılına kadar belirli aralıklarla erişeceği FV sistem kurulu güçleri üzerinden bir projeksiyon çalışması yapılmıştır. 2019-2022 yılları arasındaki FV kurulu güç verileri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyulmuştur.

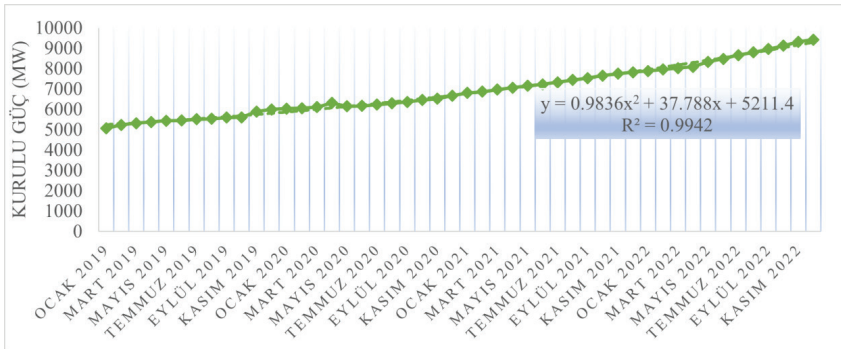
Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de yenilenebilir enerji sektörü, çeşitli sosyal, ekonomik, toplumsal ve politik durumlardan etkilenmektedir. Bu etkilenme aylık veya yıllık bazda sürebilmektedir. Bu nedenle, Türkiye'nin doğrusal olmayan fotovoltaik kurulu gücünün tahmininde hem aylık artış miktarı hem de yıllık artış miktarı üzerinden ikinci dereceden polinom regresyonu oluşturulmuştur (Şekil 5 ve Şekil 6). Böylelikle, çeşitli sosyal, ekonomik ve politik nedenlerden kaynaklı olarak meydana gelen kurulu güç kapasite artışındaki dalgalanmalarda, polinomal eğilim önceki aylardaki ve yıllardaki değişimleri dikkate alınmasında fayda sağlamaktadır (Pinson, Han, ve Kazempour, 2022). Denklem 1 ve denklem 2'deki aylık ve yıllık değişime bağlı olarak oluşturulan regresyonlarda, değişkenliğin belirlendiği R2 değeri sırasıyla 0.9942 ve 0.9957 oranlarıyla 1'e oldukça yakınsamıştır.

Aylık kurulu güç değişimine bağlı oluşturulan denklem;

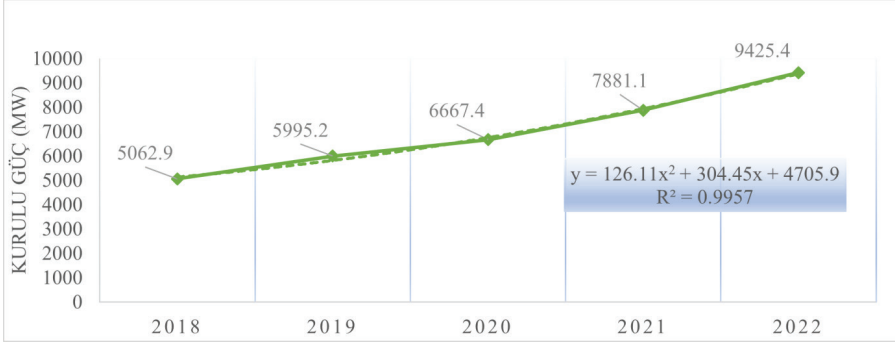
$$y=0.9836x^2 + 37.788x + 5211.4 \quad (1)$$

