T.C.
HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ PANELLERİNİN KULLANIM SÜRESİ SONRASI ATIK YÖNETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Emre FİDAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN

HAKKARİ
2025

T.C.
HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
HAKKARİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi Emre FİDAN tarafından hazırlanan "Güneş Panellerinin Kullanım Süresi Sonrası Atık Yönetimi Ve Çevresel Etkileri" başlıklı tez, 27.11.2025 tarihinde yapılan savunma sonucunda aşağıda isimleri bulunan jüri üyelerince oy birliği ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı Soyadı		Kurumu	İmzası
Başkan :	Prof. Dr.Hakan GÜNDOĞMUŞ		Hakkari Üniversitesi
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN		Hakkari Üniversitesi
Üye :	Doç. Dr. Rüstem BİNALİ		Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilen bu yüksek lisans tezi, Enstitü Yönetim Kurulunun ……..... tarihli ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN

Enstitü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezde sunulan tüm bilgi ve sonuçların, bilimsel yöntemlerle yürütülen gerçek deney ve gözlemler çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce, sonuç ve bilgilere bilimsel etik kuralların gereği olarak eksiksiz şekilde uygun atıf yaptığımı ve kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

13/01/2025

Emre FİDAN

ÖZET

GÜNEŞ PANELLERİNİN KULLANIM SÜRESİ SONRASI ATIK YÖNETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Emre FİDAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN

2025, 98 sayfa.

Güneş enerjisi teknolojilerinin küresel ölçekte hızla yaygınlaşması, fotovoltaik (PV) panellerin kullanım ömrü sonrasında ortaya çıkacak atık miktarını önemli bir çevresel konu haline getirmiştir. Yaklaşık 25-30 yıllık ömre sahip PV paneller, kullanım süresi boyunca temiz enerji üretimi sağlasa da, ömür sonlarında geri dönüşüm, yeniden kullanım ve bertaraf süreçlerinin etkin şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, PV panellerin yapısal bileşenlerini, yaşam döngüsü aşamalarını ve panel ömrünü etkileyen faktörleri literatür kapsamında inceleyerek, kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan atıkların çevresel, ekonomik ve teknik açıdan değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Çalışmada, mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm teknolojileri ayrıntılı olarak incelenmiş, her yöntemin geri kazanım verimi, teknik uygunluğu, maliyeti ve çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca Avrupa Birliği, ABD ve Çin gibi ülkelerde uygulanan PV panel atık yönetimi politikaları değerlendirilerek Türkiye'deki mevcut yasal çerçeve ile karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Türkiye'nin artan güneş enerjisi kapasitesi dikkate alınarak, 2030-2050 dönemi için ulusal PV atık projeksiyonu oluşturulmuş ve geri dönüşüm sektörünün ekonomik potansiyeli ortaya koyulmuştur.

Elde edilen bulgular, PV panel atıklarının sürdürülebilir yönetimi için geri dönüşüm alt yapısının güçlendirilmesi, üretici sorumluluğu mekanizmalarının uygulanması, standartların geliştirilmesi ve ekonomik teşviklerin artırılmasının kritik önemde olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, Türkiye'nin güneş enerjisi dönüşümünü çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirmek için gerekli politika önerilerini sunarak literatüre katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel atıkları, geri dönüşüm teknolojileri, yaşam döngüsü analizi, sürdürülebilir atık yönetimi, PV atık projeksiyonu.

ABSTRACT

END-OF-LIFE WASTE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SOLAR PANELS

Emre FİDAN

Degree Thesis, Department of Mechanical Engineering

Assistant Professor Tayfun ÇETİN

2025, 98 pages.

The rapid global expansion of solar energy technologies has made end-of-life (EoL) photovoltaic (PV) panels an increasingly significant environmental concern. Although PV panels provide clean electricity generation throughout their 25-30-year operational lifespan, the management of these panels after their service life requires well-structured systems of recycling, reuse, and disposal. This thesis examines the material composition, life-cycle stages, and degradation mechanisms of PV panels, and evaluates end-of-life PV waste from environmental, technical, and economic perspectives.

Mechanical, thermal, and chemical recycling techniques are comprehensively analyzed and compared in terms of recovery efficiency, technical feasibility, cost, and environmental impacts. Furthermore, PV waste management policies implemented in the European Union, the United States, and China are reviewed and compared with Turkey's current regulatory framework. Based on Turkey's increasing solar energy capacity, national PV waste projections for 2030-2050 are presented, and the economic potential of material recovery is assessed.

The findings demonstrate that establishing a sustainable PV waste management system in Turkey will require the development of recycling infrastructure, the implementation of extended producer responsibility (EPR), the introduction of technical standards, and the expansion of economic incentives. This study provides policy recommendations aimed at enhancing the environmental sustainability of Turkey's solar energy sector and contributes to the growing body of literature on circular economy applications in renewable energy systems.

Keywords: Photovoltaic waste, recycling technologies, life-cycle assessment, sustainable waste management, PV waste projection.

ÖNSÖZ

Bu tez, güneş enerjisi teknolojilerinin sürdürülebilirlik perspektifiyle değerlendirilmesini ve fotovoltaik panellerin ömür sonrasında ortaya çıkan atıkların çevresel etkilerini anlamayı amaçlamaktadır. Çalışmam süresince yalnızca teknik bir konuya odaklanmadım; aynı zamanda insanlığın doğayla olan ilişkisini, kaynakların verimli kullanımını ve gelecek kuşaklara nasıl bir dünya bırakmak istediğimizi de düşünme fırsatı buldum.

Bu sürecin her anında yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen başta değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN'e teşekkür ederim. Bilimsel rehberliği ve yapıcı eleştirileri, bu çalışmanın yönünü belirlememde önemli rol oynamıştır.

Ayrıca, çalışmam boyunca sabırla yanımda olan ve moral kaynağım olan sevgili eşim Eylem Fidan'a teşekkür ederim. Onun desteği olmasaydı bu yolculuk çok daha zorlu olurdu. Bunun yanında bana ilham ve güç veren sevgili kızım Arîn'e ise özel bir teşekkür borçluyum. Bu tez, onun geleceği için daha yaşanabilir bir dünya kurma umuduyla yazıldı.

Son olarak, sürdürülebilir bir gelecek için çalışan, üreten ve düşünen herkese saygılarımı sunuyorum.

Emre FİDAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, sabırla desteğini sürdüren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca araştırma sürecinde katkı sağlayan tüm akademisyenlere, veri paylaşımında bulunan kurumlara ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Son olarak, bu tez boyunca bana güç ve ilham kaynağı olan sevgili eşim Eylem Fidan'a ve sevgili kızım Arîn'e sonsuz sevgilerimle.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii
ABSTRACT v
ÖNSÖZ vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
SIMGELER VE KISALTMALAR xv
1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı 2
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ 3
3. MATERYAL VE YÖNTEM 8
3.1 Güneş Enerjisi Ve Fotovoltaik Teknoloji 8
3.2. Fotovoltaik Sistemlerin Yapısı 9
3.3 PV Panel Türleri 10
3.3.1 Yarı İletken 11
3.3.1.1 Bant Yapısı ve Bant Aralığı 11
3.3.1.2 Yarı İletkenlerin Fotovoltaik Sistemlerde Kullanımı 12
3.3.1.3 Yarı İletken Malzemelerin Güneş Panellerindeki Önemi 13
3.3.1.4 Yarı İletkenlerin Yaşam Döngüsü ve Atık Yönetimi Açısından Önemi 13
3.4 Güneş Panellerinin İç Yapısı, Çalışma Prensibi ve Üretim Süreci 14
3.5 Güneş Panellerinin Yaşam Döngüsü 16
3.6 Türkiye'deki İlk Güneş Enerji Santrali (GES) 17
3.7 Lisanslı ve Lisanssız GES Arasındaki Farklar, Lisans Süreci ve Koşulları 18

3.7.1 Lisanslı GES 18
3.7.2 Lisanssız GES 18
3.7.3 Elektrik üretim Lisans Koşulları 19
3.8 PV Panel Yaşam Döngüsünün Atık Yönetimi Açısından Değerlendirilmesi .. 20
4. BULGULAR 24
4.1. Dünya Güneş Enerjisi Kapasitesinin Yıllara Göre Artışı 24
4.2. PV Panel Türlerinin Karşılaştırması 25
4.3 Panel Ömrünü Etkileyen Faktörler 26
4.4 Genel Değerlendirme 28
4.5 Güneş Paneli Atıkları 29
4.5.1 Kullanım Ömrü Sonu Kavramı 29
4.5.2 Panel Atıklarının Bileşimi 30
4.5.3 Atık Potansiyeli - Türkiye ve Dünya Genelinde Projeksiyonlar 34
4.5.3.1 Dünya Genelinde PV Atık Projeksiyonları 35
4.5.3.2 Türkiye'de PV Atık Potansiyeli 37
4.6 Tehlikeli Atık Potansiyeli 38
4.7 Yeniden Kullanım ve Yeniden Değerlendirme Olanakları 39
4.7.1 Yeniden Kullanım 40
4.7.2 Yeniden Değerlendirme 40
4.7.3 Ekonomik ve Çevresel Katkılar 41
4.7.4 Zorluklar ve Sınırlamalar 41
4.8 Mevcut Atik Yönetimi Yaklaşimlari 42
4.8.1 Geri Dönüşüm Teknolojileri (Mekanik, Termal, Kimyasal) 42
4.8.1.1 Mekanik Geri Dönüşüm Yöntemi 42
4.8.1.2 Termal Geri Dönüşüm Yöntemi 43
4.8.1.3 Kimyasal Geri Dönüşüm Yöntemi 43

4.8.2 Geri Dönüşüm Fizibilitesi 45
4.8.3 Yeniden Kullanım (Re-use) Uygulamaları 52
4.8.4 Dünya Genelindeki Uygulamalar (AB, ABD, Çin vb.) 55
4.8.5 Türkiye'deki Durum ve Mevzuat 57
4.8.5.1 Türkiye'de PV Panel Atık Yönetiminin Tarihsel Gelişimi 59
4.8.5.2 Türkiye'de PV Panel Atıkları İçin Planlanan Düzenlemeler ve Öngörüleri 59
4.8.5.3 PV Cycle ve Benzeri Uluslararası Girişimler 60
4.8.6 Türkiye'de Bireysel Kullanım 62
4.9 Çevresel Etkiler 62
4.9.1 Kullanım Sonrası Geri Dönüşümün Çevresel Yararları 63
4.9.2 Uygun Olmayan Bertaraf Yöntemlerinin Riskleri 63
4.9.3 Toprak ve Su Kirliliği Riski 64
4.9.4 İnsan Sağlığına Etkiler (Ağır Metaller, Kadmiyum vb.) 64
4.9.5 Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ile Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi 65
4.10 Ekonomik ve Politik Boyut 65
4.10.1 Geri Dönüşümün Ekonomik Potansiyeli 66
4.10.1.1 PV Geri Dönüşüm Tesisi Kurulumunun Teknik-Ekonomik Analizi 67
4.10.1.2. Yıllık Geri Kazanılabilir Malzeme Miktarları 69
4.10.1.3. Yıllık İşletme Maliyeti 70
4.10.1.4 Yıllık Ekonomik Getiri 71
4.10.1.5. Yıllık Net Ekonomik Sonuç 72
4.10.2. Üretici Sorumluluğu ve Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) 72
4.10.3 Teşvikler ve Politikalar 74
4.10.4 Sürdürülebilir Enerji Politikaları ile Uyum 75
4.10.4.1 Türkiye'nin 2053 Net-Sıfır Hedefi 76

4.11 GZFT (Güçlü-Zayıf Yönler, Fırsatlar Ve Tehditler) Analizi: Güneş Paneli Atik Yönetimi 76
4.11.1 Örnek Olay İncelemesi 78
4.11.1.1 Türkiye'de Pilot Bir Proje 78
4.11.1.2 TÜBİTAK Destekli Akademik Çalışmalar 83
5. TARTIŞMA 85
5.1 Bulguların Önemi ve Literatüre Katkı 85
5.2 Politika ve Uygulama Önerileri 86
5.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 87
6. SONUÇ 89
KAYNAKLAR 90
ÖZGEÇMİŞ 98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Dünya genelinde güneşlenme süreleri haritası 9
Şekil 3.2. Tipik Bir Fotovoltaik Sistem Bileşenleri 10
Şekil 3.3. Yarı iletkenin band aralığı 12
Şekil 3.4. Tipik bir güneş panelinin katmanlı yapısı..... 14
Şekil 3.5. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi 16
Şekil 3.6. 2025 Temmuz Ayı İllere Göre Lisanssız GES Kurulu Gücü 17
Şekil 3.7. PV panel üretim süreci ve yaşam döngüsü aşamaları 21
Şekil 3.8. İngot üretimi 21
Şekil 3.9. Tozlu ve temizlenmiş panel 23
Şekil 4.1. Zamana Göre PV Panel Verimliliği..... 26
Şekil 4.2. Panel Ömrü Sonu Süreç Akışı 29
Şekil 4.3 PV Panel Malzeme Dağılımı 33
Şekil 4.4 Küresel PV Atık Projeksiyonu..... 36
Şekil 4.5. PV Panel Geri Dönüşüm Süreç Akışı 42
Şekil 4.6. PV Panelin Yeniden Kullanım Yolculuğu..... 54
Şekil 4.7 Geri dönüştürülmeyi bekleyen atık paneller..... 63
Şekil 4.8. Panel atıklarının insan sağlığına geçişi 65
Şekil 4.9 EPR Süreci (European Parliament, 2012)..... 73
Şekil 5.1 .Türkiye'de PV panel atık yönetimi sisteminin geliştirilmesi için öneriler 87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Dünya Güneş Enerjisi Kapasitesinin Yıllara Göre Artışı 24
Çizelge 4.2. PV Panel Türlerinin Karşılaştırması 25
Çizelge 4.3. Panel ömrünü etkileyen unsurların teknik karşılaştırması 27
Çizelge 4.4 PV Panel Bileşenleri ve Özellikleri 32
Çizelge 4.5. Küresel PV Atık Projeksiyonları 35
Çizelge 4.6 Türkiye PV Atık Projeksiyonu 37
Çizelge 4.7 Tehlikeli Maddeler ve Kaynakları 38
Çizelge 4.8. Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Karşılaştırması 44
Çizelge 4.9 PV panelde 1 m² başına kullanılan malzeme ve yaklaşık miktarları . 45
Çizelge 4.10 PV panelde 1 m² başına yaklaşık geri kazanım oranları 46
Çizelge 4.11 PV Panel Geri Kazanılan Malzemelerin Ortalama Değeri 49
Çizelge 4.12 PV Panel Geri Dönüşüm Sürecinin Maliyeti 50
Çizelge 4.13 Yeniden kullanıma uygun panellerin karşılaştırılması 53
Çizelge 4.14 Önde Gelen Ülkelerin PV Atık Yönetim Politikalarının Karşılaştırması..... 56
Çizelge 4.15. Türkiye'de PV Panel Atık Yönetimi Mevcut Durum Analizi 58
Çizelge 4.16. PV Panellerden Geri Kazanılabilecek Malzemelerin Ekonomik Potansiyeli. 67
Çizelge 4.17. Tesis Kurulum Maliyeti 68
Çizelge 4.18. Yıllık Geri Kazanılabilir Malzeme Miktarları 69
Çizelge 4.19. Yıllık İşletme Maliyeti 70
Çizelge 4.20 Yıllık Ekonomik Getiri (Geri Kazanılan Malzemelerin Değeri) 71
Çizelge 4.21. PV Geri Dönüşüm Tesisinin Teknik-Ekonomik Özeti 72
Çizelge 4.22 PV Panel Atık Yönetiminde Düzenleyici Yaklaşımlar ve Uluslararası Uygulama Örnekleri. 74

SIMGELER VE KISALTMALAR

PV: Fotovoltaik

IEA:Uluslararası Enerji Ajansı

IRENA:Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı

IEA-PVPS: Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı

EoL:End Of Life

DC: Doğru Akım

AC: Alternatif Akım

CdTe: Kadmiyum Tellürür

CIGS: Bakır İndiyum Galyum Selenid

Eg: Bant Aralığı

Si:Silisyum

GaAs:Galyum Arsenit

Ag: Gümüş

Cd: Kadmiyum

Cu: Bakır

Pb: Kurşun

EPDK: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

GES: Güneş Enerji Santrali

ÇED: Çevresel Etki Değerlendirmesi

TEİAŞ: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

LCA: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

GW: Gigawatt

MW: Megawatt

KW: Kilowatt

UV: Ultraviyole

EÜAŞ: Elektrik Üretim A.Ş.

GZFT: Güçlü-Zayıf-Fırsat-Tehdit

PV CYCLE: Panellerin Toplanması Ve Geri Dönüşüm Konularında Çalışan Kar Gütmeyen Kuruluş

EPR: Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu

YEKDEM: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

c-Si: Kristal Silikon

WEEE: Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Atık Yönetimi Direktifi

AEEE: Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman

EEE: Elektrikli ve Elektronik Eşya

Se: Selenid

a-Si: Amorf silisyum

1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılda enerji ihtiyacının hızla artması ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin daha görünür hâle gelmesiyle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim küresel ölçekte artmıştır. Bu yönelimin en önemli bileşenlerinden biri, temiz, sessiz, karbon salımı yapmayan ve doğrudan güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilen PV sistemlerdir (REN21., 2023). Güneş enerjisinin sürdürülebilirliği, yerli kaynak olması ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkin bir araç olarak görülmesi, fotovoltaik panellerin kurulumunda gözle görülür bir artışa yol açmıştır (IEA., 2021). Türkiye gibi güneşlenme süresi yüksek olan ülkelerde bu teknoloji, enerji arz güvenliğini artıran ve dışa bağımlılığı azaltan stratejik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (TEİAŞ., 2024).

Ancak her teknolojik çözüm gibi güneş enerjisi sistemleri de yeni sorunsalları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonrasında ortaya çıkardığı atık yönetimi sorunları, henüz kamuoyu ve karar vericiler tarafından yeterince tartışılmamış bir alan olarak öne çıkmaktadır. Ortalama 25–30 yıl tasarım ömrüne sahip fotovoltaik panellerin, ilk büyük ölçekli kurulumların kullanım ömrü sonuna yaklaşmasıyla birlikte, dünya genelinde önemli bir atık potansiyeli oluşturması beklenmektedir (Weckend vd.,2016). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) gibi kuruluşlar, 2050 yılı itibarıyla dünya genelinde 78 milyon tona yakın PV panel atığı oluşabileceğini öngörmektedir (IRENA & IEA-PVPS, 2016). Bu atıklar, geri dönüşüm yoluyla tekrar ekonomiye kazandırılabileceği gibi, uygun yöntemlerle bertaraf edilmediğinde ciddi çevresel ve sağlık riskleri de doğurabilir (Weckend vd.,2016)

Fotovoltaik panellerin yapısında cam, alüminyum ve polimer gibi geri dönüştürülebilir malzemelerin yanı sıra, modül tasarımına bağlı olarak bazı toksik metaller de bulunabilmektedir; bu nedenle EoL atık yönetimi çevresel riskler açısından dikkatle ele alınmalıdır (Li vd., 2024). Bu maddeler, özellikle ağır metal içeren ince film fotovoltaik teknolojilerinde, doğaya kontrolsüz biçimde bırakıldığında toprak ve su kirliliğine ve dolayısıyla ekosistem tahribatına neden

olabilmektedir (Fthenakis vd.,2009). Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, fotovoltaik panel atıkları içerisinde bulunan gümüş, silikon ve bazı kritik hammaddelerin geri kazanımı, döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda önemli bir potansiyel sunmaktadır (Weckend vd., 2016). Bu nedenle, PV panel atıklarının yönetimi, yalnızca bir çevre sorunu değil; aynı zamanda ekonomik, teknik ve politik boyutları olan çok yönlü bir meseledir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışma fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonrasında oluşan atıkların çevresel etkilerini, mevcut geri dönüşüm teknolojilerini ve uygulamalarını kapsamlı biçimde incelemektedir. Ayrıca Türkiye'deki mevcut atık yönetimi mevzuatının PV özelinde yeterliliği değerlendirilecek, Avrupa Birliği başta olmak üzere bazı örnek ülke uygulamaları ile karşılaştırmalı bir analiz yapılacaktır. Bu bağlamda çalışmada, literatür taraması, mevzuat incelemesi ve sektörel raporlar üzerinden betimleyici bir yöntem izlenecektir. Bu tez, yalnızca güneş enerjisi teknolojisinin sunduğu fırsatları değil, aynı zamanda bu teknolojilerin ömür sonrasında oluşturabileceği çevresel yükleri ve yönetim gereksinimlerini ortaya koyarak, politika yapıcılara ve sektörel paydaşlara yol gösterici nitelikte katkılar sunmayı hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Güneş enerjisi teknolojileri, son on yılda hızla yayılarak küresel enerji dönüşümünde başlıca konumunu sağlamlaştırmıştır. Ancak PV panellerin geniş ölçekli dağıtımı, 25-30 yıllık işletme ömrünün sonunda ortaya çıkacak önemli bir kullanım sonu (end-of-life, EoL) atık akışını gündeme getirmiştir. Mevcut literatür, PV atıklarının hacim ve bileşim tahminleri, çevresel riskleri, geri kazanım/geri dönüşüm teknolojileri ile politika ve yönetim yaklaşımlarına odaklanmaktadır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

IRENA ile IEA-PVPS'in 2016 yılında yaptığı çalışmalar, küresel PV atık hacminin 2030'a kadar milyonlarca tona ve 2050'ye kadar onlarca milyon tona (senaryoya göre ~60-78 milyon ton) ulaşabileceğini göstermektedir; bu projeksiyonlar, güneş paneli kurulumlarının büyüme hızına ve panel ömrüne dayalı senaryolara dayanmaktadır. Bu ölçek, hem ekonomik değer (cam, alüminyum, bakır, silikon gibi geri kazanılabilir materyaller) hem de yönetim/bertaraf zorlukları açısından önem arz eder.

Das ve Sarmah (2025) tarafından yapılan çalışmada, fotovoltaik modüllerde kullanılan malzemelerin geri kazanım yöntemleri sistematik biçimde incelenmiştir. Mekanik, termal ve kimyasal süreçler; maliyet, geri kazanım verimliliği ve çevresel etki kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, mekanik geri dönüşümün düşük maliyet avantajına karşın malzeme saflığının sınırlı kaldığını, termal yöntemlerin EVA ayrışmasında etkin olmasının yanında yüksek enerji gereksinimi nedeniyle çevresel yük oluşturduğunu ve kimyasal süreçlerin yüksek geri kazanım oranı sağlasa da çevresel riskleri artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, PV geri dönüşüm teknolojilerinin seçiminin maliyet–çevresel etki dengesine göre yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Divya vd. (2023), PV modül geri dönüşümü üzerine yapılan son araştırmaları kapsamlı biçimde incelemektedir. Üretim süreçlerindeki toksik malzemeler nedeniyle geri dönüşümün zorunlu olduğu vurgulanmıştır. Çalışma, mevcut geri dönüşüm teknolojilerinin ekonomik olarak henüz tam olgunlaşmadığını, ancak gelişen piyasalarla birlikte geri kazanım değerinin artacağını göstermektedir. Silikon ve camın geri kazanımında yüksek potansiyel bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ince film panellerde kadmiyum ve tellür gibi

ağır metallerin çevresel risk oluşturduğu belirtilmiştir. Çalışma, sürdürülebilir PV endüstrisi için geri dönüşüm altyapısının erken dönemde geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Mulazzani vd. (2022), tarafından yapılan çalışma, kristal silikon PV modüllerinin geri dönüşümünde kullanılan prosesleri teknik ve enerji tüketimi açısından kapsamlı biçimde değerlendirmektedir. Çalışma, farklı üretim ve geri dönüşüm süreçlerinin enerji tüketimini karşılaştırmakta, proses optimizasyonunun enerji yükünü düşürmede kritik olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca geri dönüştürülmüş malzemeler ile yeni malzemelerin üretim süreçleri arasındaki enerji farkını ortaya koyarak, enerji verimliliğinin PV geri dönüşüm süreçlerinde stratejik bir unsur olduğunu göstermektedir.