Yıllık kurulu güç değişimine bağlı oluşturulan denklem;

$$y=125.11x^2 + 304.45x + 4705.9 \quad (2)$$



Şekil 5. 2019-2022 Yılları Arası Türkiye'nin Aylık Kurulu Güç Değişimi



Şekil 6. 2019-2022 Yılları Arası Türkiye'nin Yıllık Kurulu Güç Değişimi

Türkiye'de, FV sistem kurulumları ve yatırımları 2016 yılı itibariyle hızlanmaya başlamıştır. 2016 yılından 2018 yılına kadar toplam kurulu güç yaklaşık 5 kat artarak 939 MW'dan 5062 MW'a yükselmiştir. 2018 yılından sonraki yıllarda ise kurulu güç kapasitesinde daha düzenli artışlar meydana gelmektedir. Bu nedenle, tahminleme çalışması için ilk iki senedeki ani yükseliş değil, sonraki yıllardaki düzenli kurulu güç artışları dikkate alınmıştır. 2018 yılı sonrası kurulan FV modüllerin ortalama ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir. Böylece, 2050 yılında ortaya çıkacak olan atık modüllerin 2025 yılında kurulacağı kabulüyle hesaplamalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'de kullanım ömrünü tamamlayan FV modüllerin 2018-2025 yılları arasındaki kurulu güç artışı dikkate alınmıştır. Ekonomik ömür sürelerini tamamlamadan önce çeşitli arızalar nedeniyle atık haline gelen modüller 2018 yılından 2050 yılına kadar değerlendirilmiştir. IEA ve IRENA'nın yayınladıkları verilere dayanarak;

- Nakliye ve kurulum esnasında verilen hasarların %0.05,
- Kurulum hataları nedeniyle ilk iki yıl içinde meydana gelen arızaların %0.05,
- Kurulumdan 10 yıl sonra oluşan arızaların %2,
- Kurulumdan 15 yıl sonraki ciddi teknik arızaların %4,

oranında FV modül kaybına neden olduğu kabul edilmiştir (IRENA ve IEA, 2016).

Şekil 5 ve Şekil 6'dan elde edilen denklemler, tipik bir c-Si modülün ortalama gücü ve ağırlığı dikkate alınarak kullanılmıştır.

FV üretimindeki teknolojik gelişmeleri ve verimlilik artışlarını göz önüne alınarak (Fraunhofer ISE ve PSE Projects GmbH, 2022),

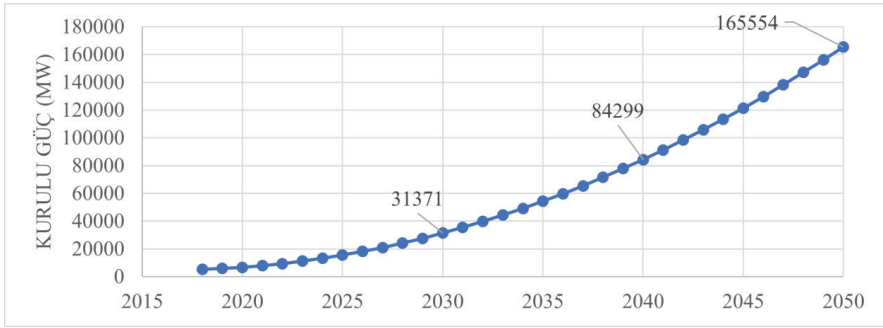
- 2018-2020 yılları arasında modüllerin ortalama gücü 250 W, ortalama ağırlığı 18 kg kabul edilmiştir.

- 2020-2025 yılları arasında modüllerin ortalama gücü 350 W, ortalama ağırlığı 20 kg kabul edilmiştir.

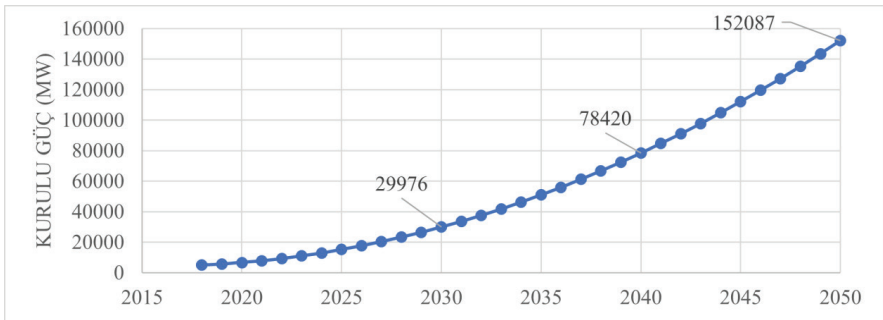
IEA ve IRENA 'nın ortak yayınladığı rapordaki tahminler ile Şekil 5 ve Şekil 6'daki denklemler üzerinden hesaplanan tahminler karşılaştırılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

Kurulu güç kapasitesindeki artış, 2030, 2040 ve 2050 yıllarındaki fotovoltaik güneş modüllerinin atık potansiyelini belirlemek amacıyla mercek altına alınmıştır. Buna göre, aylık ve yıllık artışlara bağlı olarak oluşturulan tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara göre, 2030 yılında ortalama 30,000 MW (30 GW), 2040 yılında ortalama 80.000 MW (80 GW), 2050 yılında ortalama 160,000 MW (160 GW) kurulu güç kapasitesine ulaşacağı öngörülmüştür (Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 7. Aylık Verilere Bağlı Olarak 2023-2050 Yılları Arası Türkiye'nin Güneş Enerjisi Kurulu Güç Tahmini



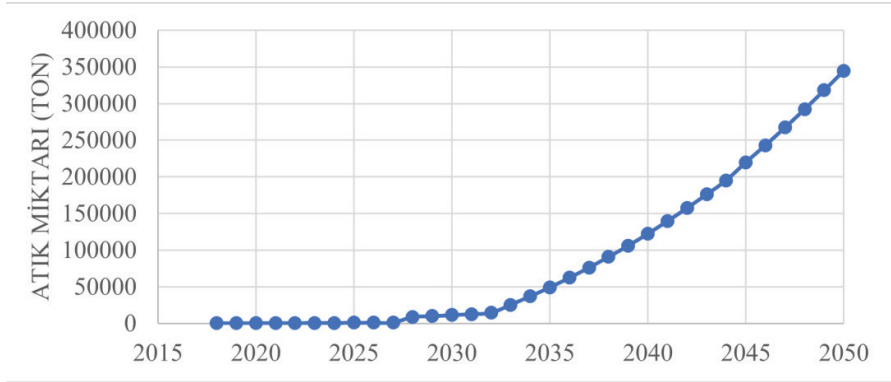
Şekil 8. Yıllık Verilere Bağlı Olarak 2023-2050 Yılları Arası Türkiye'nin Güneş Enerjisi Kurulu Güç Tahmini

Bu çalışmadaki iki yöntem (aylık ve yıllık) göre yapılan kurulu güç tahminleri ile ETKB tarafından 2035 yılı için öngörülen 52,9 GW kurulu güç tahmini karşılaştırılmıştır. ETKB'nin tahmin modeli, "AB Referans Senaryo 2016" ve "AB Referans Senaryo 2020" yayınlarının dikkate alındığı, Türkiye için özel olarak hazırlanan Genel Cebirsel Modelleme (GAMS) kullanılarak geliştirilmiştir (ETKB, 2022). Bu çalışmadaki regresyon hesaplamaları sonucunda, aylık verilere bağlı yapılan tahmin 2035 yılında Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücünün 54,2 GW olacağı yönündedir. Yıllık verilere bağlı olarak tahmine göre, 51 GW olacağı tahmin edilmiştir. Dolayısıyla, 2035 yılı için yapılan üç ayrı yöntemle bağlı öngörüler yaklaşık olarak birbirini destekler niteliktedir.