Granata vd. (2022), tarafından yapılan ekonomik değerlendirme, kristal silikon PV panellerinin geri dönüşümünün ekonomik sürdürülebilirliğini incelemiş; değerli materyallerin (özellikle gümüş ve silikon) geri kazanımının ekonomik katkı sağladığını, ancak geri dönüşüm hacmi, süreç maliyetleri ve ekonomik ücret politikalarının kârlılık üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, sürmekte olan teknolojik geliştirmeler ve uygun ekonomik çerçevelerle PV geri dönüşümünün uzun vadede uygulanabilir bir sektör hâline gelebileceğini göstermektedir.

Gerold ve Antrekowitsch (2024) tarafından yapılan çalışma, fotovoltaik hücrelerin geri dönüşümünde mevcut teknolojik gelişmeleri ve karşılaşılan zorlukları kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Derlemede, kimyasal ve termal süreçlerin, mekanik yöntemlerle birlikte geri dönüşüm yöntemleri içinde yer aldığı, teknolojik gelişmelerin süreç verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önem taşıdığı vurgulanmıştır. Çalışma ayrıca yeni teknolojik yaklaşımların benimsenmesinin, PV geri dönüşüm uygulamalarının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Celep vd. (2025), tarafından yapılan kapsamlı derleme, kullanım ömrünü tamamlayan PV panellerinin küresel atık yönetimi açısından önemli bir sorun oluşturacağını ortaya koymaktadır; modellemelere göre end-of-life (EoL) PV atıkları 2050 yılına kadar milyonlarca ton seviyesine ulaşacaktır. Çalışma, farklı geri dönüşüm yöntemlerini çevresel etki ve uygulanabilirlik açısından

değerlendirmiş, ileri süreçlerin kritik malzemelerin geri kazanımını desteklediğini belirtmiştir. Ayrıca mevcut politika ve uygulama eksikliklerinin PV atık yönetiminde zorluklar oluşturduğu vurgulanmıştır. Sonuçlar, PV atıklarının sürdürülebilir yönetimi için bütüncül stratejik planlama gereksinimini ortaya koymaktadır.

Chen vd. (2024), kristal silikon PV panellerin geri dönüşümüne yönelik yöntemlerin tarihsel gelişimini ve güncel teknikleri kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada, erken dönem düşük verimli geri dönüşüm yaklaşımları ile günümüzde daha yüksek saflık sağlayan mekanik, termal ve kimyasal yöntemler karşılaştırılmıştır. Termal süreçler kapsamında piroliz gibi tekniklerin EVA tabakasının ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Ayrıca cam bileşeninin geri kazanımında mekanik kırma ve ayırma teknolojilerinin son yıllarda öne çıktığı ifade edilmiştir. Çalışma, çevresel etkilerin azaltılması amacıyla proses optimizasyonu ve emisyon kontrolüne dikkat çekmekte; genel olarak PV geri dönüşüm süreçlerinin teknolojik gelişmelerle birlikte daha verimli ve çevre dostu hâle geldiğini ortaya koymaktadır.

Vinayagamoorthi vd. (2024) tarafından yapılan çalışma, kullanım ömrünü tamamlamış PV panellerden değerli metallerin (gümüş, silikon, alüminyum vb.) geri kazanımı için kullanılan yöntemleri kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada termal, kimyasal ve hibrit süreçlerin uygulanabilirlik ve verimlilikleri karşılaştırılmış; literatürde hibrit yaklaşımların verimliliği artırma potansiyeli bulunduğu belirtilmiştir. Ayrıca kimyasal çözücülerle EVA tabakasının ayrıştırılmasının hücre bütünlüğünü korumaya yardımcı olabileceği ve yüksek sıcaklık uygulamalarının yapısal riskler taşıyabileceği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, düşük sıcaklıklı proseslerin geliştirilmesinin geri dönüşüm performansını artırabileceği ve hibrit yöntemlerin sektöre önemli avantaj sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Wei vd. (2025) endüstriyel ölçekte PV panel geri dönüşümünün teknik fizibilitesini değerlendirmektedir. Çalışmada proses verimlilikleri karşılaştırılmış ve kimyasal yöntemlerin endüstriyel kullanım için hâlen sınırlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca atık miktarındaki artışın geri dönüşüm yatırımlarını zorunlu

kıldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak çalışma, sanayi ölçeğinde geri dönüşümün stratejik bir gereklilik olduğunu vurgulamaktadır.

IEA PVPS tarafından hazırlanan rapor, küresel PV panel geri dönüşüm teknolojilerini kapsamlı biçimde değerlendirmektedir. Rapor, panel atıklarının gelecekte büyük bir çevresel yük oluşturacağını ve geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca patent analizleri yapılarak en yeni geri dönüşüm teknikleri sınıflandırılmıştır. Rapor, mekanik, termal ve kimyasal yöntemleri teknik kapasite açısından karşılaştırmaktadır. Ayrıca ülkelerin düzenleyici çerçeveleri incelenmiş ve AB'nin WEEE Direktifi sayesinde en etkili sistemi oluşturduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda rapor, politika yapıcılar için yol gösterici niteliktedir.

Tasnim vd. (2022) Bangladeş örneği üzerinden gelişmekte olan ülkelerde PV panel atıklarının mevcut durumunu analiz etmiştir. Çalışma, bu ülkelerde geri dönüşüm altyapısının henüz yetersiz olduğunu ve atık PV panellerden kaynaklanan ağır metallerin toprak ve su kirliliğine yol açma potansiyelini vurgulamaktadır. Ayrıca mevcut mevzuat ve politika eksikliklerinin kontrolsüz bertaraf ve yönetim sorunlarına yol açtığı; bu nedenle ulusal düzeyde PV atık yönetimi politikalarının geliştirilmesinin önem taşıdığı belirtilmiştir.

Belançon vd. (2022) tarafından yapılan çalışma, kristal silikon PV panellerdeki kaplama camın geri kazanımının çevresel avantajlarını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Çalışma, camın geri dönüşümle yeniden kullanılmasının enerji içeriği ve karbon ayak izi bakımından önemli tasarruf sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca camın ayrılması ve geri kazanımına yönelik mekanik delaminasyon süreçleri üzerinde durularak, bu yöntemlerin yüksek kaliteli cam elde etmede etkili olabileceği tartışılmıştır. Bu bağlamda, cam geri kazanımı PV panel geri dönüşümünde çevresel sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Singh vd. (2021) Avustralya'da kullanım ömrünü tamamlayan FV panellerinin doğrudan bertarafı ile geri dönüşümü senaryolarını karşılaştırmak için yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kullanmıştır. Çalışmada depolama/landfill, mekanik ayırma ve gelişmiş geri dönüşüm seçenekleri üzerinden iklim değişikliği, asidifikasyon, insan sağlığı ve kaynak tükenmesi gibi göstergeler hesaplanmıştır.

Sonuçlar, geri dönüşüm yapılan senaryolarda net çevresel etkinin belirgin biçimde azaldığını, özellikle alüminyum, cam, bakır ve gümüş gibi malzemelerin geri kazanımının üretimdeki birincil hammadde kullanımına kıyasla büyük avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Kwon vd. (2025) Güney Kore'de kullanım ömrünü tamamlamış kristal silikon FV modülleri için mekanik, kimyasal ve termal geri dönüşüm senaryolarını çöp sahasına depolama seçeneği ile karşılaştırarak yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi (LCSA) gerçekleştirmiştir. Çalışmada sera gazı emisyonları, toksisite ve kaynak kullanımı gibi çevresel göstergelerin yanı sıra ekonomik maliyetler ve sosyal etkiler birlikte ele alınmıştır. Sonuçlar, mekanik geri dönüşümün birçok sürdürülebilirlik göstergesi açısından daha uygulanabilir bir seçenek olduğunu göstermektedir. Ayrıca kurşun, nikel, krom ve kadmiyum gibi tehlikeli maddelerin kontrolsüz bertaraf senaryolarında potansiyel çevresel riskler oluşturabileceği vurgulanmış ve kurumsal geri dönüşüm altyapısının önemi ortaya konmuştur.

Sica vd. (2018) kristal silikon FV panellerin kullanım ömrü sonu yönetimini döngüsel ekonomi perspektifinden inceleyen bir çalışma yapmıştır. Makalede, küresel FV atık potansiyeli projekte edilerek, mevcut mevzuat, genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) modelleri ve panel geri dönüşüm teknolojileri detaylandırılmaktadır. Yazarlar, panel atıklarının sadece bertaraf edilmesinin ileride ciddi kaynak kaybı ve çevresel risk oluşturacağını; bunun yerine geri dönüşüm, yeniden kullanım ve ikinci el pazarları içeren kapalı döngü stratejilerin benimsenmesi gerektiğini savunmaktadır.

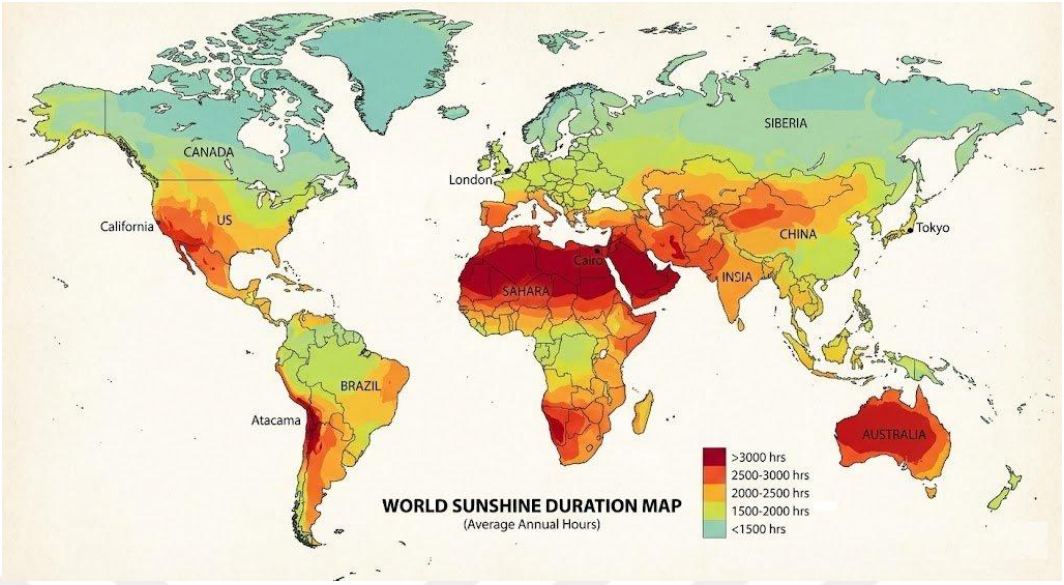
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Güneş enerjisi, yenilenebilir ve çevre dostu yapısı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarından biridir. PV teknoloji sayesinde güneş ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Ancak fotovoltaik panellerin ortalama 25–30 yıllık kullanım ömrü sonunda atık haline gelmesi, çevresel etkiler ve atık yönetimi açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, güneş panellerinin yapısal özellikleri, kullanım süresi sonrası ortaya çıkan atıkların yönetimi ve çevresel etkileri literatür verileri doğrultusunda incelenmiştir.

3.1 Güneş Enerjisi Ve Fotovoltaik Teknoloji

Güneş enerjisi, Güneş'ten yayılan elektromanyetik radyasyonun dünya yüzeyine ulaşmasıyla elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Güneş, 1 saat içinde Dünya'ya insanlığın yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek miktarda enerji göndermektedir (IEA,2023). Güneş enerjisi temiz, tükenmeyen ve yerli bir kaynak olması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşır.

Güneş enerjisi teknolojileri genel olarak iki ana başlıkta toplanabilir: termal sistemler ve fotovoltaik sistemler. Termal sistemler güneş ısısını doğrudan kullanırken, fotovoltaik sistemler güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürür. Fotovoltaik sistemler, karbon salımı yapmadan enerji üretimi sağladığı için iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol üstlenmektedir (REN21,2023).



Şekil 3.1 Dünya genelinde güneşlenme süreleri haritası

Şekil 3.1' de görüldüğü üzere, ekvatora yakın bölgelerde yıllık ortalama güneşlenme süresinin yüksek olduğu, kutuplara yaklaştıkça ise bu sürenin belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Özellikle Kuzey Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Güney Amerika'nın bazı bölgeleri yıllık 2.800-3.200 saat aralığında güneşlenme süresiyle dikkat çekmektedir (World Bank Group.,2022).

Türkiye, bu haritada yıllık 2.600-3.000 saat aralığında ortalama güneşlenme süresiyle yüksek potansiyele sahip ülkeler arasında yer almakta; bu durum fotovoltaik enerji üretimi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu veriler, Türkiye'nin güneş enerjisi yatırımlarında jeostratejik konumunun önemini ve yenilenebilir enerji politikalarına yön veren temel gerekçeyi desteklemektedir.

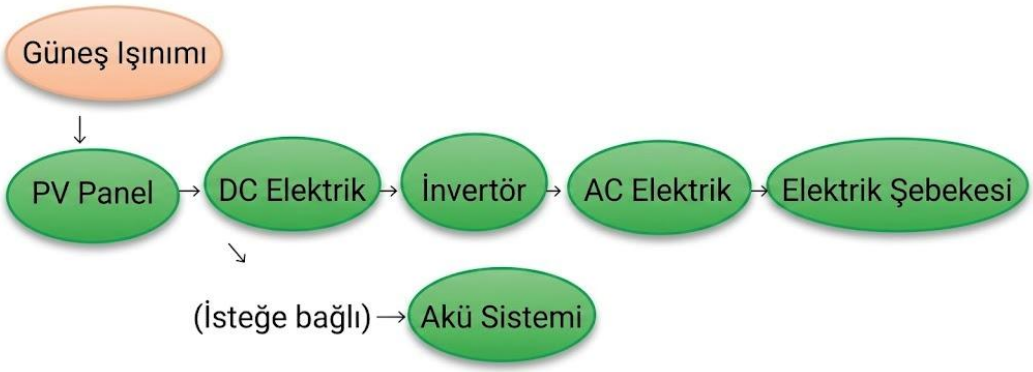
3.2 Fotovoltaik Sistemlerin Yapısı

Fotovoltaik sistemler, temel olarak güneş ışığını doğrudan doğruya elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemler genellikle şu temel bileşenlerden oluşur:

- **PV Paneller:** Güneş ışığını elektrik akımına çeviren modüllerdir. Genellikle silikon bazlı hücrelerden oluşur.
- **İnvertör:** PV panellerin ürettiği DC'yi AC'ye çevirir.
- **Montaj Sistemi:** Panellerin yerleştirileceği konstrüksiyonu sağlar.

- **Akü ve Batarya (isteğe bağlı):** Enerji depolamak için kullanılır.
- **Veri İzleme Sistemleri:** Üretim ve sistem performansını kontrol eder.

Fotovoltaik sistemler; şebeke bağlantılı, şebekeden bağımsız ve hibrit sistemler olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılabilir (EPIA.2012).



Şekil 3.2 Tipik Bir Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Şekil 3.2, bir güneş enerjisi sisteminin temel unsurlarını ve enerji dönüşüm sürecindeki işlevsel ilişkileri göstermektedir. PV paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren ana bileşenlerdir. Bu panellerde üretilen DC elektrik, invertör aracılığıyla AC dönüştürülerek şebekeye veya iç tüketime aktarılır. Sistemde yer alan şarj kontrol ünitesi, batarya depolama sistemlerinin güvenli şekilde şarj edilmesini sağlar ve enerji dengesini korur. Bataryalar ise özellikle şebekeden bağımsız sistemlerdeenerji sürekliliğini sağlayan kritik unsurlardır. Sayaç ve izleme sistemleri, üretilen ve tüketilen enerji miktarlarını ölçerek performans takibini mümkün kılar.

3.3 PV Panel Türleri

Fotovoltaik paneller, kullanılan yarı iletken materyal ve üretim teknolojisine göre farklı türlere ayrılır:

- **Monokristal Paneller:** Tek kristal yapısından oluşur. Yüksek verimliliğe (%18-22) ve uzun ömre sahiptir. Maliyeti görece yüksektir.
- **Polikristal (Multikristal) Paneller:** Çok sayıda kristalin birleşimiyle üretilir. Verimlilikleri %15-18 arasında değişir, maliyet avantajı sunar.

- **İnce Film Paneller:** a-Si , CdTe, CIGS gibi malzemelerle üretilir. Daha düşük verim (%10-13) ancak esnek yapıları sayesinde farklı alanlarda kullanılır.

Kristal silikon fotovoltaik paneller, yüksek cam ve alüminyum içerikleri nedeniyle geri dönüşüm açısından en uygun panel türleri arasında yer almaktadır. İnce film panellere kıyasla zararlı ağır metal içeriklerinin daha düşük olması, bu panellerin çevresel açıdan avantajlı olmasını sağlamaktadır. Monokristal ve polikristal silikon paneller arasında geri dönüşüm süreçleri bakımından belirgin bir fark bulunmamakta olup, her iki panel türü de temelde benzer malzeme bileşimlerine sahiptir. Bununla birlikte panel teknolojisi, üretim maliyetleri, çevresel etkiler ve uygulanacak geri dönüşüm yöntemleri üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır (Fraunhofer, 2023).

3.3.1 Yarı İletken

Yarı iletkenler, elektriksel iletkenlik açısından; iletken ve yalıtkan malzemeler arasında yer alan, iletkenlik özellikleri sıcaklık, ışık, safsızlık ve elektrik alan gibi dış etkenlerle kontrol edilebilen malzemelerdir. Bu özellikleri nedeniyle elektronik ve fotovoltaik teknolojilerin temel yapı taşını oluştururlar (Sze vd.,2006).

Kristal yapıları içerisinde valans bandı ve iletim bandı arasında belirli bir enerji farkı (bant aralığı) bulunur. Bu bant yapısı, malzemenin elektriksel davranışını belirleyen en kritik unsurdur.

3.3.1.1 Bant Yapısı ve Bant Aralığı

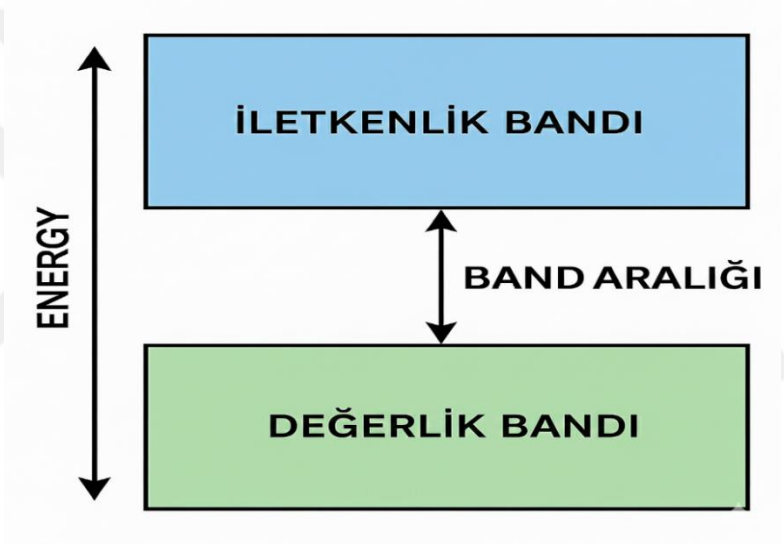
Yarı iletkenlerde elektronlar normalde valans bandında bulunur. Bir elektronun serbest hâle gelerek elektrik akımına katkı sağlayabilmesi için iletim bandına geçmesi gerekir. Bu geçiş için gerekli enerjiye Eg denir (Kittel vd,2005).

• Eg küçükse: Elektronlar daha kolay hareket eder dolayısıyla iletkenliğe yaklaşır.
• Eg büyükse: Elektron geçişi zorlaşır dolayısıyla yalıtkana yaklaşır.

Fotovoltaik hücrelerde yarı iletken malzemenin bant aralığı, güneş ışığını absorplama ve elektrik üretme verimini doğrudan etkiler.

Tipik Bant Aralıkları

- Si: En yaygın kullanılan PV malzemedir.
- GaAs: Yüksek verimli hücrelerde kullanılır.
- CdTe: İnce film panellerde kullanılır.
- CIGS: Ayarlanabilir bant aralığına sahiptir (Green vd.,2020).



Şekil 3.3 Yarı iletkenin band aralığı

3.3.1.2 Yarı İletkenlerin Fotovoltaik Sistemlerde Kullanımı

Güneş panellerindeki fotovoltaik hücreler tamamen yarı iletken fizik prensiplerine dayanır. Yarı iletken malzeme:

- Güneşten gelen fotonları soğurur,
- Elektron–delik çiftleri oluşturur,
- Bu taşıyıcılar iç elektrik alan yardımıyla ayrıştırılır,
- Harici devre üzerinden akım oluşturur.

Enerji dönüşüm verimi; bant aralığı, kristal yapısı, safsızlık seviyeleri, yüzey kaplama teknolojileri ve taşıyıcı ömrü gibi yarı iletken parametrelerine bağlıdır (Luque vd.,2011).

Kısacası; yarı iletkenler, kontrollü iletkenlik özellikleri sayesinde modern PV teknolojisinin merkezinde yer alır. Bant aralığı, malzemenin güneş spektrumu ile etkileşimini belirleyen ana fiziksel parametredir ve hücre verimliliği doğrudan bu değere bağlıdır. Bu nedenle doğru yarı iletken seçimi, panel performansı ve uzun vadeli dayanım açısından kritik önem taşır.

3.3.1.3 Yarı İletken Malzemelerin Güneş Panellerindeki Önemi

Yarı İletken Malzemelerin Kullanım Sebebi

- Bol bulunur.
- Zehirsizdir.
- Kristal yapı stabilitesi yüksektir.
- Band aralığı 1.12 eV ile idealdir.
- Uzun ömürlüdür (25–30 yıl).

Yarı İletken Malzemelerin avantajları:

- Düşük malzeme kullanımı
- Esnek yüzeylere uygulanabilirlik
- Daha ucuz üretim teknikleri

Yarı İletken Malzemelerin Dezavantajları:

- Kadmiyum gibi toksik element içerebilir.
- Geri dönüşüm süreçleri daha karmaşıktır (IRENA, 2020).

3.3.1.4 Yarı İletkenlerin Yaşam Döngüsü ve Atık Yönetimi Açısından Önemi

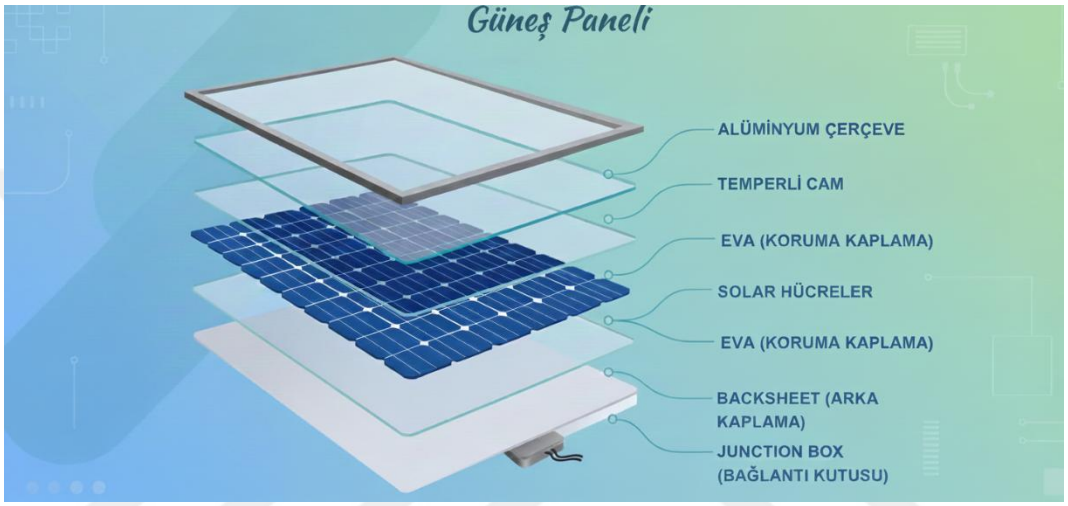
PV panel atıklarında yarı iletkenler:

- Geri kazanılabilir (Si, Ag, Cu)
- Bazı toksik elementler içerebilir (Cd, Pb)

Bu nedenle geri dönüşüm tesislerinde yarı iletken bileşenlerin ayrıştırılması kritik önemdedir (IEA-PVPS,2023).

3.4 Güneş Panellerinin İç Yapısı, Çalışma Prensibi ve Üretim Süreci

PV paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren çok katmanlı yarı iletken hücrelerden oluşan modüler yapılar olup, her biri farklı işlevlere sahip katmanlardan oluşur. Bir PV modül, hücre, ön cam tabakası, arka koruyucu tabaka, EVA ve alüminyum çerçeve gibi temel bileşenlerden meydana gelir (Green vd.,2021).



Şekil 3.4 Tipik bir güneş panelinin katmanlı yapısı.

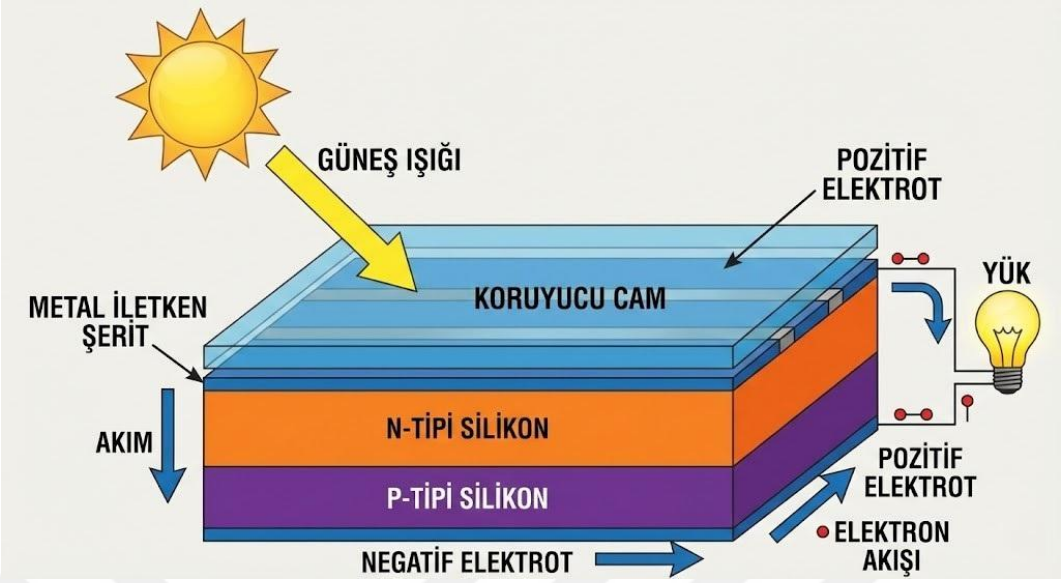
Kristal silikon fotovoltaik paneller; dış etkenlere karşı koruma sağlayan temperli cam, EVA kapsülleyici tabakalar, elektrik üretiminden sorumlu silikon güneş hücreleri, arka yalıtım tabakası (Tedlar/PVF) ve mekanik dayanıklılığı sağlayan alüminyum çerçeveden oluşmaktadır. Literatürde, kristal silikon PV modüllerde camın kütlece baskın bileşen olduğu ve toplam ağırlığın yaklaşık %60–75'ini oluşturduğu, EVA ve arka tabaka gibi polimer bileşenlerin daha düşük oranlarda yer aldığı bildirilmektedir. Ayrıca hücre bağlantılarında bakır iletkenler ve lehim alaşımları (Sn-Pb veya Ag katkılı) kullanılmaktadır. Bu bileşen yapısı, PV panellerin geri dönüşüm potansiyelini ve ekonomik değerini doğrudan etkilemektedir (Deng vd.,2019).

Panelin üst kısmında yer alan alüminyum çerçeve, modülün mekanik dayanımını sağlar ve dış etkenlere (rüzgâr, kar yükü, sıcaklık değişimi) karşı korur. Çerçevenin hemen altında bulunan temperli cam tabakası, güneş ışığının hücrelere geçişine izin verirken dış ortam koşullarına karşı koruma sağlar. Camın altında yer

alan EVA koruma kaplaması, hücrelerin cam ve arka tabaka arasında sabitlenmesini sağlayan yapıştırıcı ve yalıtkan bir malzemedir. Panelin enerji üretiminden sorumlu kısmı olan solar hücreler, genellikle silikon bazlı yarı iletkenlerden (monokristal veya polikristal) oluşur. Bu hücreler, güneş ışığındaki fotonları emerek elektrik akımı oluşturur. Alt kısımda bir katman daha EVA bulunur; bu katman hücreleri arka tabakaya sabitleyerek panelin uzun ömürlü olmasını sağlar. Panelin en alt kısmında yer alan backsheet tabakası, neme ve elektrik kaçaklarına karşı yalıtım görevini görür. Genellikle tedlar (PVF) veya PET malzemeden üretilir. Son olarak, panelin arkasında bulunan junction box (bağlantı kutusu), elektriksel bağlantıların (pozitif ve negatif kutupların) dış devreye güvenli biçimde aktarılmasını sağlar. Bu kutu içinde bypass diyotları bulunur; bu diyotlar gölgelenme durumunda hücrelerin zarar görmesini önler.

Çalışma Prensibi (Fotovoltaik Etki)

Bu görsel, PV hücrenin temel yapısını ve güneş enerjisinden elektrik üretim sürecini şematik olarak göstermektedir. Güneşten gelen fotonlar, panelin cam tabakası ve koruyucu katmanları aracılığıyla hücredeki N-tipi ve P-tipi silikon tabakalarına ulaşır. Bu iki yarı iletken katman arasında bulunan tükenme bölgesi**,** foton enerjisiyle uyarılan elektronları yönlendirerek DC oluşturur. Üstte yer alan metal iletken şeritler, bu akımı toplayarak dış devreye iletir.



Şekil 3.5 Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi

3.5 Güneş Panellerinin Yaşam Döngüsü

Fotovoltaik panellerin kullanım ömrü, literatürde ve endüstri uygulamalarında genellikle 25–30 yıl aralığında kabul edilmektedir. Ancak bu süreç yalnızca kurulum sonrası çalışmayı değil, tüm yaşam döngüsünü kapsar. Yaşam döngüsü beş temel aşamada ele alınır:

Hammadde Temini: Silisyum, cam, alüminyum gibi malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi.

Üretim Süreci: Hücre ve panel üretimi.

Nakliye ve Kurulum: Panellerin sahaya taşınması ve yerleştirilmesi.

Kullanım: Elektrik üretiminin yapıldığı aktif çalışma dönemi.

Ömrü Sonrası: Yeniden kullanım, geri dönüşüm veya bertaraf süreci (Fthenakis vd.,2012).

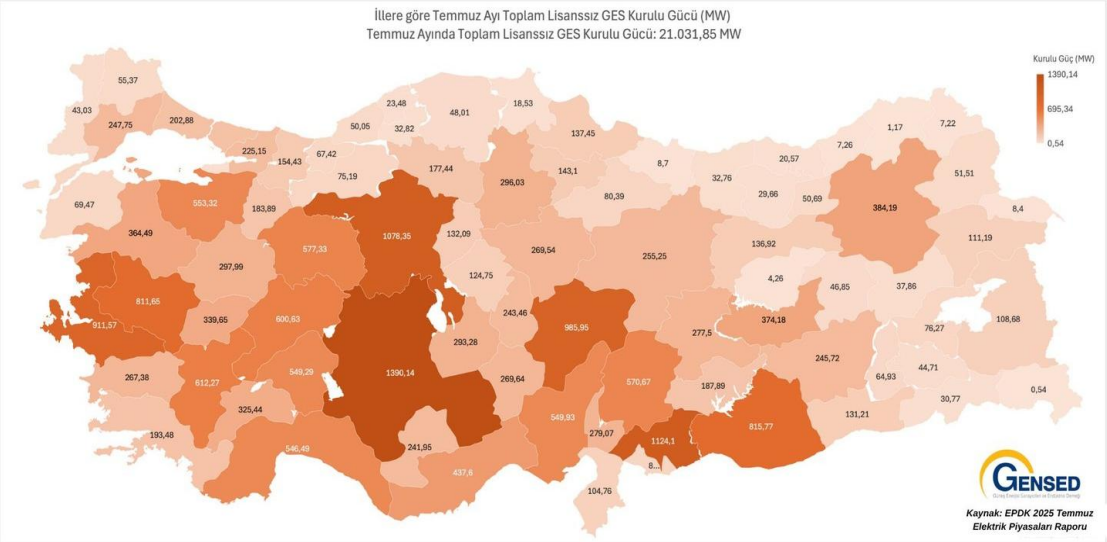
Her aşama, çevresel ayak izi açısından analiz edilmelidir; özellikle ömrü sonrası süreçler karbon nötr politika hedefleri açısından kritiktir.

3.6 Türkiye'deki İlk Güneş Enerji Santrali (GES)

Türkiye'deki ilk küçük ölçekli deneme amaçlı GES kurulumu Antalya'da yapılmıştır. Bu tesis, EÜAŞ tarafından başlatılmış ve yaklaşık 500 kW kapasiteyle Türkiye'nin ilk pilot uygulaması olmuştur. Türkiye'nin ilk lisanslı, ticari ve şebekeye bağlı Güneş Enerji Santrali ise Kayseri Organize Sanayi Bölgesi GES (2013)'dir. 1 MW Kurulu gücüyle devreye alınmış ve EPDK tarafından verilen ilk resmi GES lisansıdır. Ardından Denizli, Konya, Niğde, Mersin ve Eskişehir illerinde 2014-2016 arasında çok sayıda santral devreye alınmıştır.

Türkiye'deki ilk lisanssız güneş enerji santrali**,** 2011 yılında Antalya ilinde kurulmuştur. Ancak ilk lisanslı ve ticari ölçekteki güneş enerji santrali unvanı**,** Kayseri'deki "KAYSERİ OSB Güneş Enerji Santrali"ne (2013) aittir (ETKB,2023).

Bu gelişmelerle Türkiye, 2013'ten itibaren güneş enerjisini pilot projeden ticari ölçeğe taşıyan ülkeler arasına girmiştir.



Şekil 3.6 2025 Temmuz Ayı İllere Göre Lisanssız GES Kurulu Gücü (EPDK,2025)

Şekil 3.6, 2025 yılı itibarıyla Türkiye'de güneş enerjisi santrallerinin coğrafi dağılımını göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, Konya ili 1.390 MW kurulu gücüyle açık ara lider konumdadır. Bu kapasitenin büyük bölümü, Türkiye'nin en büyük güneş enerjisi projesi olan Karapınar GES'ten elde edilmektedir. Onu Gaziantep, Ankara, Kayseri ve İzmir takip etmektedir.

Bu dağılım, güneşlenme süresi, arazi yapısı, yatırım potansiyeli ve sanayi altyapısına göre değişmektedir. Özellikle Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu bölgelerinde yüksek güneşlenme süresi sayesinde panel verimliliği artmakta, Ege Bölgesi'nde ise çatı GES uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini güçlendirirken, aynı zamanda karbon nötr enerji hedeflerine katkı sağlamaktadır.Veriler, Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesinin bölgesel bazda dengesiz dağılmasına rağmen, son yıllarda doğudan batıya doğru yayılan bir GES yatırım eğilimi olduğunu göstermektedir.

3.7 Lisanslı ve Lisanssız GES Arasındaki Farklar, Lisans Süreci ve Koşulları

3.7.1 Lisanslı GES

Lisanslı GES, elektrik üretimi amacıyla EPDK tarafından verilen üretim lisansı ile faaliyet gösteren ve belirli kapasite sınırları olmaksızın şebekeye enerji satan büyük ölçekli tesislerdir. Bu tesisler, piyasa düzenlemelerine tabi olup elektrik satışını Elektrik Piyasası Kanunu ve ilgili yönetmelikler çerçevesinde yapar (EPDK,2014).

Temel özellikleri şu şekildedir:

- Üretim lisansı EPDK tarafından verilir.
- Kapasite sınırlaması yoktur; MW düzeyinde kurulabilir.
- YEKDEM gibi mekanizmalara başvurabilir.
- Bağlantı ve sistem kullanım anlaşmaları TEİAŞ veya ilgili dağıtım şirketleri ile yapılır.
- Piyasa katılımcısı olarak ikili anlaşmalar ve piyasada elektrik satışı yapılabilir.

3.7.2 Lisanssız GES

Lisanssız elektrik üretimi, belirli koşulları sağlayan gerçek veya tüzel kişilerin EPDK'dan lisans almadan ve şirket kurma zorunluluğu olmadan güneş enerjisinden elektrik üretebilmesini sağlayan modeldir. Türkiye'de en yaygın model, tüketim amaçlı çatı ve arazi GES'leridir (EPDK,2021).

Temel özellikleri şu şekildedir.

- Lisans alma zorunluluğu yoktur.
- Kurulu güç limiti mevzuatla belirlenmiştir (2022 sonrası sınır çoğunlukla "tüketim kadar üretim" prensibidir).
- Üretilen elektrik öncelikle kendi tüketimini karşılar, fazlası dağıtım şirketine satılabilir.
- Kurulum ve işletme süreçleri daha basittir; küçük–orta ölçeklidir.

3.7.3 Elektrik üretim Lisans Koşulları

Lisanslı bir GES kurmak için yerine getirilmesi gereken temel koşullar şunlardır:

1) Üretim Lisansı Başvurusu Yapılması
   - EPDK'ya teknik, mali ve hukuki belgeleri içeren başvuru dosyası hazırlanır.
   - Şirket kurulmuş olmalıdır (Anonim veya Limited) (TEİAŞ,2022).

2) Bağlantı Kapasitesi Tahsisi
   - TEİAŞ veya dağıtım şirketi tarafından teknik değerlendirme yapılır.
   - Sistem uygun görürse bağlantı görüşü oluşturulur (TEİAŞ,2023).

3) Finansal ve Teknik Yeterlilik
   - Yatırımcının sermaye, teminat ve proje finansman gücü değerlendirilir.
   - Santralin teknik tasarımı, ekipman standartları ve mühendislik yeterliliği incelenir (EPDK.,2022).

4) Çevresel ve İdari İzinler
   - ÇED süreci.
   - İmar izinleri, arazi tahsisi veya kamulaştırma kararları.
   - GES kurulumu için belediye/il özel idaresi izinleri.(ÇED Yönetmeliği,2022)

5) Lisansın Alınması ve İnşaat Süreci
   - Lisans alındıktan sonra belirli süre içinde inşaat tamamlanmalıdır.
   - Üretim tesisinin geçici kabulü yapılır ve işletme aşaması başlar (ETKB,2023).

3.8 PV Panel Yaşam Döngüsünün Atık Yönetimi Açısından Değerlendirilmesi

Güneş panellerinin yaşam döngüsü, hammaddenin çıkarılmasından üretime, kullanımdan geri dönüşüm ve bertaraf kadar uzanan bütün süreçleri kapsar. Bu döngü, PV teknolojilerin çevresel etkilerini değerlendirmede temel bir ölçüt olup yaşam döngüsü analizi LCA yöntemiyle incelenir (Fthenakis vd.,2011).

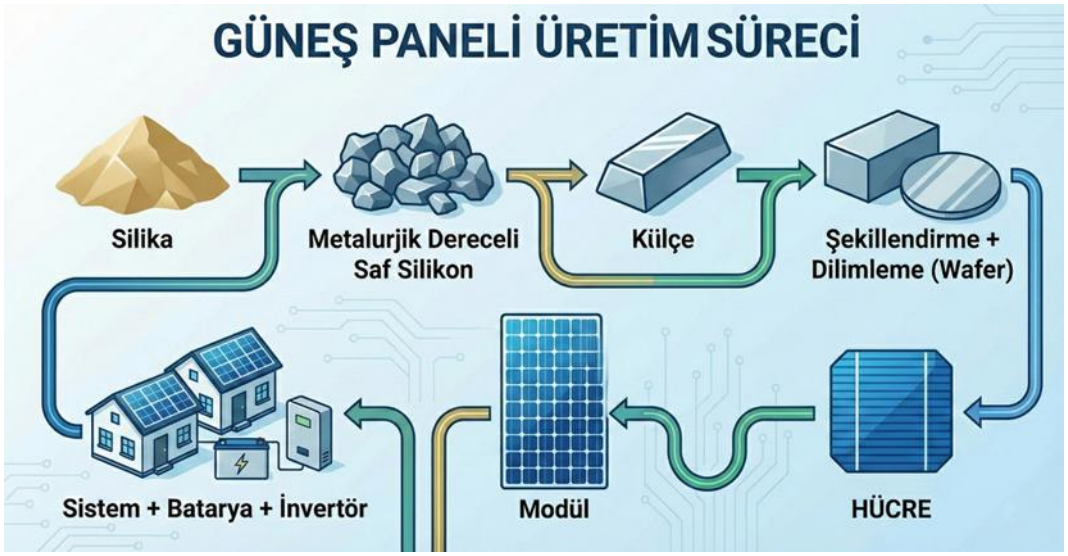
PV sistemlerinin yaşam döngüsü genellikle beş ana aşamadan oluşur:

1. Hammadde temini**,**
2. Panel üretimi**,**
3. Ulaşım ve kurulum**,**
4. Kullanım dönemi (operasyonel faz)**,**
5. Kullanım ömrü sonu ve geri dönüşüm**.**

PV panellerin üretimi, ağırlıklı olarak silikon tabanlı yarı iletkenlerin işlenmesine dayanır. c-Si teknolojisi, günümüzde tüm küresel PV pazarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (IEA-PVPS.,2023).

Üretim aşamaları temel olarak şu şekildedir:

- Silisyumun saflaştırılması: Kuvars kumundan yüksek saflıkta silikon (solar-grade Si) elde edilir.
- İngot üretimi: Ergitilmiş silikon tek veya çok kristalli olarak dökülür.
- Wafer kesimi: İnce plakalar (0.2-0.3 mm) halinde kesilir.
- Hücre üretimi: Kimyasal katkı (bor, fosfor) ile PN bağlantısı oluşturulur.
- Modül montajı: Hücreler seri-paralel bağlanarak cam, EVA ve tedlar tabakaları arasında lamine edilir.



Şekil 3.7 PV panel üretim süreci ve yaşam döngüsü aşamaları



Şekil 3.8 İngot üretimi

Kullanım Süresi ve Bozulma Mekanizmaları

Güneş panelleri genellikle 25–30 yıl arası bir kullanım ömrü için tasarlanmakta olup, bu süre boyunca yıllık verim kaybı oranı ortalama %0.5–0.8 arasında değişmektedir (Jordan & Kurtz, 2013).

Bozulmanın başlıca nedenleri:

- UV ışınımına maruz kalma (EVA sararması),
- Termal gerilmeler (laminasyon çatlakları),
- Nem ve oksijenin hücreye sızması (delaminasyon),
- Elektriksel korozyon (busbar hasarı).

Bu etkiler sonucunda hücrelerin iletkenliği azalır ve enerji dönüşüm verimi düşer.

Panel Verimini Etkileyen Faktörler

Literatürde, farklı panel tiplerinde (özellikle monokristal ve polikristal) verimliliği etkileyen çevresel ve yapısal faktörleri deneysel olarak incelemektedir. Çalışmada, güneş ışığı yoğunluğu, gölgelenme, tozlanma ve sıcaklık gibi dış etkenlerin; üretim kalitesi ve malzeme yapısının ise panel performansına olan etkileri değerlendirilmiştir. Buna göre panel verimini etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır.

a. Işık Yoğunluğu

- Işık şiddeti arttıkça panelin ürettiği güç doğrusal olarak artmaktadır.
- 372 W/m² altında panel gücü 252 W, 996 W/m²'de ise 682 W olarak ölçülmüştür.
- Bu sonuç, güneşlenme süresi ve ışık yoğunluğunun verim üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır.

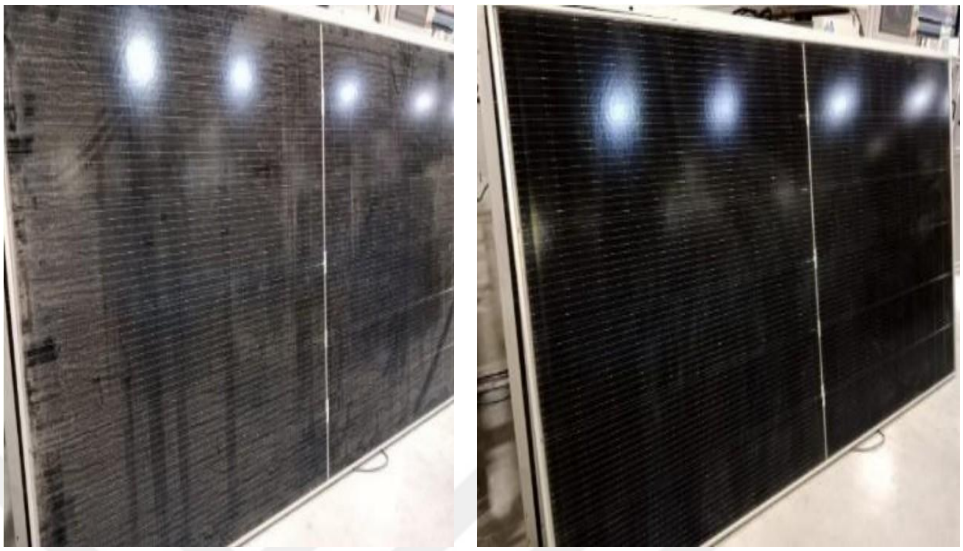
b. Gölgelenme Etkisi

- Panelin yüzeyinin bir kısmı gölgelendiğinde, verimlilik %22.68'den %18.94'e düşmüştür.
- Gölgelenme, seri bağlı hücrelerde akım dengesini bozarak "hot-spot(aşırı ısınma)" oluşumuna neden olur ve bu da panel ömrünü kısaltır.

c. Tozlanma ve Kirlilik

- Toz birikimi, ışığın hücreye geçişini engeller.
- Temizlenen panelin verimi, kirli duruma göre yaklaşık %7 daha yüksek ölçülmüştür.

- Bu nedenle düzenli bakım, panel ömrü ve performansı için kritik önemdedir.



Şekil 3.9. Tozlu ve temizlenmiş panel

d. Sıcaklık Etkisi

- Panel sıcaklığı arttıkça gerilim düşer; her 1°C artışta verimde yaklaşık %0.4-0.5 azalma gözlenmiştir.
- Bu durum, sıcak bölgelerde soğutma veya havalandırma stratejilerinin gerekliliğini göstermektedir.

e. Hücre Tipi ve Malzeme Kalitesi

- Monokristal paneller, polikristal panellere göre yaklaşık %4.1 daha yüksek güç çıkışı sağlamıştır.
- Malzeme homojenliği ve üretim kalitesi, panel ömrünü uzatan temel faktörler arasındadır (Güven vd.,2024).

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular sistematik bir bütünlük içinde sunulmaktadır. PV panellerin teknolojik özellikleri, kullanım ömrü ve yaşam döngüsü, panel atıklarının bileşimi ve miktarları, mevcut atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamaları, çevresel etkiler, ekonomik ve politik boyutlar ile güneş paneli atık yönetimine ilişkin GZFT analizi sonuçları bu bölüm altında ele alınmıştır.