Türkiye'nin kurulu güç tahminlerine göre hesaplanan FV atık miktarı (Şekil 9);

- 2018-2025 yıllarında kurulan FV modüller geri dönüştürülmez ise, 2050 yılına gelindiğinde 1361324 ton modül ömür sonuna ulaşarak atık haline gelecektir.
- 2018-2050 yılları arasında kurulan FV modüllerde meydana gelen arızalar nedeniyle erken dönemde atık haline gelen modül kayıpları;
 - 2030 yılında 11436 ton,
 - 2040 yılında 122439 ton,
 - 2050 yılında 344834 ton,

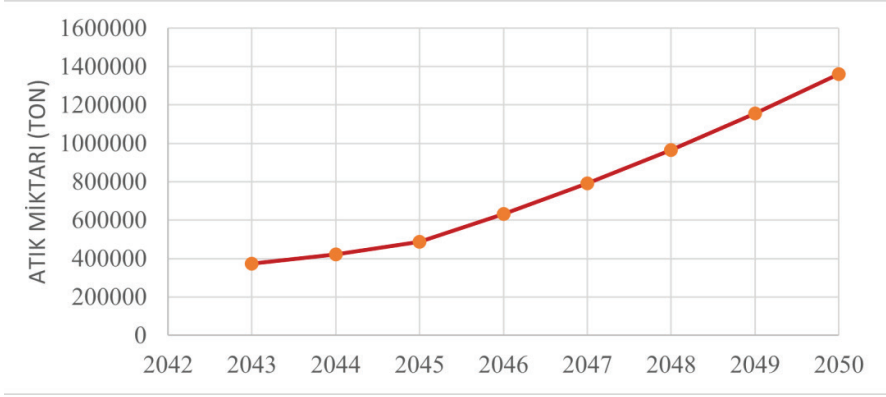
kütleye ulaşacaktır.



Şekil 9. 2018-2050 Yılları Arasında Erken Dönem FV Modül Atıklarının Kümülatif Artışı

Ortalama 25 senelik ömür süresi dikkate alındığında, Türkiye'nin ilk kez 2043 yılında ömrünü tamamlayan FV atık yoğunluğuyla karşılaşılacağı, öncesinde yalnızca erken dönemde meydana gelen arızalar nedeniyle atık ortaya çıkacağı

görülmektedir. Şekil 10'da ömür sonu FV atık miktarının kümülatif artışı verilmiştir.



Şekil 10. 2043-2050 Yılları Arasında Ömür Sonuna Ulaşan FV Modüllerin Kümülatif Artışı

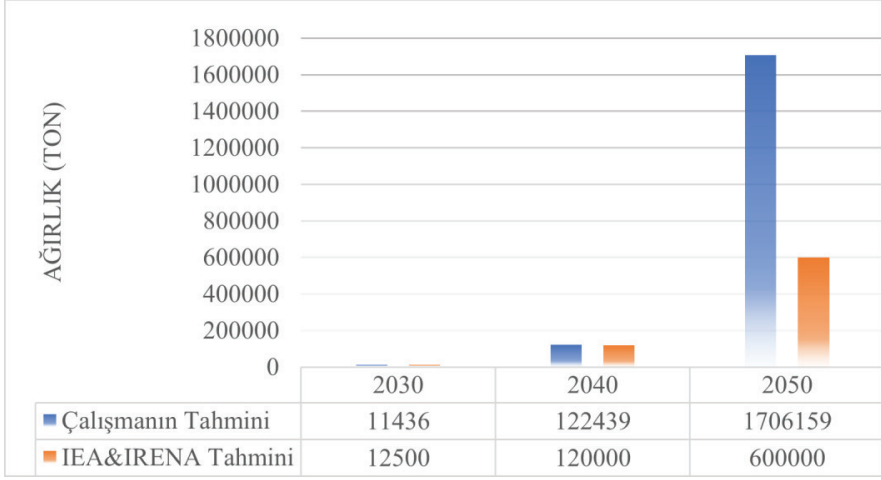
IEA ve IRENA, FV modül atık tahminlerinin yer aldığı raporu 2016 yılında yayınlamıştır. Türkiye'deki FV sistemlerin 2016 yılında başlaması ve yıl sonunda 939 MW olması, aynı sene içinde haziran ayında yayınlanan rapordaki tahmine etki etmiştir. 2018 yılı sonunda FV sistem kurulu gücünün 5 katına çıkarak 5062 MW'a erişmesi ve sonrasında da ortalama senelik 1000 MW artışın meydana gelmesi, 2050 yılında meydana gelecek atık miktarının rapordaki tahminden çok daha fazla olacağını açıkça göstermektedir (TEIAS, 2019).