4.1. Dünya Güneş Enerjisi Kapasitesinin Yıllara Göre Artışı

Çizelge 4.1' de , 2010 yılında yalnızca 40 GW civarında olan küresel kurulu güç, 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 1.200 GW seviyesine ulaşmıştır (IEA,2023). Bu artış, son on yılda yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik yatırımların hızla artması, maliyetlerin düşmesi ve karbon nötr hedeflerinin benimsenmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Çizelge 4.1. Dünya Güneş Enerjisi Kapasitesinin Yıllara Göre Artışı (GW)

YIL	Kurulu Güneş Enerjisi Kapasitesi (GW)
2010	40
2015	230
2020	710
2023	1200

Özellikle Çin, ABD, Hindistan ve Avrupa Birliği ülkeleri, güneş enerjisi kapasite artışında başı çekmektedir. 2015 sonrası dönemde panel maliyetlerinin %80 oranında azalması, hem büyük ölçekli santrallerin hem de konut tipi çatı sistemlerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu büyüme trendi, fotovoltaik teknolojilerin artık enerji üretiminde rekabetçi bir konuma ulaştığını ve küresel enerji dönüşümünün merkezinde yer aldığını göstermektedir.

Türkiye açısından bakıldığında ise, küresel artış eğilimiyle paralel biçimde 2023 itibarıyla yaklaşık 11 GW seviyesine ulaşılmış olup, bu oran ülkenin toplam

elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (TEİAŞ. ,2023).

4.2. PV Panel Türlerinin Karşılaştırması

Çizelge 4.2' de her panel türünün verimlilik oranı, üretim maliyeti, sıcaklık katsayısı, dayanıklılık ve uygulama alanı gibi parametreler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Monokristal paneller, tek kristal yapıya sahip olmaları nedeniyle en yüksek verimlilik oranına sahip sistemlerdir. Polikristal paneller, üretim sürecinin daha ekonomik olması sayesinde düşük maliyetli çözümler sunarken, verimlilik oranı %15-18 aralığındadır. İnce film paneller (örneğin CdTe veya a-Si tabanlı), esnek yapıları sayesinde geniş yüzeylerde ve bina entegre sistemlerde kullanılabilmekte, ancak verimlilikleri diğer teknolojilere kıyasla daha düşüktür (IEA PVPS,2023).

Çizelge 4.2 PV Panel Türlerinin Karşılaştırması

Özellikler	**Monokristal**	**Polikristal**	**İnce Film**
Verimlilik (%)	18-22	15-18	10-13
Maliyet	Yüksek	Orta	Düşük
Dayanıklılık	Yüksek	Orta	Düşük-Orta
Alan Verimliliği	Yüksek	Orta	Düşük
Esneklik	Düşük	Düşük	Yüksek
Kullanım Alanı	Konut, Sanayi	Tarlalar, binalar	Taşınabilir sistemler, cepheler

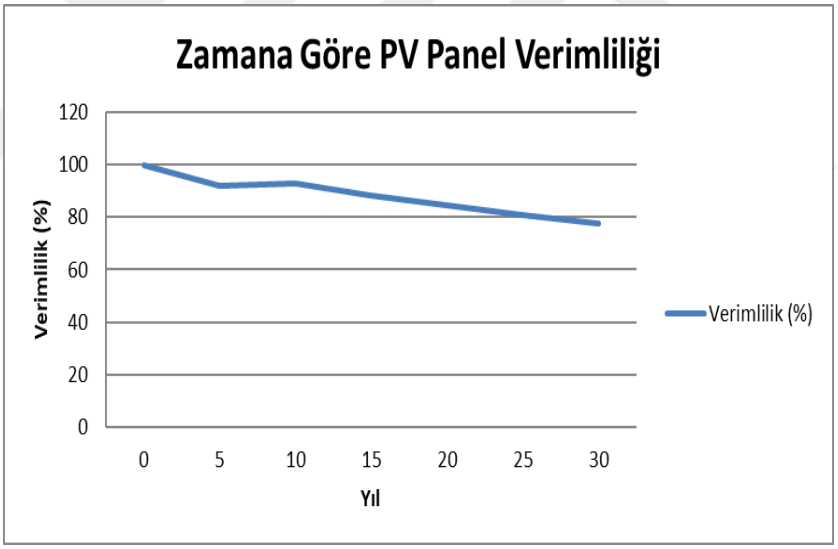
Bu karşılaştırma, sistem seçimi yapılırken ekonomik verimlilik ile enerji dönüşüm performansı arasındaki dengeyi anlamak açısından önemlidir. Türkiye gibi yüksek güneşlenme potansiyeline sahip ülkelerde, monokristal teknolojiler genellikle yatırım geri dönüş süresi açısından avantaj sağlarken, geniş alanlı uygulamalarda ince film paneller tercih edilebilmektedir.

4.3 Panel Ömrünü Etkileyen Faktörler

Güneş panellerinin ömrünü etkileyen çok sayıda teknik ve çevresel faktör vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

- **İklim Koşulları:** Aşırı sıcaklık değişimleri, nem ve dolu gibi faktörler panel ömrünü kısaltabilir.
- **Panel Kalitesi:** Kullanılan malzemenin türü ve üretim sürecindeki kalite kontrol, uzun ömür için belirleyicidir.
- **Kurulum Açısı ve Yönü:** Maksimum güneşlenme sağlanamayan sistemlerde erken performans düşüşü görülebilir.
- **İnverter ve Elektrik Aksamı:** Bozulmalar panel sisteminin genel ömrünü etkileyebilir (Jordan & Kurtz, 2013).

Bu faktörler, aynı zamanda panelin ömrü sonrasında geri dönüşüm potansiyelini de belirleyen unsurlar arasında yer alır.



Şekil 4.1 Zamana Göre PV Panel Verimliliği (Jordan & Kurtz, 2013).

Şekil 4.1, zamana göre PV panel verimliliği, fotovoltaik panellerin kullanım süresi boyunca elektrik üretim performansındaki değişimi göstermektedir. Jordan ve Kurtz tarafından gerçekleştirilen geniş ölçekli saha analizine göre, PV panellerde yıllık ortalama verim düşüş oranı %0,5 ila %0,8 arasında değişmektedir. Bu oranlar dikkate alındığında, 25 yıllık tipik kullanım süresi sonunda toplam üretimde

yaklaşık %15–20 seviyelerinde bir azalma öngörülebilmektedir (Jordan & Kurtz, 2013).

Şekil 4.1 incelendiğinde, ilk yıllarda verim kaybı nispeten hızlı gerçekleşirken, ilerleyen yıllarda eğri daha yatay bir forma dönüşmektedir. Bu eğilim, panelin ilk kullanım döneminde yaşanan termal gerilmelerin etkilerinden kaynaklanabilmektedir. Zamanla bu etkiler azalmakta ve panelin performansı daha kararlı bir seyir izlemektedir.

Sonuç olarak, panel ömrü hesaplamalarında ve LCA çalışmalarında dikkate alınması gereken kritik bir parametreyi ortaya koymaktadır. Ayrıca üreticilerin garanti politikalarında belirtilen performans oranları (%80-85 düzeyi) bu eğilimlerle uyumluluk göstermektedir.

Çizelge 4.3 Panel ömrünü etkileyen unsurların teknik karşılaştırması

Faktör	**Etkisi**	**Notlar**
İklim koşulları	Fiziksel hasar, verim düşüşü	Dolu, sıcaklık farkları, nem
Panel türü ve kalitesi	Daha uzun ömür veya erken bozulma	Monokristal paneller daha dayanıklı
Kurulum açısı ve yönü	Maksimum enerji alımı	Güneye bakan 30-35° önerilir
Bakım sıklığı	Panel temizliği verimi artırır	Yılda 2-3 defa temizlik önerilir
İnverter kalitesi	Sistemin genel ömrünü etkiler	Arızalar tüm sistemi durdurabilir

Çizelge 4.3’ te fotovoltaik panellerin kullanım ömrünü etkileyen başlıca teknik faktörler karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

İklim koşulları, panel ömrünü etkileyen en önemli dışsal faktörlerden biridir. Aşırı sıcaklık değişimleri, yüksek nem oranı ve dolu gibi ekstrem hava olayları, panellerde fiziksel hasara ve uzun vadede verim kayıplarına yol açabilmektedir. Bu durum, özellikle zorlu iklim şartlarına sahip bölgelerde kurulan sistemlerde panel ömrünün beklenenden daha kısa olmasına neden olabilmektedir.

Panel türü ve üretim kalitesi, sistemin uzun vadeli performansını doğrudan etkilemektedir. Yüksek kaliteli ve dayanıklı malzemelerle üretilen paneller daha uzun kullanım ömrü sunarken, düşük kaliteli paneller erken bozulma riski taşımaktadır.

Kurulum açısı ve yönü, panelin güneş ışınımından maksimum düzeyde faydalanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış açı ve yönlendirme, yalnızca enerji üretimini azaltmakla kalmayıp, bazı durumlarda panel üzerinde düzensiz yüklenmelere ve uzun vadede yapısal sorunlara yol açabilmektedir.

Bakım sıklığı, panel yüzeyinde biriken toz, kir ve diğer dış etkenlerin giderilmesi açısından önemlidir. Düzenli bakım ve temizlik yapılmayan sistemlerde ışık geçirgenliği azalmakta, bu durum doğrudan verim kaybına neden olmaktadır. Yılda 2–3 kez yapılan periyodik temizlik ve kontroller, hem enerji üretimini artırmakta hem de panel ömrünü uzatmaktadır.

Son olarak, inverter kalitesi fotovoltaik sistemin genel ömrünü ve sürekliliğini etkileyen önemli bir bileşendir. İnverter arızaları, panelin kendisi sağlam olsa dahi sistemin tamamının devre dışı kalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, yüksek kaliteli ve güvenilir inverterlerin tercih edilmesi, sistemin uzun vadeli performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

Çizelgeye göre; sıcaklık değişimleri, nem oranı, UV ışınımı, mekanik yükler ve malzeme kalitesi, panel ömrü üzerinde en belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır (Ndiaye vd.,2013).

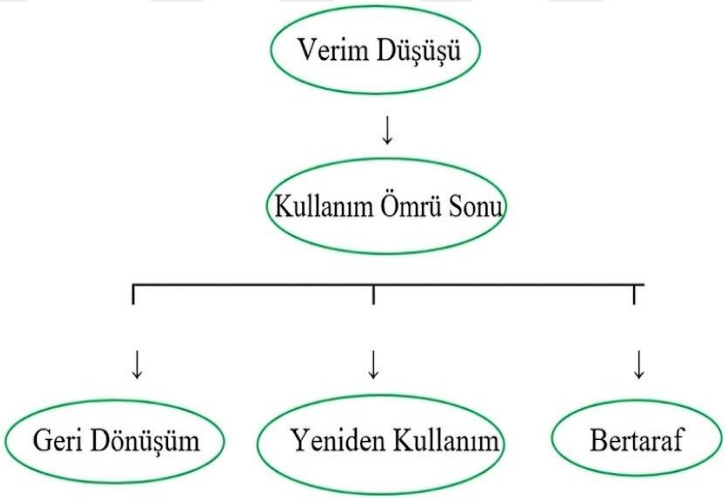
4.4 Genel Değerlendirme

Yapılan değerlendirmeler, panel performansının yalnızca üretim teknolojisiyle değil, çevresel koşullar ve bakım uygulamalarıyla da doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna göre; monokristal panellerin daha yüksek verim sunduğu, yüksek sıcaklık ve gölgelenmenin panel performansını olumsuz etkilediği, ayrıca düzenli temizlik, uygun eğim açısı ve kaliteli malzeme kullanımının sistem performansının korunmasında önemli rol oynadığı belirtilmektedir (Güven vd.,2024).

4.5 Güneş Paneli Atıkları

4.5.1 Kullanım Ömrü Sonu Kavramı

PV panellerde yıllık ortalama verim düşüş oranı, geniş ölçekli saha verilerine dayanan çalışmalar kapsamında %0,5–0,8 aralığında rapor edilmektedir. Bu bozunma oranları dikkate alındığında, panellerin yaklaşık 25–30 yıllık işletme süresi sonunda başlangıç güçlerinin yaklaşık %70–80'ini üretebildiği görülmektedir. Bu durum, PV panellerde kullanım ömrü sonu EoL kavramının esas olarak performans düşüşü ile ilişkili olduğunu ve panellerin zamanla enerji üretim kapasitelerinde kademeli bir azalma yaşandığını ortaya koymaktadır (Jordan & Kurtz, 2013).



Şekil 4.2 Panel Ömrü Sonu Süreç Akışı

Şekil 4.2, fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonunda izlediği yönetim zincirini adım adım göstermektedir. İlk aşamada, sahada kullanım ömrünü tamamlayan paneller tespit edilerek toplama merkezlerine ulaştırılmaktadır. Ardından paneller, fiziksel durumlarına göre yeniden kullanılabilir (örneğin ikinci el sistemlerde) veya geri dönüştürülebilir olarak sınıflandırılır. Yeniden kullanılabilir paneller, küçük ölçekli enerji sistemlerinde değerlendirilebilirken; hasarlı paneller, geri dönüşüm tesislerine gönderilir.

Geri dönüşüm aşamasında paneller, cam, alüminyum çerçeve, EVA tabakası, silikon hücreler ve metal iletkenler gibi bileşenlerine ayrıştırılmaktadır.

Bu malzemelerin yeniden kazanımı, hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de ekonomik geri kazanım sağlamaktadır. Süreç sonunda geri dönüştürülemeyen az miktardaki atık ise çevre mevzuatına uygun şekilde bertaraf edilmektedir.

Bu süreç akışı, PV atık yönetiminde döngüsel ekonomi yaklaşımının temelini oluşturmakta ve sürdürülebilir enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü tamamlandıktan sonra dahi çevreye minimum etkiyle varlığını sürdürmesini sağlamaktadır.

4.5.2 Panel Atıklarının Bileşimi

PV paneller, uzun ömürlü ve dayanıklı olacak şekilde çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapılar, kullanım ömürlerinin sonunda önemli miktarda atık oluşturmaktadır. Panel atıklarının bileşimi, geri dönüşüm stratejilerinin belirlenmesinde ve çevresel etkilerin değerlendirilmesinde kritik rol oynar. Genellikle bir PV panelin bileşimi şu şekilde özetlenebilir:

Cam (%65-75)

Fotovoltaik panellerin ön yüzeyinde yer alan temperli cam, toplam panel kütlesinin en büyük bileşenini oluşturmaktadır. Kristal silikon tabanlı PV modüllerde cam bileşen, mekanik söküm ve kırma işlemleriyle diğer katmanlardan nispeten kolay şekilde ayrılabilmektedir. Ayrıştırılan cam, saflık düzeyine bağlı olarak konvansiyonel cam geri dönüşüm tesislerinde yeniden işlenebilmekte ve bu durum, PV panel geri dönüşüm süreçlerinde hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir avantaj sağlamaktadır (Deng vd. 2019).

Alüminyum (%6-10)

Panellerin çerçevesi genellikle alüminyumdan yapılır. Alüminyum, yüksek geri dönüşüm değeri olan bir malzemedir ve piyasada ikincil hammadde olarak talep görmektedir (Cucchiella vd.2015).

Polimer Malzemeler (%5-10)

Encapsulant (güneş panellerinin yapımında kullanılan özel bir malzeme) olarak genellikle EVA, arka tabaka olarak ise PET veya PVF gibi plastik bazlı polimerler kullanılır. Bu malzemeler termal ya da kimyasal işlemlerle ayrıştırılabildiği bildirilmektedir (Dias vd.2016).

Yarı İletken Malzeme (%3-5)

Enerji üretiminden sorumlu hücre katmanı, panel türüne göre farklılık gösterir:

- c-Si panellerde yüksek saflıkta silikon kullanılır.
- İnce film panellerde ise CdTe, CIGS gibi bileşikler bulunur (Sica vd.2018).

Bu bileşenler geri kazanım açısından değerlidir; ancak kadmiyum gibi toksik metaller özel işlem gerektirir (Tan vd. 2021).

Gümüş ve Bakır (%<1)

Hücre bağlantıları ve iletken devrelerde kullanılan gümüş ve bakır**,** miktar olarak düşük olmasına rağmen ekonomik değeri yüksek metaller arasındadır. Geri dönüşüm sırasında özellikle gümüş geri kazanımı dikkat çekmektedir (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Kurşun, Kadmiyum gibi Ağır Metaller (Tehlikeli Bileşenler)

Özellikle eski tip panellerde lehim noktalarında Pb bulunur. Ayrıca CdTe ve panellerde kullanılan Cd, yüksek toksisiteye sahiptir ve AB ile Türkiye yönetmeliklerinde tehlikeli atık olarak sınıflandırılmaktadır (T.C. ÇŞİDB, 2021; EC Directive 2008/98/EC).

PV panellerin bileşimi, büyük oranda geri dönüştürülebilir cam ve alüminyumdan oluşsa da, içerdikleri tehlikeli metaller ve karmaşık polimer yapı nedeniyle özel geri dönüşüm teknikleri gerektirmektedir. Gelişmiş geri dönüşüm sistemleri, hem çevresel risklerin azaltılması hem de değerli hammaddelerin yeniden ekonomiye kazandırılması açısından büyük önem taşır (IRENA-IEA-PVPS, 2016).

Çizelge 4.4 PV Panel Bileşenleri ve Özellikleri (Fthenakis vd.,2021)

Malzeme	Ortalama Ağırlık (%)	Geri Dönüşüm Potansiyeli	Risk Durumu
Cam	%70-75	Yüksek	Düşük
Alüminyum Çerçeve	%10-15	Yüksek	Düşük
Silikon Hücreler	%5-8	Orta (Saflaştırma gerekir)	Düşük
Plastikler (EVA, Tedlar)	%5-10	Düşük	Orta(yakma gerekebilir)
Kurşun (Lehim)	<%0.1	Düşük	Yüksek (toksik)
Kadmiyum Tellürür	<%0.05	Özel işlem gerekir	Yüksek (zehirli)

Çizelge 4.4' te PV panellerin temel bileşenleri, bu bileşenlerin ortalama ağırlık oranları, geri dönüşüm potansiyelleri ve çevresel risk durumları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Fthenakis vd. (2021), tarafından ortaya konulan veriler, PV panellerin büyük oranda geri dönüştürülebilir malzemelerden oluşmasına rağmen, bazı bileşenlerin çevresel ve sağlık açısından önemli riskler barındırdığını göstermektedir.

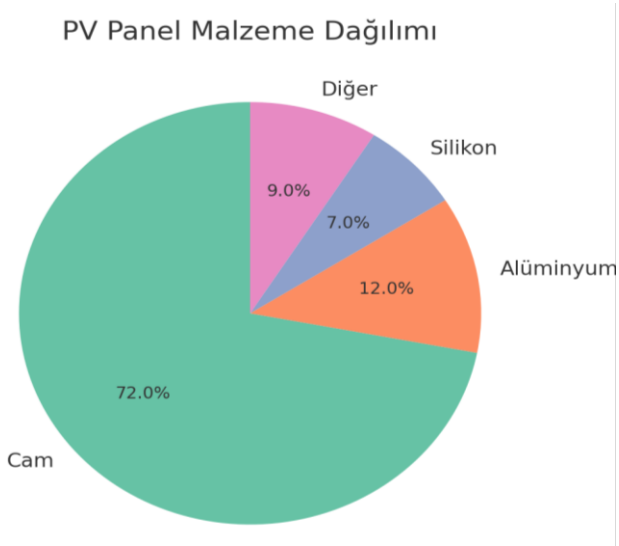
Çizelge 4.4'e göre PV panellerin en büyük bileşeni, yaklaşık %70–75 oranıyla camdır. Camın geri dönüşüm potansiyeli yüksek olup, çevresel risk düzeyi düşük olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, alüminyum çerçeve de %10–15'lik ağırlık payı ve yüksek geri dönüşüm potansiyeliyle dikkat çekmekte, düşük risk düzeyi sayesinde sürdürülebilir atık yönetimi açısından avantaj sağlamaktadır.

Silikon hücreler, PV panellerin yaklaşık %5–8'lik kısmını oluşturmaktadır. Silikonun geri dönüşüm potansiyeli orta düzeyde olup, yeniden kullanılabilir hâle getirilmesi için ek saflaştırma işlemleri gerekmektedir. Risk düzeyinin düşük olmasına karşın, geri kazanım sürecinin teknik zorlukları ve maliyeti, bu bileşenin geri dönüşümünü sınırlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır.

PV panellerde kullanılan plastik esaslı malzemeler (EVA, Tedlar vb.) ise %5–10 oranında bulunmakta ve düşük geri dönüşüm potansiyeline sahiptir. Bu malzemelerin geri kazanımı çoğu zaman termal işlemler veya yakma yöntemleri gerektirdiğinden, çevresel risk düzeyi orta seviyede değerlendirilmektedir. Uygun şekilde yönetilmediği takdirde bu malzemeler çevreye zararlı emisyonlara neden olabilmektedir.

Panel bileşenleri arasında ağırlıkça çok küçük oranlara sahip olmasına rağmen, kurşun (lehim) ve kadmiyum tellürür gibi maddeler çevresel ve insan sağlığı açısından yüksek risk taşımaktadır. Kurşun <%0,1 oranında bulunmasına rağmen toksik özellikleri nedeniyle tehlikeli atık kapsamında değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, <%0,05 oranında yer alan kadmiyum tellürür, yüksek zehirlilik potansiyeli nedeniyle özel geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri gerektirmektedir.

Sonuç olarak, Çizelge 4.4 PV panellerin büyük bir kısmının geri dönüştürülebilir ve düşük riskli malzemelerden oluştuğunu, ancak küçük oranlarda bulunan tehlikeli bileşenlerin dahi uygun şekilde yönetilmediği takdirde ciddi çevresel riskler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, PV panel atık yönetiminde yalnızca geri dönüşüm oranlarına değil, aynı zamanda tehlikeli bileşenlerin kontrollü şekilde işlenmesine yönelik politikaların önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.3 PV Panel Malzeme Dağılımı

Şekil 4.3’ te PV panellerin malzeme bileşimi yüzdesel olarak gösterilmektedir. Buna göre PV panellerin en büyük bileşenini yaklaşık %72 oranıyla cam oluşturmaktadır. Cam, panelin ön yüzeyinde yer almakta olup güneş ışınımının hücrelere iletilmesini sağlarken aynı zamanda mekanik dayanım ve çevresel koruma işlevi görmektedir. Yüksek orandaki cam içeriği, kullanım ömrü sonunda PV panel atıklarının geri dönüşüm potansiyelinin büyük ölçüde bu malzeme üzerinden şekillendiğini göstermektedir.

Panelin yaklaşık %12’si alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum genellikle çerçeve yapısında kullanılmakta olup hafifliği, dayanıklılığı ve yüksek geri dönüşüm oranı sayesinde ekonomik ve çevresel açıdan önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. PV panellerin geri dönüşüm süreçlerinde alüminyum, en kolay ve en yüksek verimle geri kazanılabilen malzemelerden biridir.

Silikon, PV panellerin yaklaşık %7’lik kısmını oluşturmaktadır ve elektrik enerjisinin üretildiği yarı iletken hücrelerin temel bileşenidir. Oransal olarak daha düşük bir paya sahip olmasına rağmen silikon, panelin işlevselliği açısından kritik öneme sahiptir. Ancak silikonun geri kazanımı, cam ve alüminyuma kıyasla daha karmaşık ve maliyetli süreçler gerektirmektedir.

Geriye kalan yaklaşık %9’luk kısım ise diğer malzemelerden oluşmaktadır. Bu grup içerisinde polimerler (EVA), arka tabaka, bakır, gümüş ve lehim malzemeleri gibi çeşitli bileşenler yer almaktadır. Her ne kadar bu malzemelerin oranı görece düşük olsa da, içerdikleri bazı ağır metaller ve kimyasallar nedeniyle çevresel risk potansiyeli taşımakta ve atık yönetimi açısından özel değerlendirme gerektirmektedir.

Sonuç olarak, PV panellerin malzeme dağılımı incelendiğinde, geri dönüşüm ve atık yönetimi stratejilerinin özellikle cam ve alüminyumun etkin geri kazanımına odaklanması gerektiği, buna karşılık silikon ve diğer bileşenler için daha gelişmiş ve sürdürülebilir teknolojilerin önem taşıdığı görülmektedir.

4.5.3 Atık Potansiyeli - Türkiye ve Dünya Genelinde Projeksiyonlar

Güneş enerjisi teknolojilerinin hızla yaygınlaşması, önümüzdeki yıllarda büyük miktarda PV panel atığının oluşacağını göstermektedir. PV panellerin

ortalama ömrü 25-30 yıl arasında değişmektedir. Bu nedenle, 2010'lu yıllarda kurulan sistemlerin kullanım ömrü sona erdiğinde, özellikle 2040 yılı sonrasında atık hacminde belirgin bir artış beklenmektedir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

4.5.3.1 Dünya Genelinde PV Atık Projeksiyonları

IRENA ve IEA-PVPS tarafından hazırlanan 2016 tarihli çalışmada, iki farklı senaryo üzerinden küresel PV atık projeksiyonları yapılmıştır:

- **Normal Atık Senaryosu:** Panellerin tasarlanmış ömrünü tamamlayarak atığa dönüşmesi.
- **Kaza Senaryosu:** Panel kırılması, doğal afetler veya kurulum hataları gibi nedenlerle erken dönemde atığa dönüşmesi.

Çizelge 4.5 Küresel PV Atık Projeksiyonları

Yıl	Normal Senaryo (Milyon Ton)	Kaza Senaryosu (Milyon Ton)
2030	1,7-8	60
2050	60-78	110-120

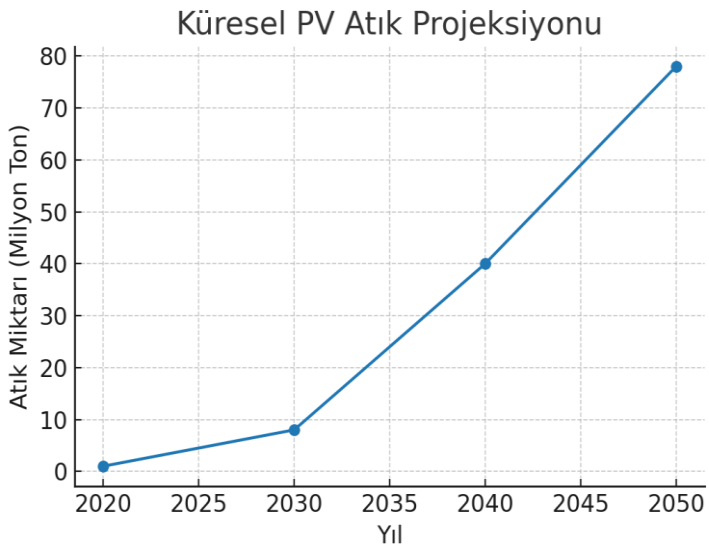
Çizelge 4.5' te, küresel ölçekte PV panel atıklarının farklı senaryolara göre yıllara bağlı projeksiyonları sunulmaktadır. Çizelge; PV sistemlerin kullanım ömrü, arıza oranları ve erken söküm olasılıkları dikkate alınarak oluşturulan normal senaryo ve kaza senaryosu olmak üzere iki farklı yaklaşımı içermektedir.

Normal senaryo kapsamında, PV panellerin ortalama 25–30 yıllık tasarım ömrünü büyük ölçüde tamamlayarak kullanım dışı kaldığı varsayılmaktadır. Bu senaryoya göre 2030 yılı itibarıyla küresel PV atık miktarının 1,7–8 milyon ton aralığında olacağı öngörülmektedir. Ancak uzun vadede, özellikle 2000'li yılların ortasından itibaren hızla artan güneş enerjisi kurulumlarının etkisiyle, 2050 yılına gelindiğinde PV atık miktarının 60–78 milyon ton seviyelerine ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Kaza senaryosu ise panellerin kullanım ömrünü tamamlamadan devre dışı kalmasını ifade eden erken arıza, doğal afetler, üretim hataları ve sistem sökümleri

gibi durumları içermektedir. Bu senaryoya göre PV atık miktarının çok daha yüksek seviyelere ulaşabileceği öngörülmektedir. 2030 yılı için kaza senaryosunda küresel PV atık miktarının yaklaşık 60 milyon ton olacağı tahmin edilirken, 2050 yılında bu değerin 110–120 milyon ton aralığına çıkabileceği belirtilmektedir.

Söz konusu projeksiyonlar, küresel ölçekte güneş enerjisi yatırımlarının çevresel etkilerinin yalnızca kurulum aşamasıyla sınırlı olmadığını, kullanım ömrü sonrasında ortaya çıkacak atık yönetimi sorunlarının da stratejik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, PV panel geri dönüşüm altyapılarının geliştirilmesi, mevzuatların güçlendirilmesi ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının yaygınlaştırılması, gelecekte oluşması muhtemel çevresel risklerin azaltılması açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).



Şekil 4.4 Küresel PV Atık Projeksiyonu

Şekil 4.4, dünya genelinde kullanım ömrünü tamamlayan fotovoltaik panellerin yıllara göre oluşturacağı tahmini atık miktarını göstermektedir. IRENA ve IEA PVPS tarafından hazırlanan bu projeksiyona göre, 2030 yılına kadar yaklaşık 4 milyon ton, 2050 yılına kadar ise 78 milyon ton civarında PV panel atığının ortaya çıkması beklenmektedir (IRENA-IEA-PVPS,2016).

Şekil 4.4'deki artış eğrisi, 2020'li yılların ortalarına kadar görece düşük bir ivmeyle ilerlerken, sonraki dönemde özellikle 2040 sonrası hızla yükselmektedir. Bunun nedeni, 2010-2020 döneminde dünya genelinde kurulan çok sayıdaki PV

sistemin 25-30 yıllık ömürlerini dolduracak olmasıdır. Dolayısıyla bu artış, hem geri dönüşüm altyapısının hem de politik planlamanın eş zamanlı olarak geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu projeksiyon, PV atık yönetimini sadece çevresel bir konu değil, aynı zamanda stratejik kaynak yönetimi meselesi haline getirmektedir. Çünkü geri dönüştürülebilir malzeme miktarının artması, gelecekte yeni bir ikincil hammadde ekonomisi yaratma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, bu veriler ülkelerin PV atık yönetimi politikalarını belirlerken uzun vadeli planlama yapmaları gerektiğini de ortaya koymaktadır.

4.5.3.2 Türkiye'de PV Atık Potansiyeli

Türkiye'de fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonunda oluşacak atık miktarının tahmini üzerine yapılan çalışmalarda, 2050 yılına kadar ülkenin toplam PV atık potansiyelinin yüz binlerce tona ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu tür projeksiyonlar, yapay sinir ağları ve regresyon analizleri kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar uluslararası kurumların tahminleriyle de uyum göstermektedir (Koçkaya, 2025). Bu miktar, Türkiye'nin hem geri dönüşüm altyapısını hem de mevzuat temelli atık yönetimi sistemini güçlendirmesini zorunlu kılmaktadır. Küresel trendle paralel biçimde, Türkiye'nin PV atık potansiyelinin (Çizelge 4.6) artışı, yeni yeşil istihdam alanları**,** geri kazanım ekonomisi ve döngüsel kaynak yönetimi açısından önemli fırsatlar da sunmaktadır.

Çizelge 4.6 Türkiye PV Atık Projeksiyonu

Yıl	Türkiye Tahmini PV Atığı (Bin ton)
2030	150
2040	1100

Bu atıkların büyük bölümü geri dönüştürülebilir cam, alüminyum ve silikon gibi maddelerden oluşsa da, özellikle ince film panellerde bulunabilen kadmiyum ve kurşun gibi toksik maddeler nedeniyle atık yönetimi stratejilerinin zamanında oluşturulması gerekmektedir (Fraunhofer ISE,2020).

2050 yılına kadar biriken PV panel atıkları:

- İkincil hammadde potansiyeli sunar,
- Yeni istihdam alanları oluşturabilir,
- Etkili yönetilmediğinde çevresel riskler doğurabilir**.**

Bu nedenle, sadece yenilenebilir enerji üretimi değil, aynı zamanda sürdürülebilir atık yönetimi politikaları da devletler ve özel sektör için öncelikli gündem olmalıdır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

4.6 Tehlikeli Atık Potansiyeli

Fotovoltaik paneller çevre dostu enerji üretimi sağlasa da, kullanım ömrünün sonunda ortaya çıkan panel atıklarının bir kısmı tehlikeli atık sınıfına girebilmektedir. Bu durum, özellikle panellerin bileşiminde bulunan ağır metaller, toksik kimyasallar ve yan ürünler nedeniyle önem taşır. Uygun şekilde bertaraf edilmedikleri takdirde bu maddeler, toprak ve yeraltı suyu kirliliği başta olmak üzere çeşitli çevresel ve sağlık riskleri yaratabilir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Çizelge 4.7 Tehlikeli Maddeler ve Kaynakları

Tehlikeli Madde	**Potansiyel Risk**
Kurşun (Pb)	Nörotoksik, su kirliliği
Kadmiyum (Cd)	Kansorejen, toprak ve su kirliliği
Selenyum (Se)	Kronik toksisite
Tellür (Te)	Az toksik ancak çevresel birikim riski
Florlu polimerler (örneğin PVF)	Yanma sonucu zararlı gaz salınımı

Pb ve Cd gibi maddeler Avrupa Atık Yönergesi ve Türkiye'deki Atık Yönetimi Yönetmeliği kapsamında tehlikeli atık olarak sınıflandırılmaktadır (EC Directive 2008/98/EC; T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021).

Riskler;

1. Toprak ve su kirliliği: Özellikle kırılan veya dış ortamda uygun olmayan şekilde bırakılan panellerden ağır metaller sızabilir.
2. İnsan sağlığına etkiler: Solunum yoluyla alınan toz parçacıkları veya su yoluyla çevreye yayılan kadmiyum, toksik ve kanserojen etkilere yol açabilmektedir (Zhang vd.2016).
3. Yangın riski: PV modüllerde kullanılan EVA kapsülleyici ve polimer esaslı arka tabakaların, yangın veya kontrolsüz termal süreçler sırasında toksik gaz salımı riski taşıdığı literatürde belirtilmektedir (Fthenakis, 2004).

PV paneller, enerji üretimi aşamasında çevre dostu olmalarına rağmen, kullanım ömrü sonunda tehlikeli atık riski taşıyan bir yapıya dönüşebilir. Bu nedenle:

- Panellerin içerik bilgisi şeffaf bir şekilde izlenmeli,
- Geri dönüşüm süreçleri tehlikeli atıkları izole edecek şekilde yapılandırılmalı,
- Özellikle ağır metal içeren paneller için özel tesislerde işlem yapılmalıdır.

Aksi halde, yenilenebilir enerji yatırımları çevreye fayda sağlamak yerine uzun vadeli ekolojik tehditler doğurabilir.

4.7 Yeniden Kullanım ve Yeniden Değerlendirme Olanakları

Güneş panellerinin ömrünü tamamlaması, doğrudan atık haline gelmeleri gerektiği anlamına gelmez. Gerçekte birçok panel, teknik ömrü sona erse dahi belirli bir verimlilikle çalışmaya devam edebilir. Bu nedenle, PV panellerin yeniden kullanımı ve yeniden değerlendirilmesi**,** döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda sürdürülebilir atık yönetimi açısından büyük önem taşır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

4.7.1 Yeniden Kullanım

Yeniden kullanım, bir PV panelin fiziksel veya elektriksel olarak hasar görmemiş olması durumunda, doğrudan başka bir projede veya daha düşük enerji ihtiyacı olan bir uygulamada yeniden değerlendirilmesi anlamına gelir.

Yeniden Kullanım Kriterleri:

- Verimliliğin %70'in üzerinde olması
- Mekanik olarak sağlam olması (çatlak, cam kırığı olmamalı)
- İzolasyon ve bağlantı testlerinden geçmesi

Uygulama Alanları:

- Gelişmekte olan ülkelerde küçük ölçekli off-grid sistemler
- Tarım alanlarında sulama sistemleri
- Mobil şarj üniteleri veya aydınlatma sistemleri
- Eğitim amaçlı uygulamalar veya deneysel projeler

Bu tür kullanımlar, yeni üretim ihtiyacını azaltır ve ekonomik olarak dezavantajlı bölgelerde enerjiye erişimi kolaylaştırır (IRENA, 2016).

4.7.2 Yeniden Değerlendirme

Yeniden değerlendirme, panelin orijinal işlevinden farklı bir şekilde kullanılması anlamına gelir. Panel tamamen çalışmıyor olabilir; fakat içindeki bazı bileşenler hâlâ değerlidir.

Yeniden Değerlendirme Yöntemleri:

- Modül içindeki hücrelerin yeniden gruplanarak yeni modül oluşturulması
- Mekanik parçaların (çerçeve, cam) farklı ürünlerde kullanımı
- Panel dış kasasının izolasyon malzemesi, sera camı gibi alanlarda değerlendirilmesi
- PV hücrelerinin laboratuvar düzeyinde eğitim amaçlı kullanımı

Bu tür uygulamalar, geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinden daha düşük enerji gerektirir ve atığın miktarını azaltır (Sica vd.2018).

4.7.3 Ekonomik ve Çevresel Katkılar

Yeniden kullanım ve yeniden değerlendirme, tam teşekküllü geri dönüşüm tesislerine kıyasla:

- Potansiyel olarak daha düşük karbon ayak izi yaratır (Fthenakis, 2020),
- İlk yatırım maliyeti düşük olduğu için daha ulaşılabilirdir,
- Kaynak israfını azaltır ve hammadde ihtiyacını erteleyerek çevresel baskıyı azaltır.

Bu kapsamda, özellikle Avrupa'da yeniden kullanım uygulamalarına bağlı olarak ikincil bir PV panel piyasasının oluştuğu, kullanım ömrü sonuna yaklaşmış panellerin test edilerek ikinci el uygulamalarda değerlendirilebildiği literatürde belirtilmektedir (Sica vd.2018).

4.7.4 Zorluklar ve Sınırlamalar

Her ne kadar çevresel ve ekonomik avantajlar sunsa da, yeniden kullanım ve yeniden değerlendirme uygulamaları bazı sınırlamalarla karşı karşıyadır:

- Standart eksikliği**:** Yeniden kullanım için uluslararası kalite ve güvenlik standartları henüz yaygın değildir.
- İzlenebilirlik sorunu**:** Panelin üretim tarihi, üreticisi ve teknik verileri çoğu zaman belirsizdir.
- Pazar eksikliği**:** Yeniden kullanılmış panellere yönelik sabit bir talep oluşmamış olabilir.

Yeniden kullanım ve yeniden değerlendirme, PV panel atıklarının çevreye zarar vermeden ve yüksek ekonomik maliyetlere girmeden değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde:

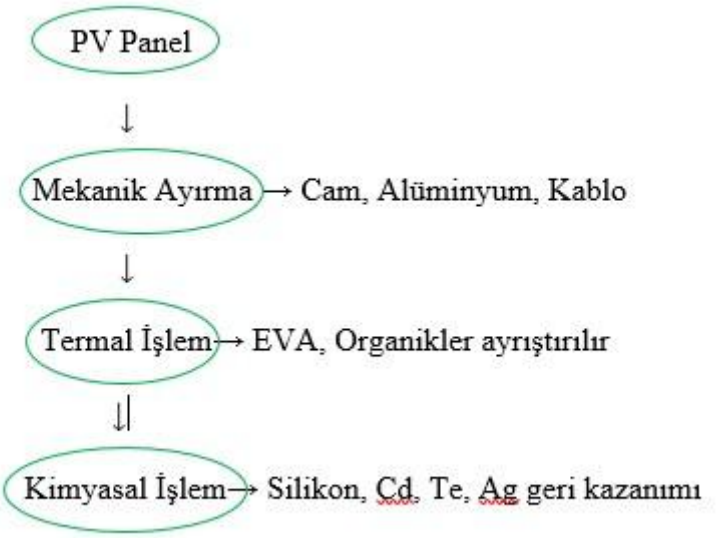
- Gelişmekte olan ülkelerde enerjiye erişim sağlanabilir,
- Döngüsel ekonomi desteklenir,
- Atık miktarı ve karbon emisyonu azaltılır.

Ancak bu olanakların yaygınlaştırılabilmesi için yasal altyapı, teknik standartlar, teşvik mekanizmaları ve kamu farkındalığı gibi alanlarda gelişim sağlanması gerekmektedir.

4.8 Mevcut Atik Yönetimi Yaklaşimlari

4.8.1 Geri Dönüşüm Teknolojileri (Mekanik, Termal, Kimyasal)

PV panellerin kullanım ömrü sonunda geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve değerli kaynakların yeniden kazanılması açısından kritik öneme sahiptir. PV panel geri dönüşüm teknolojileri üç ana grupta incelenebilir: mekanik, termal ve kimyasal yöntemler.



Şekil 4.5 PV Panel Geri Dönüşüm Süreç Akışı

4.8.1.1 Mekanik Geri Dönüşüm Yöntemi

Mekanik yöntemler, fiziksel işlemlerle panel bileşenlerinin ayrılmasına dayanır. Panelin çerçevesi, cam yüzeyi ve kablolar gibi bileşenler kırma, öğütme ve ayırma işlemleriyle elde edilir. Bu yöntem özellikle cam ve alüminyum gibi malzemelerin geri kazanımı açısından etkilidir.

Avantajları:

- Düşük maliyetlidir
- Basit ekipmanlarla uygulanabilir
- Alüminyum ve cam verimli şekilde geri kazanılabilir

Dezavantajları:

- Silikon hücrelerin verimi düşebilir (Choi vd.,2010).

4.8.1.2 Termal Geri Dönüşüm Yöntemi

Termal geri dönüşüm, panellerdeki polimer tabakaların yakılması veya piroliz yoluyla ayrıştırılması esasına dayanır. Yüksek sıcaklıklarla organik bileşenler buharlaştırılır ve silikon wafer'lara erişim sağlanır.

Avantajları:

- EVA tabakanın temiz ayrışması
- Hücrelerin fiziksel zarar görmeden çıkarılabilmesi

Dezavantajları:

- Yüksek enerji tüketimi
- Uygun filtreleme yapılmadığında zararlı gazların açığa çıkması (Dias vd., 2016).

4.8.1.3 Kimyasal Geri Dönüşüm Yöntemi

Kimyasal yöntemler, çeşitli asit ve baz çözeltileriyle PV panel bileşenlerinin ayrıştırılmasına dayanır. Özellikle silikon, kadmiyum, tellür ve indiyum gibi değerli elementlerin geri kazanımında kullanılır.

Avantajları:

- Malzeme saflığı yüksek
- Nadir ve toksik elementlerin geri kazanımı mümkün (ör. Cd, Te)

Dezavantajları:

- Kimyasal atık üretimi
- Tehlikeli kimyasalların kullanımı nedeniyle özel tesis gerektirir (Latunussa vd., 2016).

Çizelge 4.8 Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Karşılaştırması

Özellik / Yöntem	Mekanik	Termal	Kimyasal
Enerji Tüketimi	Düşük	Yüksek	Orta
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek
Geri Kazanım Saflığı	Düşük/Orta	Orta	Yüksek
Çevresel Etki	Düşük	Orta/Yüksek	Yüksek
Uygulama Karmaşıklığı	Düşük	Orta	Yüksek

Çizelge 4.8, fotovoltaik panel atıklarının değerlendirilmesinde kullanılan üç temel yöntemi teknik açıdan karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Her yöntemin geri kazanım oranı, işlem sıcaklığı, enerji tüketimi, çevresel etkisi ve uygulanabilirlik düzeyi çizelge kapsamında analiz edilmiştir (Dias vd.,2016).

Mekanik yöntemler, panelin fiziksel olarak parçalanması ve bileşenlerin (cam, alüminyum, bakır vb.) ayrıştırılması esasına dayanır. Düşük enerji tüketimi ve çevre dostu olması avantaj sağlarken, silikon hücrelerin geri kazanım oranı sınırlıdır. Termal yöntemler, yüksek sıcaklıkta panel tabakalarının ayrıştırılmasıyla cam ve metal bileşenlerin etkin şekilde geri kazanılmasını sağlar; ancak enerji maliyetleri yüksektir.

Kimyasal yöntemler ise panel bileşenlerinin asidik veya bazik çözeltilerle çözündürülmesi yoluyla silikon ve metal geri kazanımını mümkün kılar. Bu yöntem, yüksek saflıkta malzeme elde edilmesini sağlasa da kimyasal atık yönetimi açısından dikkatli uygulanmalıdır.

Çizelgede yapılan karşılaştırma, hibrit geri dönüşüm yaklaşımlarının (örneğin mekanik + kimyasal işlemler) hem çevresel hem ekonomik açıdan en verimli sonuçları verdiğini göstermektedir. Bu nedenle günümüzde birçok araştırma, atık PV paneller için entegre ve düşük enerjili geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Tao vd., 2015).

Çizelge 4.8, PV panel geri dönüşümünde tek bir ideal yöntem olmadığını, ancak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından hibrit çözümlerin ön plana çıktığını göstermektedir.

4.8.2 Geri Dönüşüm Fizibilitesi

Metrekare (1 m²) başına tipik malzeme miktarları (yaklaşık):

Çizelge 4.9'da PV panellerde birim alan başına kullanılan temel bileşenler ve bu bileşenlerin yaklaşık miktarları sunulmaktadır. Verilere göre PV panellerde en yüksek ağırlık payına sahip bileşen temperli camdır. Panelin ön yüzeyinde yer alan temperli camın miktarı yaklaşık 9–13 kg/m² aralığında olup, toplam modül ağırlığının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durum, PV panel atıklarının geri dönüşüm süreçlerinde camın stratejik bir öneme sahip olduğunu ve kütlesel geri kazanım açısından temel hedef malzeme olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.9 PV panelde 1 m² başına kullanılan malzeme ve yaklaşık miktarları

Bileşen	**Yaklaşık miktar / m²**
Temperli cam (ön)	≈ 9-13 kg / m²
Alüminyum çerçeve	≈ 1.0-2.5 kg / m²
Silikon hücre materyali	≈ 0.4-0.8 kg Si / m²
EVA & Polimer	≈ 0.7-1.5 kg / m²
Back-sheet (Tedlar / PET)	≈ 0.2-0.6 kg / m²
Bakır / kablo / bağlantı	≈ 0.02-0.08 kg / m²
Gümüş	≈ 0.01-0.04 kg / m² (10-40 g/m²)
Toplam modül ağırlığı	≈ 15-22 kg / m²

Alüminyum çerçeve, panelin mekanik dayanımını sağlayan önemli bir bileşen olup, birim alan başına yaklaşık 1,0–2,5 kg/m² oranında kullanılmaktadır. PV panellerin enerji üretiminden sorumlu olan silikon hücre materyali, yaklaşık 0,4–0,8 kg Si/m² miktarında kullanılmaktadır. Kütlesel payı cam ve alüminyuma kıyasla daha düşük olmakla birlikte, yüksek saflık gereksinimi ve teknik geri kazanım zorlukları nedeniyle ekonomik ve teknolojik açıdan kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Panel katmanları arasında yer alan EVA ve diğer polimer malzemeler, yaklaşık 0,7–1,5 kg/m² oranında bulunmakta olup hücrelerin korunması ve yapısal bütünlüğün sağlanması açısından önemlidir. Benzer şekilde, arka tabaka olarak

kullanılan Tedlar veya PET esaslı malzemeler 0,2–0,6 kg/m² aralığında yer almakta ve çevresel dayanıklılığı artırmaktadır. Ancak bu polimer esaslı bileşenlerin geri dönüşümü genellikle sınırlı olup, özel işlemler gerektirmektedir.

Elektriksel bağlantı elemanları kapsamında değerlendirilen bakır, kablo ve bağlantı bileşenleri yaklaşık 0,02–0,08 kg/m² oranında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, hücre bağlantılarında yer alan gümüş, miktar olarak oldukça düşük seviyelerde (yaklaşık 10–40 g/m²) bulunmasına rağmen, yüksek ekonomik değeri nedeniyle geri kazanım süreçlerinde önemli bir hedef malzeme konumundadır.