IEA ve IRENA tahminlerine göre Türkiye'de (Şekil 11);

- 2030 yılında toplam 12500 ton,
- 2040 yılında topla 120000 ton,
- 2050 yılında toplam 600000 ton,

FV modül atık meydana gelecektir (IRENA and IEA, 2016).

Bu çalışmanın 2030 ve 2040 yıllarındaki atık haline gelen modül tahminleri (yalnızca arıza nedeniyle) ile IEA ve IRENA tahminlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ancak, arıza nedeniyle erken dönemde kullanılmaz hale gelen modüllerin yanısıra, ekonomik ömür çevrimi sonunda atık hale gelen modüllerin de hesaba dahil edildiği 2050 yılında, IEA ve IRENA tahminlerinden yaklaşık üç kat daha fazla atık olacağı beklenmektedir. Buna göre, hem ekonomik ömür sonunda hem de erken dönemde kullanılmaz hale gelen FV modüller geri dönüştürülmediği takdirde, 2050 yılında Türkiye'de toplam 1 milyon 706 bin 159 ton modül çevresel ve ekonomik yüke sebebiyet verecektir.



Şekil 11. FV Modül Atık Tahminlerinin 2030, 2040 ve 2050 Yılları İçin Karşılaştırılması

Mevcut veriler ışığında, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin FV sistem kurulu gücünü arttırmaya uygun olduğu ancak bu potansiyelin muhakkak sürdürülebilirlik kapsamında ele alınması gerektiği görülmektedir. Aksi takdirde, atık haline gelen modüllerin yatırımcılar için yük haline gelmesi ve yeni yatırımların sektöre uğramasına sebep olabilecek sorunlarla karşılaşılması kaçınılmaz olacaktır.

5. Sonuç

Sürdürülebilirlik çerçevesinde, FV modüllerin içerdiği malzemelerin atık sınıfına göre değerlendirilme ilkesine uygun olarak düzenlenmelidir. Geri dönüşümünde kullanılan yöntemlerin çevresel etkilere sebebiyet vermesini engellemek için malzemelerin çözünürlük, tutuşabilirlik, toksisite özellikleri irdelenmelidir. Aksi takdirde, toprağa, suya ve havaya karışabilecek zararlı atıklar geri dönüşüm misyonuna ters düşecektir. Bu bağlamda, regülasyonlar hazırlanırken gereken önemli çevresel analizler ve riskler mutlaka bilimsel olarak ortaya konulmalıdır. Sürdürülebilirlik çerçevesinde, FV modüllerin geri dönüşümü kilit bir öneme sahiptir. Hammadde kaynaklarının korunumu, atıkların değerlendirilerek üretime kazandırılması, yenilenebilir enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği, ekonomik fayda ve çevrenin korunumu FV geri dönüşümünün önemini belirten konulardır.

2030 yılına kadar FV geri dönüşüm endüstrilerinin kurulmuş olması beklenmektedir. Bunun için ülkeler bazı girişimlerde bulunmuşlardır. Bu noktada araştırmacıların, STK'ların, sektör paydaşlarının ve politika yapıcıların işbirliği halinde çalışması gerekmektedir. Malzemelerin geri dönüşümü için çevreye duyarlı,

enerji verimli, etkili ve ekonomik yöntemlerin öne çıkarılarak FV modüllerdeki minerallerin olabildiğince yüksek kalitede yeniden üretime kazandırılması gerekmektedir. Bu konuda, modül üreticileri ve araştırmacılar ortak girişimlerde bulunması beklenmektedir.