Tüm bileşenler birlikte değerlendirildiğinde, PV panellerin toplam modül ağırlığının yaklaşık 15–22 kg/m² aralığında olduğu görülmektedir. Bu veriler, geniş ölçekli PV kurulumlarının kullanım ömrü sonrasında ortaya çıkacak atık miktarlarının önemli boyutlara ulaşacağını ve etkili geri dönüşüm altyapılarının planlanmasının zorunlu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Geri kazanılabilen oranlar (yaklaşık):

Çizelge 4.10 PV panelde 1 m² başına yaklaşık geri kazanım oranları(IRENA & IEA-PVPS. 2016)

Malzeme	**Geri Kazanım Oranı (verim)**
Cam	≈ 95-99%
Alüminyum	≈ 95-99%
Bakır	≈ 90-100%
Silikon(Si)	≈ 50-90%
Gümüş (Ag)	≈ 30-95%
Diğer (plastik, EVA)	Düşük (EVA ayrıştırma zorluğu nedeniyle bazı tesisler yakma işlemi yapar)

Çizelge 4.10'da PV panellerde birim alan başına kullanılan başlıca malzemelerin yaklaşık geri kazanım oranları sunulmaktadır. IRENA ve IEA-PVPS (2016) tarafından yayımlanan veriler, PV panel atıklarının uygun teknolojiler kullanıldığında yüksek oranda geri dönüştürülebilir bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.10’ a göre; cam, yaklaşık %95–99 aralığındaki geri kazanım oranıyla PV panellerde yüksek geri dönüşüm verimine sahip malzeme olarak öne çıkmaktadır. Camın mekanik işlemlerle kolayca ayrıştırılabilmesi ve kimyasal yapısının bozulmadan yeniden kullanılabilmesi, bu yüksek geri kazanım oranının temel nedenleri arasında yer almaktadır. Benzer şekilde, alüminyum da %95–99 aralığında yüksek geri kazanım verimine sahip olup, çerçeve yapısından kolaylıkla ayrıştırılabilmesi sayesinde ekonomik ve çevresel açıdan avantaj sağlamaktadır.

Bakır, PV panellerde daha düşük miktarlarda bulunmasına rağmen, %90–100 gibi yüksek geri kazanıma sahiptir. Elektriksel bağlantılarda kullanılan bakırın metalurjik süreçlerle etkin şekilde geri kazanılabilmesi, bu malzemenin geri dönüşüm süreçlerindeki önemini artırmaktadır.

Buna karşılık, Si ve Ag gibi yüksek katma değerli malzemelerin geri kazanım oranları daha geniş bir aralıkta değişmektedir. Silikon için geri kazanım verimi yaklaşık %50–90 arasında olup, bu oran uygulanan geri dönüşüm teknolojisinin türüne ve saflık gereksinimlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Benzer şekilde, gümüşün geri kazanım oranı %30–95 aralığında değişmekte olup, hidrometalurjik ve pirometalurjik işlemlerin etkinliği bu oran üzerinde belirleyici olmaktadır.

PV panellerde bulunan plastik ve EVA gibi polimer esaslı malzemeler ise geri kazanım açısından en sorunlu bileşenler arasında yer almaktadır. EVA tabakasının hücre ve cam katmanlarına güçlü bir şekilde yapışık olması, mekanik ayrıştırmayı zorlaştırmakta ve bu nedenle birçok geri dönüşüm tesisinde bu malzemeler için yakma gibi termal bertaraf yöntemleri tercih edilmektedir. Bu durum, plastik bileşenlerin geri kazanım oranlarının düşük kalmasına neden olmaktadır.

Sonuç olarak, Çizelge 4.10 PV panel atıklarının özellikle cam, alüminyum ve bakır açısından yüksek geri dönüşüm potansiyeline sahip olduğunu, ancak silikon, gümüş ve polimer esaslı bileşenlerin geri kazanımı için daha gelişmiş ve sürdürülebilir teknolojilere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu bulgular, PV panel atık yönetiminde teknoloji seçiminin geri kazanım verimliliği üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Geri dönüşümün başarısı

Güçlü yönler

- Cam ve alüminyum: yüksek geri kazanım, düşük maliyet; uygulaması yaygın (IRENA & IEA-PVPS, 2018).
- Büyük ölçekli tesisler: ekonomiye girildiğinde maliyetler düşer, kimyasal/elektrolojik yöntemlerle gümüş ve silikon yüksek saflıkla geri kazanılabilir (Mulazzani vd., 2022).

Zayıf yönler

- EVA ve bazı polimerler: ayrıştırılması zor; termal işlem veya yakma gerekebilir, çevresel riskler oluşabilir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).
- Küçük hacimli akışlar: küçük atık miktarı olan pazar/ülkelerde tesis işletme maliyetleri yüksek kalır, lojistik maliyetleri kârlılığı düşürür.

Malzeme değeri ve ekonomik özet (₺ /m²):

Çizelge 4.11' de, kullanım ömrü sonuna ulaşmış PV panellerden birim alan (m²) başına geri kazanılabilen malzemelerin yaklaşık miktarları ve bu malzemelerin ortalama piyasa değerleri sunulmaktadır. Çizelge 4.11; PV panel geri dönüşümünün yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.11 PV Panel Geri Kazanılan Malzemelerin Ortalama Değeri (₺/m²)

Malzeme	**Tahmini geri kazanım miktarı / m²**	**Ortalama piyasa değeri (₺)**
Cam	9-12 kg	≈ 17 - 50 ₺
Alüminyum	1-2 kg	≈ 17 - 66 ₺
Silikon (Si)	0.4-0.8 kg	≈ 33 - 132 ₺
Gümüş (Ag)	10-40 g	≈ 17 - 330 ₺
Bakır ve diğer metaller	20-80 g	≈ 7 - 33 ₺
Toplam satılabilir malzeme değeri		≈ 200 - 530 ₺ / m²

Verilere göre cam, birim alan başına yaklaşık 9–12 kg miktarında geri kazanılabilmekte olup, piyasa değeri yaklaşık 17–50 ₺ aralığında değişmektedir. Kütlesel olarak en büyük paya sahip olmasına rağmen, camın birim fiyatının görece düşük olması nedeniyle toplam ekonomik katkısı sınırlı kalmaktadır. Buna karşın, geri dönüşüm sürecinde sağladığı hacimsel avantaj, lojistik ve malzeme geri kazanımı açısından önem taşımaktadır.

Alüminyum, yaklaşık 1–2 kg/m² geri kazanım miktarı ve 17–66 ₺ aralığındaki piyasa değeri ile ekonomik açıdan dikkat çeken bir bileşendir. Alüminyumun yüksek geri dönüşüm oranı ve yeniden işlenebilirliği, PV panel geri kazanım süreçlerinde bu malzemenin önemli bir gelir kalemi olmasını sağlamaktadır.

PV panellerin işlevsel bileşeni olan Si, yaklaşık 0,4–0,8 kg/m² miktarında geri kazanılabilmekte ve 33–132 ₺ aralığında ekonomik değer sunmaktadır. Silikonun geri kazanım sürecinde ek saflaştırma işlemleri gerektirmesi, maliyetleri artırmakla birlikte, yüksek katma değerli bir malzeme olması nedeniyle geri dönüşüm açısından stratejik öneme sahiptir.

Miktar olarak oldukça düşük seviyelerde bulunmasına rağmen, Ag ekonomik değer açısından en dikkat çekici bileşenlerden biridir. Yaklaşık 10–40 g/m² oranında geri kazanılan gümüşün piyasa değeri 17–330 ₺ aralığında değişmekte olup, bu durum geri dönüşüm tesislerinde değerli metal geri kazanımının ekonomik fizibilite üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

Bakır ve diğer metaller, birim alan başına yaklaşık 20–80 g oranında geri kazanılmakta ve 7–33 ₺ aralığında bir ekonomik değer sağlamaktadır. Bu metaller, tek başına yüksek bir gelir kalemi oluşturmamakla birlikte, toplam geri kazanım değerine katkı sağlamaktadır.

Tüm malzemeler birlikte değerlendirildiğinde, PV panellerden birim alan başına geri kazanılabilir toplam satılabilir malzeme değerinin yaklaşık 200–530 ₺/m² aralığında olduğu görülmektedir. Bu bulgu, PV panel geri dönüşümünün uygun teknolojiler ve ölçek ekonomisi ile desteklendiği takdirde, çevresel faydaların yanı sıra ekonomik olarak da sürdürülebilir bir faaliyet alanı olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.12 PV Panel Geri Dönüşüm Sürecinin Maliyeti (₺/m²)

Geri Dönüşüm Yöntemi / Aşama	**₺ Maliyet (m²)**
Mekanik geri dönüşüm (temel kırma, ayırma)	≈ 130 - 330 ₺
Tam proses (mekanik + termal + kimyasal)	≈ 260 - 825 ₺
Ortalama tesis maliyeti (karma yöntem)	≈ 220 ₺
Ortalama ekonomik gelir	≈ 450 ₺
Net ekonomik sonuç	≈ + 230 ₺

Çizelge 4.12'de PV panellerin geri dönüşüm sürecinde uygulanan farklı yöntemlerin birim alan (m²) başına maliyetleri ile elde edilen ortalama ekonomik getiriler karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Çizelge 4.12, PV panel geri dönüşümünün teknik yöntem seçimine bağlı olarak değişen maliyet yapısını ve ekonomik fizibilitesini ortaya koymaktadır.

Verilere göre mekanik geri dönüşüm yöntemleri, temel kırma ve ayırma işlemlerini içermekte olup, birim alan başına yaklaşık 130–330 ₺ aralığında bir maliyet oluşturmaktadır. Bu yöntemler, cam ve alüminyum gibi kütlesel bileşenlerin geri kazanımında etkili ve görece düşük maliyetli çözümler sunmakla birlikte, yüksek saflık gerektiren silikon ve değerli metallerin geri kazanımında sınırlı kalmaktadır.

Buna karşılık, tam proses geri dönüşüm yöntemleri (mekanik, termal ve kimyasal işlemlerin birlikte uygulanması), daha yüksek geri kazanım oranları ve

değerli metal geri kazanımı sağlamasına rağmen, maliyetleri önemli ölçüde artırmaktadır. Bu kapsamda, tam proses geri dönüşümün birim alan başına maliyeti yaklaşık 260–825 ₺ aralığında değişmektedir. Özellikle termal ve kimyasal işlemler, enerji tüketimi ve proses karmaşıklığı nedeniyle maliyet artışının temel nedenleri arasında yer almaktadır.

Ortalama tesis maliyeti, farklı geri dönüşüm yöntemlerinin birlikte kullanıldığı karma sistemler için yaklaşık 220 ₺/m² olarak belirtilmektedir. Bu yaklaşım, hem maliyetleri kontrol altında tutmayı hem de ekonomik değeri yüksek bileşenlerin geri kazanımını mümkün kılan dengeli bir çözüm sunmaktadır.

Ekonomik getiri açısından değerlendirildiğinde, PV panellerden geri kazanılan malzemelerin ortalama ekonomik gelirinin yaklaşık 450 ₺/m² seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu gelir, özellikle cam, alüminyum ve değerli metallerin satışından elde edilmektedir. Maliyet ve gelir birlikte ele alındığında, PV panel geri dönüşüm sürecinin net ekonomik sonucunun yaklaşık +230 ₺/m² seviyesinde pozitif olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, Çizelge 4.12 PV panel geri dönüşümünün uygun teknoloji seçimi ve ölçek ekonomisi ile desteklendiği takdirde, yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik olarak da sürdürülebilir bir faaliyet alanı olabileceğini göstermektedir. Bu durum, PV panel atık yönetimine yönelik yatırımların hem çevresel hem de ekonomik açıdan stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Değerlendirme;

- 1 m²'lik panelin geri dönüşümünden elde edilen ortalama gelir ≈ 450 ₺, işlem maliyeti ise ≈ 220 ₺ civarındadır.
- Yani tam ölçekli tesislerde 1 m² panel geri dönüşümünden ≈ 230 ₺ net kazanç elde edilebilir.
- Bu değer panel başına (ortalama 1.6 m²/panel) yaklaşık 370 ₺ kazanç anlamına gelir.
- Türkiye ölçeğinde yıllık 10 bin ton PV atığın geri dönüştürülmesi, yaklaşık 250-300 milyon ₺ ekonomik potansiyel oluşturur.

Çizelge 4.11 ve 4.12, PV panel geri dönüşüm sürecinin ekonomik yönünü Türk Lirası cinsinden göstermektedir. 2025 yılı ortalama döviz kuru (1 USD ≈ 33 ₺) dikkate alındığında, geri dönüşümün büyük ölçekli tesislerde ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

4.8.3 Yeniden Kullanım (Re-use) Uygulamaları

Yeniden kullanım, fiziksel veya performanssal olarak zarar görmemiş PV panellerin başka bir lokasyonda ya da düşük enerji ihtiyacı olan uygulamalarda tekrar değerlendirilmesi anlamına gelir. Avrupa Komisyonu, yeniden kullanımın geri dönüşümden önce tercih edilmesi gerektiğini belirterek atık hiyerarşisinde üst sıralarda yer verdiğini vurgulamaktadır (European Commission, 2012).

Fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonunda tamamen işlevsiz hâle gelmemesi, bu panellerin yeniden kullanım potansiyelini gündeme getirmektedir. Yeniden kullanım, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de ekonomik tasarruf sağlanması açısından sürdürülebilir bir atık yönetimi yaklaşımıdır.

Çevresel faydaları:

- Yeni panel üretimine kıyasla daha düşük karbon ayak izi
- Atık oluşumunun ertelenmesi
- Doğal kaynak kullanımında azalma

Ekonomik faydaları:

- Gelişmekte olan ülkelerde düşük maliyetli enerji çözümleri
- Sosyal projelerde maliyetsiz elektrik üretimi (ör. okul, klinik)

Yeniden Kullanım Kriterleri

Yeniden kullanıma uygun panellerin bazı teknik kriterleri karşılaması beklenir. Bu kriterler genellikle IEC 61215 standardına göre belirlenir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Çizelge 4.13 Yeniden kullanıma uygun panellerin karşılaştırılması

Kriter	**Açıklama**
Performans > %80	Nominal gücünün en az %80'ini üretebilmeli
Mekanik hasar olmamalı	Cam kırığı, hücre çatlağı olmamalı
İzolasyon testi geçilmeli	Elektriksel güvenlik açısından ölçüm yapılmalı
Delaminasyon olmamalı	EVA tabakada soyulma/ayrılma olmamalı

Kullanım ömrünü tamamlamış fotovoltaik panellerin fiziksel ve elektriksel performanslarına göre yeniden değerlendirilme potansiyellerini gösteren Çizelge 4.13, verimlilik oranı, mekanik hasar düzeyi, yalıtım direnci, sıcaklık katsayısı ve güvenlik test sonuçları gibi kriterler üzerinden panellerin yeniden kullanım uygunluğunu sınıflandırmaktadır (Paiano vd.,2015).

Yapılan karşılaştırmaya göre; nominal güç kapasitesinin %80'inden fazlasını koruyan, hücre çatlağı veya cam kırığı bulunmayan ve izolasyon testlerinden başarıyla geçen paneller, ikincil kullanım için uygun kabul edilmektedir. Bu tür paneller, düşük güç ihtiyacı olan uygulamalarda örneğin; tarımsal sulama sistemleri, küçük konut projeleri veya eğitim amaçlı enerji istasyonları gibi sistemlerde tekrar kullanılabilmektedir.

Buna karşılık, elektriksel kaçak veya renk değişimi gibi ciddi bozulmalar gösteren paneller, geri dönüşüm sürecine yönlendirilmelidir. Yeniden kullanım uygulamaları, geri dönüşümle karşılaştırıldığında daha az enerji gerektirdiği için karbon ayak izini azaltma açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Sica vd.,2018).

Çizelge 4.13' te sunulan karşılaştırma, PV panel atık yönetiminde "öncelikli yaklaşımın yeniden kullanım, sonrasında geri dönüşüm" olması gerektiğini vurgulamakta ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle doğrudan uyum göstermektedir. Ayrıca yine bu çizelge, PV panel atık yönetiminde geri dönüşümden önce yeniden kullanımın öncelikli bir strateji olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini artırırken atık miktarını da azaltır.

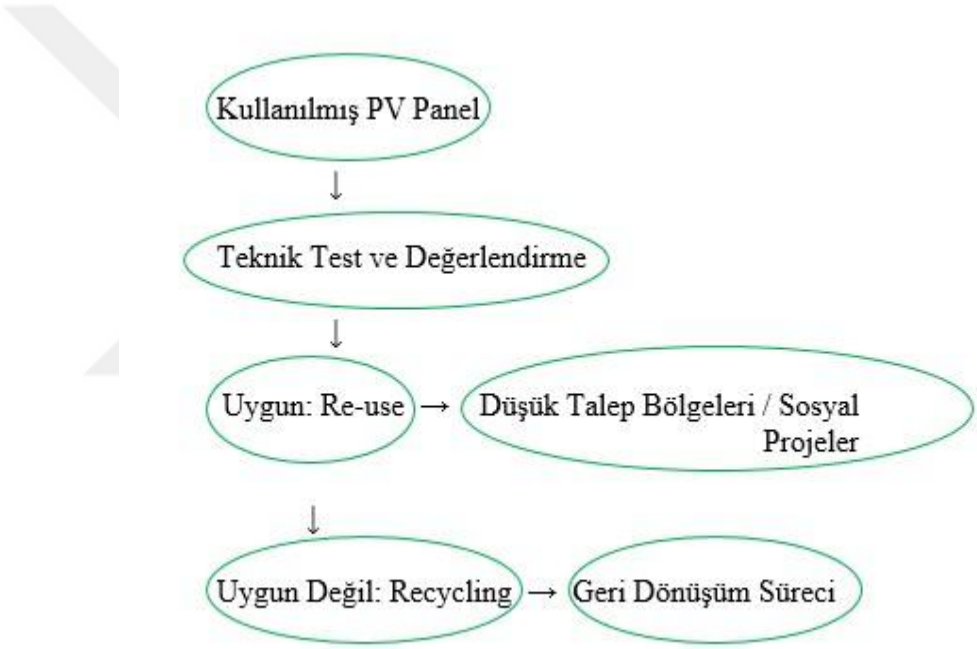
Yeniden Kullanım Senaryoları:

Düşük Enerji Talebine Sahip Bölgelerde Kullanım:

Eski paneller, kırsal bölgelerdeki konutlar veya sulama sistemleri gibi düşük enerji tüketen yerlerde kullanılabilir.

Gelişmekte Olan Ülkelerde İkinci El Pazarları:

Avrupa'da kullanım dışı kalan paneller, Afrika ve Güney Asya gibi bölgelere ihraç edilerek ikinci ömürlerine kavuşmaktadır. Ancak bu uygulamalar beraberinde e-atık transferi ve etik sorunlar da doğurabilir.



Şekil 4.6 PV Panelin Yeniden Kullanım Yolculuğu

Yeniden Kullanımın Sınırlılıkları

Yeniden kullanım uygulamaları, PV panellerin teknik ve ekonomik olarak tekrar değerlendirilmesini sağlasa da, standart eksikliği ve sınırlı pazar nedeniyle hâlâ yaygınlaşamamaktadır (Chhillar vd., 2025).

4.8.4 Dünya Genelindeki Uygulamalar (AB, ABD, Çin vb.)

Güneş paneli atıkları, küresel ölçekte hızla büyüyen bir çevre ve kaynak yönetimi sorununa dönüşmektedir. Bu bağlamda, AB, ABD ve Çin gibi önde gelen fotovoltaik üretici ve kullanıcı ülkeler, atık yönetimi konusunda farklı yaklaşımlar benimsemiştir. Bu bölümde bu uygulamalar karşılaştırmalı şekilde sunulmaktadır.

Avrupa Birliği (AB),

AB, PV panel atıklarını WEEE Direktifi kapsamında yasal olarak düzenleyen ilk bölgesel yapıdır. 2012 yılında yürürlüğe giren WEEE 2012/19/EU direktifi ile PV paneller, EEE kategorisine alınmış ve üreticilere EPR getirilmiştir.
Uygulama Özellikleri:

- Üretici, ithalatçı veya distribütörler atık yönetiminden sorumludur.
- PV panel üreticileri, kayıtlı bir sistemde geri alma ve işleme planı sunmak zorundadır.
- Üye ülkelerdeki uygulama özel kuruluşlarca yürütülmektedir (European Parliament,2012).

ABD,

ABD'de federal düzeyde PV panel atıklarını kapsayan kapsamlı bir mevzuat henüz bulunmamaktadır. Ancak bazı eyaletler kendi özel düzenlemelerini oluşturmuştur. Örneğin:

- California: 2021 itibariyle PV paneller, evsel tehlikeli atık olarak sınıflandırılmıştır.
- Washington: PV üreticilerine atık toplama ve işleme sorumluluğu getiren özel bir yasa (PV Panel Stewardship Program) uygulanmaktadır.

ABD'deki geri dönüşüm uygulamaları daha çok gönüllülük esasına ve ekonomik fizibiliteye dayalıdır (USEPA,2022).

Çin,

Çin, dünyanın en büyük PV üreticisi ve tüketicisidir. Ancak PV atık yönetimi mevzuatı henüz gelişme aşamasındadır. 2025 itibariyle PV atıklarına özel bir ulusal yasal düzenleme henüz bulunmamaktadır. Bunun yerine genel katı atık mevzuatı kapsamında yönetilmektedir.

Durum Özeti:

- 2030'a kadar 20 milyon ton PV panel atığı oluşacağı öngörülmektedir (IRENA, 2016).
- Geri dönüşüm altyapısı henüz yetersizdir, ancak bazı pilot projeler başlatılmıştır (ör. GCL, China Silicon Recycling Co.).
- Çin hükümeti, 14. Beş Yıllık Kalkınma Planı'na PV geri dönüşüm hedeflerini dâhil etmiştir (Zhong vd.,2021).

Çizelge 4.14, farklı ülkelerin fotovoltaik panel atıklarıyla ilgili politika ve uygulama yaklaşımlarını karşılaştırmalı biçimde göstermektedir. Çizelge kapsamında Avrupa Birliği, ABD ve Çin gibi önde gelen ülkelerin yasal çerçeveleri, EPR, geri dönüşüm zorunlulukları ve uygulamadaki etkinlik düzeyleri incelenmiştir (IEA-PVPS,2022).

Çizelge 4.14 Önde Gelen Ülkelerin PV Atık Yönetim Politikalarının Karşılaştırması

Ülke / Bölge	**Yasal Düzenleme**	**Uygulama Türü**	**Geri Dönüşüm Zorunlu mu?**	**Geri Kazanım Kuruluşu**
AB	WEEE 2012/19/EU	Zorunlu, EPR sistemi	Evet	PV CYCLE
ABD	Eyalet bazlı	Gönüllü /yerel	Bazı eyaletlerde zorunlu	Yok, (özel şirketler)
Çin	Genel atık yönetimi	Pilot/gelişmekte	Hayır	Pilot projeler

Avrupa Birliği, WEEE Direktifi kapsamında PV panelleri elektrikli ve elektronik atık sınıfına dâhil etmiş ve üreticilere geri alma, geri dönüşüm sorumluluğu yüklemiştir. Bu kapsamda, PV CYCLE gibi üretici birlikleri aracılığıyla üye ülkelerde etkin bir toplama ve geri dönüşüm ağı oluşturulmuştur.

Almanya, bu sistemin en başarılı uygulayıcılarından biridir; ulusal mevzuatını AB standartlarına tam uyumlu hale getirerek yüksek toplama oranlarına ulaşmıştır.

ABD'de ise federal düzeyde PV atıklarına yönelik kapsamlı bir mevzuat bulunmamakta, eyaletler kendi düzenlemelerini uygulamaktadır. California eyaleti bu alanda öncü olup PV panelleri "evrensel atık (universal waste)" kategorisine dâhil etmiştir. Çin'de ise fotovoltaik üretim kapasitesinin hızla artmasıyla birlikte 2023 itibarıyla geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesine yönelik ulusal planlar hayata geçirilmektedir.

Bu karşılaştırma, ülkeler arasındaki temel farkın mevzuatın bağlayıcılığı ve üretici sorumluluğu mekanizmasının etkinliği olduğunu ortaya koymaktadır. AB ülkelerinde PV atık yönetimi yasal zorunluluklara ve EPR ilkesine dayalı olarak yürütülmektedir. Bu durum, Türkiye'nin PV atık yönetimi politikalarını geliştirirken AB modeliyle uyumlu bir EPR temelli sistem oluşturmasının önemini göstermektedir (European Commission,2021).

Ayrıca bu Çizelge, farklı ülkelerin PV atık yönetimi yaklaşımlarını sistematik olarak karşılaştırarak, Türkiye'nin mevzuat tasarımı açısından hangi modelden ne ölçüde yararlanabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle AB'nin zorunlu EPR sistemi, Türkiye için örnek alınabilecek en güçlü politika aracıdır.

4.8.5 Türkiye'deki Durum ve Mevzuat

Türkiye, güneş enerjisi teknolojilerinin kurulum kapasitesi bakımından son on yılda önemli bir gelişme göstermiştir. Özellikle 2014 sonrası yürürlüğe giren YEKDEM ile birlikte, hem lisanslı hem de lisanssız PV kurulumlar hız kazanmıştır. Ancak bu hızlı büyüme, kullanım ömrü sonunda ortaya çıkacak PV panel atıkları için gerekli mevzuat ve altyapı planlamasının önceden yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'de atık yönetimi, Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015) ve AEEE Yönetmeliği (2012, rev. 2022) kapsamında düzenlenmektedir. PV paneller, elektrikli ve elektronik eşya kategorisinde değerlendirilebilmekle birlikte, mevzuatta PV panellere özgü açık tanımlar ve yönetim prosedürleri henüz net şekilde yer almamaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2022).

Bununla birlikte, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği ve Atıkların

Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik kapsamında, CdTe ve Pb içeren paneller tehlikeli atık olarak sınıflandırılabilmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2021).

Türkiye'nin PV atık yönetimi konusundaki mevcut durumu Çizelge 4.15' te özetlenmiştir.

Çizelge 4.15 Türkiye'de PV Panel Atık Yönetimi Mevcut Durum Analizi

Kriter	**Mevcut Durum**	**Eksiklikler / İhtiyaçlar**
Mevzuat	AEEE Yönetmeliği, Atık Yönetimi Yönetmeliği	PV panellere özgü yasal düzenleme yok
Tehlikeli Atık Sınıflandırması	CdTe, Pb içeren paneller tehlikeli atık	Tüm panel tipleri için net sınıflama yok
Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu	Henüz zorunlu değil	WEEE benzeri sistem gerekliliği
Geri Dönüşüm Altyapısı	Genel atık geri dönüşüm tesisleri	Özel PV geri dönüşüm tesisleri eksik
İzleme ve Raporlama	Zorunlu değil	Atık miktarı ve akışının izlenmesi gerekli

Türkiye'nin önümüzdeki dönemde PV panel atık yönetimi açısından öncelikli adımları;

- PV paneller için özel mevzuat çıkarılması,
- EPR mekanizmasının zorunlu hale getirilmesi,
- Ulusal PV atık veri tabanı oluşturulması,
- Özel geri dönüşüm tesislerinin kurulması şeklinde sıralanabilir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Bu adımlar, hem çevresel risklerin azaltılmasına hem de PV atıklarının değerli hammadde potansiyelinin ekonomiye kazandırılmasına katkı sağlayacaktır.

4.8.5.1 Türkiye'de PV Panel Atık Yönetiminin Tarihsel Gelişimi

Türkiye'de fotovoltaik teknolojilerin 2010'lu yılların başına kadar sınırlı ve pilot ölçekli uygulamalarla yaygınlaştığı, bu nedenle kullanım ömrü sonu PV panellerine yönelik atık yönetimi ve kurumsal düzenlemelerin bu dönemde henüz gelişmediği belirtilmektedir (IEA, 2011).

2000-2014 yılları arasındaki süreçte, PV paneller yasal olarak tanımlı bir atık kategorisine dahil edilmemiştir. 2012 yılında yürürlüğe AEEE Yönetmeliği bile başlangıçta PV panelleri kapsam dışında bırakmıştır. Dolayısıyla bu dönemde kullanım ömrünü tamamlamış paneller, çoğunlukla **"**cam-metal karışımlı atık**"** veya **"**hurda malzeme**"** olarak değerlendirilmiş, herhangi bir özel bertaraf süreci uygulanmadan belediye depolama sahalarına yönlendirilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Türkiye'de fotovoltaik teknolojilerin erken yaygınlaşma döneminde, PV panel atıklarının oluşum miktarının sınırlı olması ve özel bir geri dönüşüm altyapısının bulunmaması nedeniyle, bu atıkların sistematik bir yönetim yaklaşımıyla ele alınmadığı belirtilmektedir (IEA, 2011).

Ancak bu uygulamalarda çevresel güvenlik önlemleri alınmamış, panellerin içerdiği ağır metaller (ör. kurşun, kadmiyum tellürür) veya silikon bileşenlerinin çevreye olası etkileri dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, 2014 öncesi dönem Türkiye açısından "yasal tanımsızlık" ve "atık yönetim boşluğu" dönemi olarak değerlendirilebilir.

2014 sonrasında güneş enerjisi kurulumlarının hızla artmasıyla birlikte PV panel atıklarının da gelecekte önemli bir çevresel risk oluşturabileceği anlaşılmış ve bu durum mevzuatın geliştirilmesi için bir dönüm noktası olmuştur.

4.8.5.2 Türkiye'de PV Panel Atıkları İçin Planlanan Düzenlemeler ve Öngörüleri

Türkiye'de güneş enerjisi yatırımları son yıllarda hızla artış göstermiştir. 2025 yılı itibarıyla ülke genelindeki toplam kurulu güneş enerjisi gücü 19.6 GW'a ulaşmıştır. Bu değer, yaklaşık 49 milyon güneş paneline denk gelmektedir.

2025 yılı itibarıyla Türkiye'de PV panel atıkları, hâlen AEEE yönetmeliği kapsamında dolaylı olarak değerlendirilmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim

Değişikliği Bakanlığı, 2023). Yani PV paneller, e-atık sınıfına açıkça dâhil edilmemiş olsa da, benzer içeriğe sahip ürünler için uygulanan genel hükümler (örneğin toplama, taşımadan üretici sorumluluğuna kadar) bu panellere kısmen uygulanabilmektedir.

Ancak bu durum geçicidir. Türkiye, Avrupa Birliği çevre müktesebatına uyum çerçevesinde, PV panelleri doğrudan kapsayan özel bir düzenlemeyi 2026 yılı sonuna kadar yürürlüğe koymayı taahhüt etmiştir. Bu hedef, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayımladığı **"**2024-2028 Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı**"**nda açıkça yer almaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

Planlamaya göre;

- 2024-2025**:** Mevzuat hazırlık süreci, AB WEEE Direktifi ile tam uyumlu taslak yönetmelik hazırlığı.
- 2026**:** PV panellerin "elektrikli ve elektronik ekipman" kategorisine açık biçimde dâhil edilmesi ve EPR zorunlu hale gelmesi.
- 2027-2028: Toplama, geri dönüşüm ve raporlama yükümlülüklerinin üreticiler ve ithalatçılar için kademeli olarak uygulanması.

Bu düzenlemenin yürürlüğe girmesiyle birlikte:

- PV panel üreticileri ve ithalatçıları, ürünlerinin ömrü sonunda geri alınmasından ve geri dönüştürülmesinden sorumlu olacak,
- Lisanslı PV atık geri dönüşüm tesisleri kurulacak,
- PV atıkları için ulusal bir izleme ve raporlama sistemi geliştirilecektir.

4.8.5.3 PV Cycle ve Benzeri Uluslararası Girişimler

PV panel atık yönetiminde uluslararası düzeyde en bilinen ve yaygın şekilde uygulanan sistemlerden biri PV CYCLE'dır. 2007 yılında Avrupa'da kurulan PV CYCLE, PV üreticilerinin, ithalatçılarının ve distribütörlerinin gönüllü katılımıyla başlatılmış olup, 2012 yılında AB WEEE Direktifi'nin yürürlüğe girmesiyle

zorunlu geri alma sistemi olarak faaliyetlerini sürdürmeye başlamıştır (PV CYCLE, 2023).

PV CYCLE, Avrupa Birliği'nde EPR ilkesi doğrultusunda, kullanım ömrü sonuna ulaşmış fotovoltaik panellerin toplanması, taşınması ve geri dönüştürülmesini koordine eden başlıca kuruluşlardan biridir; Avrupa genelinde yaygın bir toplama ağı aracılığıyla PV panel atıklarını geri dönüşüm tesislerine yönlendirmektedir (EPIA, 2019).

Fotovoltaik panel geri dönüşüm süreçlerinde cam, alüminyum, silikon ve değerli metallerin yüksek oranda geri kazanımı hedeflenmektedir. Literatürde, kristal silikon paneller için toplam geri kazanım oranının teorik olarak %90–95 seviyelerine ulaşabildiği, ince film panellerde ise kadmiyum tellür gibi tehlikeli bileşenlerin güvenli biçimde ayrıştırılmasının öncelikli bir gereklilik olduğu belirtilmektedir (Latunussa vd.,2016).

EPR ve döngüsel ekonomi yaklaşımları kapsamında, ürünlerin tasarım aşamasından itibaren geri dönüşümün dikkate alınması teşvik edilmekte; üreticilerin çevre dostu tasarım kriterleri ve geri dönüştürülebilir malzeme seçimi konusunda sorumluluk üstlenmesi öngörülmektedir (European Commission, 2020).

PV CYCLE dışında, dünya genelinde PV panel atık yönetimine odaklanan farklı girişimler de bulunmaktadır:

- ABD: Ince film CdTe panellerin kapalı devre geri dönüşümünü sağlayan, üreticiye entegre bir sistemdir.
- Japonya: 2014'te başlatılmış olup, hem gönüllü hem de pilot ölçekli geri dönüşüm tesislerini kapsar.
- Çin: GCL (Geri Kazanım ve Rafireni Sanayi A.Ş.) ve benzeri üreticilerin öncülüğünde yürütülen, silikon geri kazanımına odaklı programlardır (IEA-PVPS, 2021).

Bu girişimlerin ortak özellikleri, geri dönüşüm sürecinin şeffaf raporlama, çevresel standartlara uyum ve yüksek geri kazanım oranları hedeflerine dayanmasıdır. Ayrıca, uluslararası bilgi paylaşımı ve teknoloji transferi konularında da birbirleriyle iş birliği yapmaktadırlar.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, PV CYCLE gibi üretici sorumluluğu esaslı sistemlerin benimsenmesi, ulusal geri dönüşüm altyapısının

gelişmesi ve PV atıklarının ekonomik değere dönüştürülmesi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Ancak bunun gerçekleşebilmesi için mevzuatın netleşmesi, finansman mekanizmalarının oluşturulması ve özel tesislerin kurulması gerekmektedir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

4.8.6 Türkiye'de Bireysel Kullanım

Türkiye'de güneş enerjisi sistemlerinin lisanssız kurulumu EPDK tarafından belirlenen yasal çerçeveye tabidir. 2023 yılı itibarıyla yapılan düzenlemeye göre, bireysel kullanıcılar konut çatılarında maksimum 25 kW kurulu güce sahip sistem kurabilmektedir. Bu sınır, küçük ölçekli üreticilerin enerji ihtiyacını karşılamasını kolaylaştırmakta ve merkezi olmayan enerji üretimini teşvik etmektedir (EPDK, 2023).

4.9 Çevresel Etkiler

PV paneller, kullanım ömürleri boyunca karbon salımı yapmadan temiz enerji üreterek çevreye olumlu katkı sağlasa da, ömür sonu aşamasında ortaya çıkan atıkların çevresel etkileri önemli bir tartışma alanı oluşturmaktadır. Atık yönetiminde geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçleri çevresel yararlar sunarken, uygunsuz bertaraf yöntemleri toprak, su ve hava kirliliği risklerini artırabilmektedir. Bu bölümde, ömrünü tamamlamış PV panellerin geri dönüşümünün çevresel faydaları, uygunsuz bertaraf yöntemlerinin doğurabileceği riskler, toprak ve su kirliliği potansiyeli, insan sağlığına etkileri ve yaşam döngüsü analizi kapsamında karbon ayak izi değerlendirmesi incelenmektedir.



Şekil 4.7 Geri dönüştürülmeyi bekleyen atık paneller

4.9.1 Kullanım Sonrası Geri Dönüşümün Çevresel Yararları

PV panellerin geri dönüşümü, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunmaktadır. Cam ve alüminyum gibi yüksek geri dönüşüm oranına sahip malzemelerin yeniden ekonomiye kazandırılması, hammadde ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların korunmasını sağlar. Silikon, gümüş ve nadir elementlerin geri kazanımı ise madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan ekolojik tahribatı sınırlandırır (Corcelli vd., 2018).

Geri dönüşüm, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Yaşam döngüsü analizleri, alüminyum gibi yapı malzemelerinin geri kazanımının, birincil üretime kıyasla enerji tüketimini ve buna bağlı emisyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Fthenakis vd.,2011). Benzer şekilde, geri dönüştürülmüş camın kullanımı, yeni cam üretimine kıyasla enerji tüketimini ve buna bağlı çevresel etkileri azaltmaktadır (Dias vd., 2016). Bu tasarruflar, PV teknolojisinin karbon nötr enerji politikalarıyla uyumunu güçlendirmektedir.

4.9.2 Uygun Olmayan Bertaraf Yöntemlerinin Riskleri

Kullanım ömrünü tamamlamış PV panellerin düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi veya kontrolsüz şekilde bırakılması, uzun vadede ekonomik ve çevresel yönetim maliyetlerini artırmaktadır (Cucchiella vd., 2015).

Gelişmekte olan ülkelerde, uygun bertaraf altyapısının yetersizliği nedeniyle ikinci el panel ticareti çoğu zaman kontrolsüz gerçekleşmekte ve bu durum uluslararası e-atık transferi sorunlarını da beraberinde getirmektedir (Sica vd.,2018).

4.9.3 Toprak ve Su Kirliliği Riski

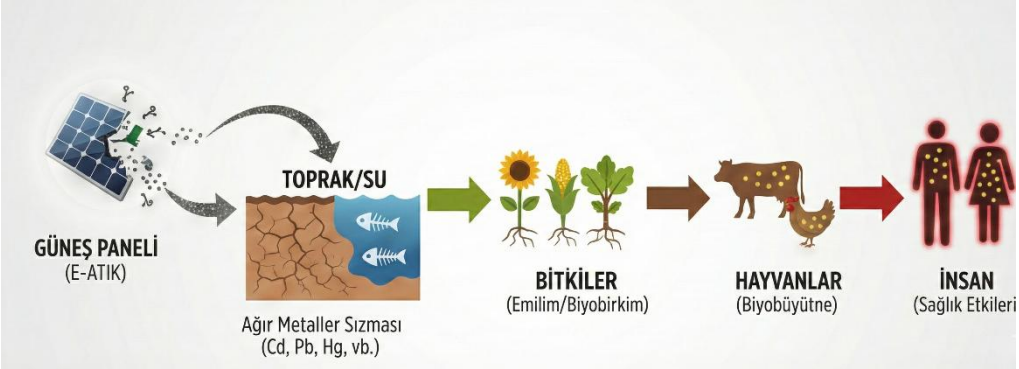
Fotovoltaik panellerin uygunsuz bertarafı sonucunda kadmiyum, kurşun ve selenyum gibi ağır metallerin çevresel ortama salınabileceği; bu metallerin toprakta birikerek tarımsal üretim ve gıda güvenliği açısından risk oluşturabileceği belirtilmektedir (Fthenakis, 2004). Kadmiyum, toprakta biyoyararlanımı yüksek olan elementlerden biridir ve bitkiler tarafından kolayca alınarak gıda zincirine girebilir (Zhang vd., 2016).

Yeraltı suyuna sızan ağır metallerin, içme suyu kaynaklarının kirlenmesine ve uzun vadede biyolojik birikim yoluyla ekosistemler üzerinde toksik etkilere neden olabileceği belirtilmektedir (Fthenakis, 2004).

4.9.4 İnsan Sağlığına Etkiler (Ağır Metaller, Kadmiyum vb.)

PV panellerde özellikle ince film teknolojilerinde kullanılan CdTe ve CIGS bileşikleri, uygunsuz bertaraf veya kontrolsüz işleme koşullarında çevresel ve insan sağlığı açısından risk oluşturabilmektedir. Literatürde, kadmiyumun solunum veya su yoluyla vücuda alınmasının ciddi toksik etkilere yol açabileceği ve bu nedenle Cd içeren PV modüllerin özel atık yönetimi gerektirdiği vurgulanmaktadır (Komoto vd., 2018). Pb ise sinir sistemi üzerinde nörotoksik etki göstermekte, özellikle çocuklarda gelişimsel bozukluklara yol açmaktadır (WHO, 2010).

Fotovoltaik modüllerin yangın veya yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda, özellikle florlu polimer içeren bileşenlerin bozunması sonucu hidrojen florür (HF) gibi akut toksik gazların açığa çıkabileceği belirtilmektedir (Fthenakis, 2004). Bu nedenle PV panel atıklarının insan sağlığına olası zararlarının önlenmesi için yalnızca lisanslı tesislerde geri dönüşüm veya güvenli bertaraf yöntemleri uygulanmalıdır.



Şekil 4.8. Panel atıklarının insan sağlığına geçişi

4.9.5 Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ile Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi

PV panellerin çevresel etkilerini anlamak için en kapsamlı yöntemlerden biri LCA'dir. LCA, panelin hammaddeden üretime, kullanım aşamasından ömür sonuna kadar tüm süreçlerdeki enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını analiz eder (Stolz vd., 2016).

Yaşam döngüsü analizleri, fotovoltaik panellerin üretim aşamasında belirli bir karbon ayak izine sahip olduğunu; ancak kullanım süresince fosil yakıtlı elektrik üretiminin yerini alarak sağladıkları temiz enerji sayesinde bu çevresel yükün genellikle birkaç yıl içinde telafi edildiğini göstermektedir (Fthenakis & Kim, 2011).

Geri dönüşüm süreçlerinin LCA dâhil edilmesi, fotovoltaik panellerin toplam karbon ayak izini azaltmaktadır; özellikle cam ve alüminyum gibi yüksek geri kazanım potansiyeline sahip malzemelerin geri dönüşümü, çevresel performansın iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Tao ve Yu,2015).

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, PV panellerin ömrü sonrası geri dönüşümü iklim değişikliğiyle mücadelede avantaj sağlarken, uygunsuz bertaraf yöntemleri uzun vadeli çevresel ve sağlık risklerini artırmaktadır. Dolayısıyla sürdürülebilir PV atık yönetimi, yalnızca ekonomik değer yaratmak için değil, aynı zamanda ekosistem ve toplum sağlığını korumak için de kritik öneme sahiptir.

4.10 Ekonomik ve Politik Boyut

PV panellerin kullanım ömrü sonrasındaki atık yönetimi yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve politik boyutlara da sahiptir. PV atıklarının geri

dönüşümü ile değerli hammaddelerin yeniden kazanılması, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda ekonomik fayda yaratırken; üretici sorumluluğu, teşvik mekanizmaları ve sürdürülebilir enerji politikaları, bu sürecin politik temellerini oluşturmaktadır.

4.10.1 Geri Dönüşümün Ekonomik Potansiyeli

PV panellerin geri dönüşümü, büyük miktarda ikincil hammadde elde edilmesini mümkün kılmaktadır. IRENA ve IEA'nın raporlarına göre, 2050 yılına kadar küresel ölçekte geri dönüştürülebilir PV atıklarının ekonomik değerinin 15 milyar dolar seviyesine ulaşabileceği öngörülmektedir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Ekonomik faydalar üç temel boyutta toplanabilir:

1. Hammadde Kazanımı: Cam (%70), alüminyum (%10-15), silikon (%5-8) ve gümüş (%0.05) gibi malzemeler yeniden üretim süreçlerinde kullanılabilir.
2. İthalat Bağımlılığının Azalması: Nadir metallerin geri kazanımı, özellikle yüksek teknoloji endüstrilerinde dışa bağımlılığı azaltır.

Çizelge 4.16' da bahsedilen malzemelerin ekonomik değeri, özellikle gümüş ve yüksek saflıktaki silikon gibi kritik bileşenlerde yoğunlaşmaktadır. Örneğin, bir ton atık PV panelden geri kazanılan gümüş miktarının piyasa değerinin 250-300 ABD doları aralığında olduğu, alüminyum ve cam geri kazanımının ise daha düşük birim gelir sağlamasına rağmen yüksek hacim avantajı nedeniyle önemli ekonomik katkı sunduğu belirtilmektedir.

Çizelge 4.16. PV Panellerden Geri Kazanılabilecek Malzemelerin Ekonomik Potansiyeli (Corcelli vd., 2018).

Malzeme	Ortalama Paneldeki Pay (%)	Geri Kazanım Potansiyeli	Piyasa Değeri (2024)
Cam	%70-75	Yüksek	Orta
Alüminyum	%10-15	Yüksek	Yüksek
Silikon	%5-8	Orta	Yüksek
Gümüş	<%1	Yüksek	Çok yüksek
Bakır	<%1	Yüksek	Orta

IRENA ve IEA-PVPS projeksiyonlarına göre, 2050 yılına kadar küresel ölçekte PV panel geri dönüşümünden elde edilebilecek toplam ekonomik potansiyelin 15 milyar ABD dolarını aşması beklenmektedir. Bu potansiyel, hem malzeme geri kazanımından elde edilen gelirleri hem de yeni panel üretiminde sağlanacak ham madde tasarruflarını kapsamaktadır (IRENA, 2020).

Çizelge 4.16, PV panel geri dönüşümünün yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik bir fırsat alanı oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum, ülkelerin atık yönetim politikalarında geri dönüşüm yatırımlarını teşvik etmesinin ekonomik rasyonelini güçlendirmektedir.

4.10.1.1 PV Geri Dönüşüm Tesisi Kurulumunun Teknik-Ekonomik Analizi

Çizelge 4.17' de PV panel geri dönüşüm tesisinin kurulumu için gerekli olan başlıca yatırım kalemleri ve bu kalemlere karşılık gelen tahmini maliyet aralıkları sunulmaktadır. Verilere göre yatırım maliyetinin en büyük bölümünü makine ve ekipman giderleri oluşturmaktadır. Kırıcı ve ayırıcı sistemler, termal fırınlar ve kimyasal işlem hatlarını içeren bu kalem için yaklaşık 200–400 milyon ₺ aralığında bir bütçe öngörülmektedir. Bu yüksek maliyet, özellikle değerli metallerin geri kazanımını mümkün kılan ileri teknolojilerin yatırım bedellerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.17. Tesis Kurulum Maliyeti

Maliyet Kalemi	**TL Karşılığı**
Makine-Ekipman (kırıcı, ayırıcı, termal fırın, kimyasal hat)	200-400 milyon ₺
Bina + altyapı	33-99 milyon ₺
Kimyasal süreç hattı (Ag-Si geri kazanımı)	66-165 milyon ₺
Kurulum + mühendislik	33-66 milyon ₺
Toplam yatırım maliyeti	330-725 milyon ₺

Bina ve altyapı yatırımları, tesisin fiziksel gereksinimlerini karşılamak amacıyla gerekli olup, yaklaşık 33–99 milyon ₺ aralığında bir maliyet oluşturmaktadır. Bu kapsamda üretim alanları, depolama sahaları, atık yönetimi alanları ve enerji-su altyapısı gibi unsurlar yer almaktadır.