Ekonomik ömrünü tamamlamış FV modüllerin atılmasını yasaklamak ülkelerin bu konuda atacağı ilk politik adımlarından biri olmalıdır. Aksi takdirde, kontrolsüz bir şekilde atılan FV modüller, zorunlu politikalar düzenlenene kadar birçok ülkede çevresel bir kaosa sebebiyet verecektir. Avrupa ülkeleri, fotovoltaik modüllerin geri dönüşümünü genel bir direktif olan WEEE - Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları'nda ele almaktadır. Ancak, kurulumların artışı ile birlikte her yıl katlanarak büyüyen fotovoltaik modül sistemlerinin sürdürülebilirliği için yalnızca bu kapsamda ele alınan özel bir direktif yayınlanması gerektiğinin sinyalleri Uluslararası Enerji Ajansı gibi önemli kurumlar tarafından verilmektedir. Bu kapsamda değerlendirilen en önemli konular, fotovoltaik modüllerin içerdiği değerli kritik mineraller özelinde incelenmiştir. Değerli minerallerin hammadde kaynaklarının, artan üretim talebi nedeniyle 2050 yılına kadar beklenilenin üzerinde azalacağı öngörülmesi, hem ekonomik hem çevresel açıdan fotovoltaik modüllerin geri dönüşümünün yakın gelecekte Avrupa'da zorunluluk haline geleceğini açıkça göstermektedir.

FV sistem kapasitesi açısından önemli bir konuma sahip olan Türkiye'nin, tüm dünyada olduğu gibi yakın gelecekte FV modül atık problemi ile karşı karşıya geleceği açıkça görülmektedir. Bu kapsamda alınacak önlemlerin, yasal mevzuatlar ışığında gerçekleşmesi önem arz etmektedir. Gelişmiş ülkelerde dahi henüz ortak bir paydada karar alınmamış olması nedeniyle, Türkiye'deki sektör paydaşları, akademisyenler ve kamu kurumları tarafından devlet teşvikleri ile FV modüllerin geri dönüşümünün desteklenmesi, Türkiye'nin emsal teşkil etmesi açısından da bir fırsattır. Aynı zamanda, iklim değişikliği nedeniyle yaşanan kuraklık ve kıtlıkların önüne geçilebilmesi için yenilebilir enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği dünyada olduğu gibi ülkemiz için de zamanında önlemlerin alınması gereken bir husustur. Bu hususta yapılacak tüm iş birlikleri, gelecekte ülkemizin enerji güvenliğinin sağlanması için atılacak önemli adımların zeminini oluşturacaktır.

Teşekkür

ARDEB projesi kapsamında (Proje numarası: 121Y515) sağlanan finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve Aslı Birtürk'e BİDEB 2211-C kapsamında verilen doktora bursu için (Hibe numarası: 1649B032203727) teşekkür ederiz. Ayrıca, geçmişten bugüne araştırmalarımız için bize imkanlar sunan herkese teşekkür etmek isteriz.

Kaynakça

- Akimoto, Y., Iizuka, A., & Shibata, E. (2018). High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels. *Minerals Engineering*, 125 (May), 1–9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.015>
- Balch, D. R., & Armstrong, R. W. (2010). Ethical marginality: The icarus syndrome and banality of wrongdoing. *Journal of Business Ethics*, 92 (2). doi: <https://doi.org/10.1007/s10551-009-0155-4>
- Çanka, F. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina*.
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., ... Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- Council of the European Union. (2019). Directive 2011/7/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*, (June), 38–71. doi: <https://doi.org/10.5040/9781782258674.0030>
- Curtis, T. L., Buchanan, H., Smith, L., Heath, G., Curtis, T. L., Buchanan, H., ... Heath, G. (2021). *A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials : Drivers , Barriers , Enablers , and U . S . Policy Considerations A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials : Drivers , Barriers , Enablers , and U . S . Policy Considerations*. (April), 89. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74550>
- Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 187 (July), 106612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612>
- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., & Veit, H. (2017). Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 60, 716–722. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.036>
- EPA. (2022). *Solar Panel Recycling*. 1–56. Retrieved from <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-recycling>
- ETKB. (2022). *TÜRKİYE Ulusal Enerji Planı 2022*. Retrieved from <https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar>
- European Commission. (2022a). *EU Solar Energy Strategy. Communication*

- From the Commission To the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 1(69), 5–24.* Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:516a902d-d7a0-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
- European Commission. (2022b). *REPowerEU Plan - COM(2022) 230 final*. 21. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_22_3131
- Fraunhofer ISE, & PSE Projects GmbH. (2022). *Photovoltaics Report -2022- Fraunhofer ISE*. (February), <https://www.ise.fraunhofer.de/conte%0Ant/dam/ise/d>.
- Fthenakis, V., Athias, C., Blumenthal, A., Kulur, A., Magliozzo, J., & Ng, D. (2020). Sustainability evaluation of CdTe PV: An update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 123*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109776>
- Georgakakis, D., & Lebaron, F. (2018). Yanis (Varoufakis), the Minotaur, and the Field of Eurocracy. *Historical Social Research, Vol. 43*. doi: <https://doi.org/10.12759/hsr.43.2018.3.216-247>
- Halevi, J., & Varoufakis, Y. (2003). The Global Minotaur: America, the True Origins of the financial crisis and the future of the world economy. *Monthly Review, 55* (3).
- HEINEMAN, R. (2011). The Icarus Syndrome: A History of American Hubris. *Independent Review, 15* (3).
- IEA. (2021a). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. *IEA Publications*.
- IEA. (2021b). *World Energy Investment 2021*. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-investment-2021-datafile>
- IEA. (2022a). *Renewable Energy Market Update-May 2022*. doi: <https://doi.org/10.1787/afbc8c1d-en>
- IEA. (2022b). *Renewables 2022, IEA*. 158. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- IEA. (2022c). *World Energy Investment 2022*. 227.
- IEA. (2023). Snapshot of Global PV Markets 2023. *Www.Iea-Pvps.Org*, 1–16. Retrieved from http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf

- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Solar energy Overview*. Retrieved December 28, 2022, from <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>
- IRENA and IEA. (2016). End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. *In International Renewable Energy Agency and the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems*. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-
- Kim, Y., & Lee, J. (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98 (x), 317–322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.022>
- Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Andrea, G., & Mancini, L. (2016). Solar Energy Materials & Solar Cells Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>
- Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>
- Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. (2022). Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. *Waste Management*, 137 (November 2021), 312–318. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.024>
- Maani, T., Celik, I., Heben, M. J., Ellingson, R. J., & Apul, D. (2020). Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of the Total Environment*, 735, 138827. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>
- NREL. (2021a). *Best Practices at the End of the Photovoltaic System Performance Period Best Practices at the End of the Photovoltaic System Performance Period*. (February).
- NREL. (2021b). *What It Takes To Realize a Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials*. 4–7. Retrieved from <https://www.nrel.gov/news/program/2021/what-it-takes-to-realize-a-circular-economy-for-solar-photovoltaic-system-materials.html>
- Peplow, M. (2020). Solar panels face recycling challenge. *C&EN Global Enterprise*, 5 (7), 502–510. doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0645-2>

- Pinson, P., Han, L., & Kazempour, J. (2022). Regression markets and application to energy forecasting. In *Top* (Vol. 30). doi: <https://doi.org/10.1007/s11750-022-00631-7>
- Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar pv modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 8 (5), 597–610. doi: <https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610>
- Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B.-M., Butler, E., Sinha, P., ... Simon, E. S. (2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28 (10), 1077–1088. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3316>
- TEIAS. (2019). *Türkiye Kurulu Güç Raporu (Aralık 2019)*. 1. Retrieved from <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>
- TEIAS. (2022). *Installed capacity report of Turkey. 2022*.
- TEIAS (Turkish Electricity Transmission Corporation). (2023). *Yük Tevzi Bilgi Sistemi*.
- Türkiye Bilimler Akademisi [TÜBA]. (2018). *Güneş Enerjisi Teknolojileri Raporu*.
- Wang, R., Song, E., Zhang, C., Zhuang, X., Ma, E., Bai, J., ... Wang, J. (2019). Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment. *RSC Advances*, 9(32), 18115–18123. doi: <https://doi.org/10.1039/c9ra03582f>