Çizelge 4.17' de ayrıca, kimyasal süreç hattı için ayrı bir maliyet kalemi belirtilmektedir. Özellikle gümüş ve silikon geri kazanımına yönelik bu hatların yatırım maliyeti 66–165 milyon ₺ aralığında değişmektedir. Bu durum, yüksek katma değerli malzemelerin geri kazanımının ekonomik açıdan önemli olmakla birlikte, yüksek başlangıç yatırımı gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Kurulum ve mühendislik hizmetleri, tesisin devreye alınması, sistem entegrasyonu ve süreç optimizasyonunu kapsamakta olup, yaklaşık 33–66 milyon ₺ düzeyinde bir maliyet öngörülmektedir. Bu kalem, tesisin güvenli ve verimli bir şekilde işletilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Tüm maliyet kalemleri birlikte değerlendirildiğinde, PV panel geri dönüşüm tesisinin toplam yatırım maliyetinin yaklaşık 330–725 milyon ₺ aralığında olduğu görülmektedir. Bu geniş aralık, tesisin kapasitesi, kullanılan teknoloji düzeyi ve hedeflenen geri kazanım oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Sonuç olarak, Çizelge 4.17 PV panel geri dönüşüm tesislerinin yüksek başlangıç yatırımı gerektirdiğini ortaya koymakla birlikte, uzun vadede geri kazanılabilir malzemelerin ekonomik değeri ve çevresel kazanımlar dikkate alındığında, bu yatırımların stratejik ve sürdürülebilir bir sanayi alanı oluşturma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

4.10.1.2. Yıllık Geri Kazanılabilir Malzeme Miktarları

Çizelge 4.18'de PV panel geri dönüşüm süreçleri sonucunda yıllık bazda geri kazanılabilir malzeme miktarları, ilgili geri kazanım oranlarıyla birlikte sunulmaktadır. Verilere göre cam, %95–99 gibi yüksek geri kazanım oranları sayesinde yıllık 7.000–7.500 ton aralığında geri kazanılabilen en yüksek miktara sahip malzeme konumundadır. PV panellerin kütlesel olarak büyük bir bölümünü oluşturan cam, bu yönüyle geri dönüşüm süreçlerinde hacimsel açıdan temel geri kazanım hedefi olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.18. Yıllık Geri Kazanılabilir Malzeme Miktarları

Malzeme	**Geri Kazanım Oranı**	**Yıllık Miktar (10.000 ton)**
Cam	%95-99	7.000-7.500 ton
Alüminyum	%95	700-1.000 ton
Silikon (Si)	%50-90	150-300 ton
Gümüş (Ag)	%30-95	3-7 ton
Bakır	%90-100	50-80 ton

Alüminyum, yaklaşık %95 geri kazanım oranı ile yılda 700–1.000 ton aralığında geri kazanılabilmektedir. Alüminyum çerçevelerin mekanik işlemlerle kolaylıkla ayrıştırılabilmesi ve yeniden işlenebilirliği, bu yüksek geri kazanım potansiyelinin temel nedenleri arasında yer almaktadır.

Enerji üretiminin temel bileşeni olan Si için geri kazanım oranı %50–90 aralığında değişmekte olup, yıllık geri kazanılabilir miktarın 150–300 ton seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu geniş aralık, uygulanan geri dönüşüm teknolojisinin türüne, saflaştırma düzeyine ve proses verimliliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Miktar olarak görece düşük seviyelerde bulunmasına rağmen, Ag yüksek ekonomik değeri nedeniyle stratejik öneme sahip bir malzemedir. %30–95 aralığındaki geri kazanım oranlarıyla birlikte, yıllık 3–7 ton arasında gümüş geri kazanımı mümkün olabilmektedir. Bu durum, değerli metal geri kazanımının tesis ekonomisi üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Bakır, %90–100 gibi yüksek geri kazanım oranlarıyla yılda yaklaşık 50–80 ton aralığında geri kazanılabilmektedir. Elektriksel iletkenliği yüksek olan bakır, PV panellerde daha düşük miktarlarda bulunmasına rağmen, geri dönüşüm sürecine anlamlı bir ekonomik katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Çizelge 4.18'de sunulan veriler, PV panel geri dönüşümünün yalnızca atık miktarını azaltmakla kalmayıp, önemli miktarda ikincil hammadde üretimi sağlayarak kaynak verimliliğine ve döngüsel ekonomi hedeflerine doğrudan katkı sunduğunu açıkça göstermektedir.

4.10.1.3. Yıllık İşletme Maliyeti

Çizelge 4.19' da PV panel geri dönüşüm tesisinin yıllık işletme sürecinde karşılaşılan başlıca maliyet kalemleri ve bu kalemlere karşılık gelen tahmini yıllık gider aralıkları sunulmaktadır. Verilere göre enerji tüketimi, yıllık 33–43 milyon ₺ aralığında maliyet oluşturarak işletme giderleri içerisinde önemli bir paya sahiptir. Mekanik kırma, termal fırınlar ve kimyasal işlemler gibi enerji yoğun süreçler, bu maliyet kaleminin yüksek olmasının temel nedenleri arasında yer almaktadır.

Çizelge 4.19. Yıllık İşletme Maliyeti

Maliyet Kalemi	**TL/yıl**
Enerji tüketimi	33-43 milyon ₺
İşçilik	26-40 milyon
Kimyasal tüketimi	20-33 milyon ₺
Bakım-onarım	13-20 milyon ₺
Lojistik	16-33 milyon ₺
Toplam işletme maliyeti	110-170 milyon ₺

İşçilik giderleri, tesisin teknik personel, operatör ve mühendislik kadrosunu kapsamakta olup, yıllık 26–40 milyon ₺ aralığında değişmektedir. İş gücü ihtiyacı, tesisin kapasitesi, otomasyon düzeyi ve uygulanan geri dönüşüm teknolojilerine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Çizelge 4.19' da yer alan kimyasal tüketimi, özellikle silikon ve gümüş geri kazanımında kullanılan reaktifleri kapsamaktadır ve yıllık 20–33 milyon ₺

seviyesinde bir maliyet oluşturmaktadır. Kimyasal süreçlerin yoğunluğu ve geri kazanım hedefleri, bu maliyet kaleminin büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir.

Bakım-onarım giderleri, tesis ekipmanlarının düzenli çalışmasını sağlamak ve arıza kaynaklı duruşları minimize etmek amacıyla yapılmakta olup, yıllık 13–20 milyon ₺ aralığında bir maliyet gerektirmektedir. Bu kalem, tesisin uzun vadeli verimliliği ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Lojistik maliyetleri, atık panellerin tesise taşınması ve geri kazanılan malzemelerin sevkiyatını kapsamakta olup, yıllık 16–33 milyon ₺ düzeyindedir. Tesisin konumu, toplama ağı ve taşıma mesafeleri, lojistik giderler üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Tüm maliyet kalemleri birlikte değerlendirildiğinde, PV panel geri dönüşüm tesisinin toplam yıllık işletme maliyetinin yaklaşık 110–170 milyon ₺ aralığında olduğu görülmektedir. Bu sonuç, tesisin ekonomik fizibilitesinin yalnızca yatırım maliyetlerine değil, aynı zamanda uzun vadeli işletme giderlerinin etkin yönetimine de bağlı olduğunu göstermektedir.

4.10.1.4 Yıllık Ekonomik Getiri

Tablo 4.20'de, geri kazanılan cam, alüminyum, silikon, gümüş ve bakır gibi malzemelerin yıllık ekonomik getirileri Türk Lirası cinsinden gösterilmektedir. Veriler, her bir malzemenin geri dönüşüm süreci sonunda sağladığı minimum ve maksimum gelir aralıklarını ortaya koymaktadır. Buna göre toplam yıllık ekonomik getiri 200–460 milyon ₺ aralığında gerçekleşmektedir.

Çizelge 4.20 Yıllık Ekonomik Getiri (Geri Kazanılan Malzemelerin Değeri)

Malzeme	**TL Karşılığı**
Cam	16-33 milyon ₺
Alüminyum	50-82 milyon ₺
Silikon	33-99 milyon ₺
Gümüş	99-231 milyon ₺
Bakır	10-20 milyon ₺
Toplam gelir	200-460 milyon ₺

4.10.1.5. Yıllık Net Ekonomik Sonuç

Çizelge 4.21'de, orta ölçekli bir PV geri dönüşüm tesisine ait teknik ve ekonomik parametrelerin genel bir özeti sunulmaktadır. Tabloda yatırım ve işletme maliyetleri ile yıllık gelir ve net kazanç değerleri birlikte değerlendirilerek tesisin ekonomik fizibilitesi ortaya konulmuştur. Buna göre tesisin amortisman süresinin 2–4 yıl aralığında olduğu görülmektedir.

- Gelir: 200-460 milyon ₺
- Gider: 110-170 milyon ₺

Bu verilere göre; net kazanç yaklaşık 90-290 milyon ₺ / yıl olarak hesaplanır. Yine bu verilere dayanarak yatırım geri dönüş süresi (amortisman) de 2-4 yıl olarak hesaplanır.

Çizelge 4.21. PV Geri Dönüşüm Tesisinin Teknik-Ekonomik Özeti

Teknik-Ekonomik Özet	
Tesis Tipi	**Orta Ölçekli Pv Geri Dönüşüm Tesisi**
Toplam Yatırım Maliyeti	330-725 MİLYON ₺
İşletme Maliyeti(Yıllık)	110-170 MİLYON ₺
Yıllık Gelir	200-460 MİLYON ₺
Yıllık Net Kazanç	90-190 MİLYON ₺
Amortisman Süresi	2-4 YIL

4.10.2. Üretici Sorumluluğu ve Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR)

EPR, üreticilerin yalnızca ürünün piyasaya arzından değil, kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan atıkların toplanması, geri kazanımı ve bertarafından da sorumlu tutulmasını öngören bir düzenleyici yaklaşımdır. (European Parliament, 2012).

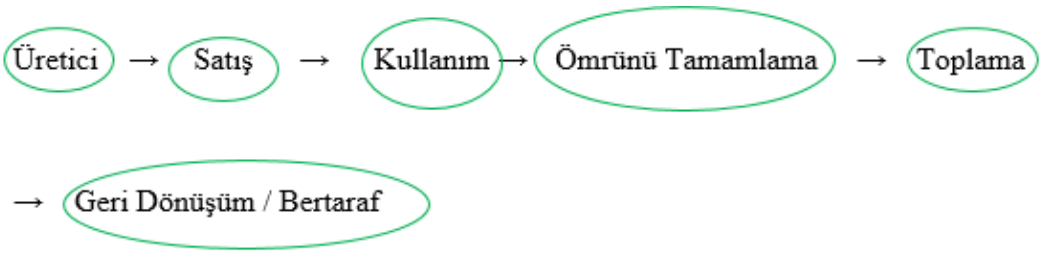
Avrupa Birliği'nde PV paneller WEEE Direktifi kapsamında EPR sistemine dahil edilmiştir. Buna göre üreticiler, panel atıklarının toplanması, taşınması ve geri dönüşümünden sorumludur. Türkiye'de ise PV paneller hâlen AEEE kapsamına

alınmakla birlikte, özel olarak EPR yükümlülüğü bulunmamaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2022).

EPR'nin faydaları:

- Üreticilerin çevre dostu tasarım yapmasını teşvik eder.
- Atık yönetiminde maliyetin üreticiye kaydırılması, kamusal yükü azaltır.
- Geri dönüşüm altyapısının finansmanını sağlar.

EPR Süreç Şeması:



Şekil 4.9 EPR Süreci (European Parliament, 2012).

Şekil 4.9, fotovoltaik panel yaşam döngüsü boyunca üreticinin çevresel yükümlülüklerinin nasıl genişletildiğini gösteren kavramsal bir akış şemasıdır. Bu modelde üreticinin sorumluluğu yalnızca ürünün tasarımı ve üretimiyle sınırlı kalmayıp, ürünün kullanım ömrü sonunda toplanması, taşınması, yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve bertaraf edilmesi aşamalarını da kapsamaktadır.

EPR sistemi, 'kirleten öder' ilkesine dayanarak çevre yönetimi açısından adil ve sürdürülebilir bir çerçeve sunmaktadır. Bu yaklaşım, üreticileri ürün tasarımında çevre dostu malzemeler kullanmaya ve kaynak verimliliğini artırmaya teşvik etmektedir. Avrupa Birliği'nde EPR mekanizması, WEEE Direktifi ile birlikte elektrikli ve elektronik ürünler için yasal zorunluluk hâline gelmiş ve atık yönetimi uygulamalarında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. (Hahladakis vd., 2019).

Bu nedenle şekil, yalnızca idari bir süreci değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim-tüketim-geri kazanım döngüsünün sistematik modelini temsil etmektedir. Ayrıca bu şekil, üretici sorumluluğunun sadece ürünün ömrü boyunca değil, ömrü

sonrasında da devam ettiğini açık biçimde göstermektedir. Böylece, üretimden atık yönetimine kadar tüm zincir sürdürülebilirlik ilkeleriyle bütünleşmektedir.

4.10.3 Teşvikler ve Politikalar

PV atık yönetiminde ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için kamu politikalarının ve devlet desteklerinin önemli bir rol oynadığı belirtilmektedir. Özellikle geri dönüşüm faaliyetlerinin yüksek yatırım maliyetleri, düşük ikincil hammadde fiyatları ve sınırlı pazar talebi nedeniyle kamu destekleri, düzenleyici çerçeveler ve piyasa teşvikleriyle desteklenmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Latunussa vd., 2016).

Çizelge 4.22, çeşitli ülkelerde güneş paneli atık yönetimi kapsamında uygulanan mevzuat temelli, ekonomik ve teknik teşvik araçlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Çizelgeda Avrupa Birliği, Almanya, Japonya, ABD ve Çin örnekleri üzerinden yasal düzenlemeler EPR sistemleri, geri dönüşüm teşvikleri ve araştırma destek programları yer almaktadır.

Çizelge 4.22 PV Panel Atık Yönetiminde Düzenleyici Yaklaşımlar ve Uluslararası Uygulama Örnekleri (Komoto vd., 2018).

Politika Aracı	**Uygulama Örneği**	**Beklenen Etki**
EPR	AB WEEE Direktifi	Üretici sorumluluğu artırılır
Hibe ve Kredi	Almanya, Japonya	Geri dönüşüm tesisleri kurulumu hızlanır
Vergi Teşviki	ABD (eyalet bazlı)	Atık toplama maliyeti düşer
Alım Garantisi	Çin (pilot uygulamalar)	İkincil hammadde pazarı büyür

Avrupa Birliği'nde PV panellerin WEEE Direktifi kapsamına alınmasıyla, üreticilere toplama ve geri dönüşüm sorumluluğu getirilmiş; bu sistem PV CYCLE gibi üretici birlikleri tarafından etkin biçimde yürütülmektedir. Almanya'da ise çevre vergisi indirimleri, geri dönüşüm tesisi yatırımları için finansal destekler ve Ar-Ge hibeleri ile sistem güçlendirilmiştir.

Japonya'da PV atık yönetimi, ağırlıklı olarak teknoloji tabanlı teşvikler ve araştırma kurumları ile özel sektör arasındaki iş birliği modelleri üzerinden desteklenmektedir. ABD'de federal düzeyde bağlayıcı bir PV atık mevzuatı bulunmamakla birlikte, eyalet bazlı gönüllü programlar, yeşil tedarik uygulamaları ve üretici katılımını teşvik eden mekanizmalar öne çıkmaktadır. Çin'de ise son yıllarda geliştirilen politika çerçeveleri, PV atıklarının geri dönüşümüne yönelik kapasitenin artırılmasını ve üreticilerin sürece daha aktif katılımını hedeflemektedir (Zhao vd., 2022).

Kısaca bu Çizelge, ülkelerin PV atık yönetiminde farklı politika yaklaşımları benimsediğini ancak ortak amacın döngüsel ekonomi ilkelerini güçlendirmek olduğunu göstermektedir. Özellikle AB ve Almanya örnekleri, EPR temelli sistemlerin hem çevresel hem ekonomik açıdan daha sürdürülebilir sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

4.10.4 Sürdürülebilir Enerji Politikaları ile Uyum

PV panel atık yönetimi, yalnızca çevresel kaygılarla sınırlı olmayıp, enerji dönüşümü ve sürdürülebilir kalkınma politikaları açısından da stratejik öneme sahiptir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında, Paris İklim Anlaşması hedefleriyle uyumlu şekilde, yenilenebilir enerji yatırımlarının döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımlarıyla entegre edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (European Commission, 2020).

Türkiye açısından bakıldığında, 2053 Net Sıfır Karbon hedefi doğrultusunda PV panel atık yönetiminin ulusal enerji politikalarıyla uyumlu hale getirilmesi kritik bir adımdır. Bu kapsamda:

- Döngüsel ekonomi stratejilerinin geliştirilmesi,
- İklim Kanunu ve Enerji Verimliliği Stratejisi ile entegrasyon,
- Geri dönüşümün karbon azaltım taahhütleriyle ilişkilendirilmesi gerekmektedir (ETKB, 2023).

PV panel atıklarının ekonomik ve politik boyutları, sürdürülebilir enerji geçişinin ayrılmaz bir parçasıdır. Geri dönüşüm süreçleri yalnızca ekonomik değer yaratmakla kalmayıp, üretici sorumluluğu ve teşvik mekanizmalarıyla

desteklendiğinde çevresel faydayı en üst düzeye çıkarabilir. Bu nedenle PV atık yönetiminin, ulusal ve uluslararası enerji politikalarıyla uyumlu bir şekilde geliştirilmesi zorunludur.

4.10.4.1 Türkiye'nin 2053 Net-Sıfır Hedefi

Türkiye, 2021 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında Paris Anlaşması'nı onaylamış ve 2053 yılı için "Net Sıfır Emisyon" hedefini resmen ilan etmiştir. Bu hedef, ülkenin karbon nötr bir ekonomiye geçişini destekleyen enerji dönüşümü politikalarını içermektedir (ETKB, 2023)(TBMM, 2021).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023 yılında hazırladığı Ulusal Enerji Planı doğrultusunda, 2053'e kadar yenilenebilir enerji kapasitesinin toplam kurulu gücün %65'ine çıkarılması, güneş enerjisinde ise 52,9 GW'a ulaşılması öngörülmektedir (IRENA, 2023).

Türkiye'nin Paris Anlaşması'nı onaylamasıyla birlikte, uzun vadeli iklim hedefleri ve sera gazı azaltım taahhütleri resmî olarak benimsenmiştir. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımının artmasıyla ortaya çıkacak atık yönetimi konularının, iklim politikalarıyla uyumlu biçimde ele alınması önem kazanmaktadır (TBMM, 2021)(OECD, 2023).

4.11 GZFT (Güçlü-Zayıf Yönler, Fırsatlar Ve Tehditler) Analizi: Güneş Paneli Atik Yönetimi

Fotovoltaik panel atık yönetimi, çevresel, ekonomik ve politik boyutlarıyla birlikte ele alındığında çeşitli avantajlar ve zorluklar barındırmaktadır. GZFT analizi yöntemi, bu alandaki güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditlerin sistematik şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Güçlü Yönler

- PV panellerin büyük bir kısmı camdan oluşmakta olup, toplam kütlenin yaklaşık %65–75'ini cam bileşenler oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra alüminyum çerçeveler önemli bir paya sahip olup, bu malzemeler geri

dönüşüm süreçlerinde yüksek verimlilikle geri kazanılabilmektedir (Dias vd., 2016).

- Döngüsel Ekonomi Katkısı: Silikon, gümüş ve bakır gibi stratejik malzemelerin geri kazanımı, hammadde ithalat bağımlılığını azaltır ve döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumludur (Corcelli vd., 2018).
- Enerji ve Karbon Tasarrufu: Geri dönüştürülmüş alüminyum ve camın kullanımı, birincil üretime kıyasla daha düşük enerji gereksinimi ve sera gazı emisyonları ile ilişkilendirilmektedir; bu durum fotovoltaik sistemlerin toplam karbon ayak izinin azalmasına katkı sağlamaktadır (Fthenakis vd.,2011).
- Artan Bilinç ve Farkındalık: Hem uluslararası kuruluşların (IRENA, IEA-PVPS) hem de hükümetlerin PV atıkları konusundaki raporları, kamuoyu ve sektör üzerinde farkındalık yaratmaktadır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Zayıf Yönler

- Mevzuat Eksikliği: Türkiye'de PV paneller için özel bir mevzuat bulunmamakta, yalnızca AEEE kapsamında değerlendirilmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2022).
- Yüksek Geri Dönüşüm Maliyetleri: Kimyasal ve termal yöntemler yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirmektedir (Cucchiella vd., 2015).
- Altyapı Yetersizliği: Birçok ülkede fotovoltaik panellere özgü geri dönüşüm altyapısının henüz yeterince gelişmemiş olması nedeniyle, PV atıkları çoğunlukla genel atık veya geri dönüşüm tesisleri üzerinden yönetilmektedir (Latunussa vd., 2016).
- İzleme ve Raporlama Eksikliği: Kullanım ömrünü tamamlayan panellerin miktarı ve akıbeti düzenli olarak kayıt altına alınmamaktadır (Sica vd.,2018).

Fırsatlar

- Ekonomik Katma Değer: 2050 yılına kadar küresel ölçekte PV panel atıklarının geri dönüşümünden 15 milyar doların üzerinde ekonomik değer yaratılması beklenmektedir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

- İstihdam Potansiyeli: Fotovoltaik panel geri dönüşüm faaliyetleri; toplama, ayrıştırma ve işleme aşamalarında emek yoğun süreçler içerdiğinden, döngüsel ekonomi kapsamında yeni istihdam alanları yaratma potansiyeline sahiptir (Sica vd., 2018).
- Teknolojik Gelişim: Yeni nesil geri dönüşüm yöntemleri panel bileşenlerinin daha yüksek saflıkta geri kazanılmasını sağlayacaktır (Tao vd.,2015).
- Yeşil Mutabakat ve Net Sıfır Politikalarıyla Uyum: PV panel geri dönüşümü, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Karbon hedefleriyle doğrudan uyum sağlamaktadır.

Tehditler

- Ağır Metal Kirliliği Riski: Özellikle kadmiyum içeren CdTe fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonunda kontrolsüz şekilde bertaraf edilmesi, toprak ve su kirliliği açısından potansiyel çevresel riskler oluşturmaktadır (Held & Ilg, 2011).
- Kontrolsüz E-Atık Transferi: Kullanım ömrünü tamamlamış veya ikinci el fotovoltaik panellerin farklı ülkelere yönlendirilmesi, izlenebilirlik ve düzenleyici denetim eksikliği nedeniyle çevresel ve sosyal riskler oluşturmaktadır (Sica vd., 2018).
- Yüksek Yatırım Riski: Geri dönüşüm tesislerine yönelik başlangıç maliyetlerinin yüksekliği, özel sektörün bu alana girmesini yavaşlatmaktadır (Komoto vd., 2018).
- Politik ve Hukuki Belirsizlikler: Uzun vadeli yasal çerçevelerin olmaması, sektör için yatırım riskini artırmaktadır (Latunussa vd.,2016).

4.11.1 Örnek Olay İncelemesi

4.11.1.1 Türkiye'de Pilot Bir Proje

PV panel atık yönetimi, birçok ülkede olduğu gibi gelişim aşamasında olup, geri dönüşüm altyapısının sınırlı olmasının temel nedenleri arasında mevzuat belirsizlikleri, pazarın görece genç olması, atık hacminin henüz ekonomik ölçek

oluşturacak düzeye ulaşmamış olması ve yüksek yatırım maliyetleri yer almaktadır (IRENA & IEA-PVPS. 2016)(Stolz vd., 2018).

Türkiye'de PV sistemlerin büyük çoğunluğu 2010 sonrasında devreye alınmış olup, bu sistemlerin ortalama ömrü 25-30 yıl arasında değişmektedir. Dolayısıyla, ilk nesil panellerin kullanım ömrü henüz dolmamış, ortaya çıkan atık miktarı sınırlı kalmıştır (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Bununla birlikte, Türkiye'de atık elektrikli ve elektronik eşyaların yönetimine ilişkin mevcut düzenlemelerde, fotovoltaik panellerin uygulamada ayrı bir atık kategorisi olarak açık biçimde tanımlanmaması, PV atıklarının izlenmesi ve yönetilmesinde belirsizliklere yol açmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Bütün bu etkenler, Türkiye'de henüz PV modül geri dönüşümüne özgü bir altyapının oluşmamasının temel nedenleri olarak değerlendirilmektedir. Ancak konuya ilişkin farkındalık giderek artmakta ve pilot düzeyde girişimler gündeme gelmektedir. Bu farkındalık artışı, özellikle Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, GENSED (Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği), TÜBİTAK ve bazı üniversitelerin yürüttüğü projeler aracılığıyla desteklenmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021)(GENSED, 2022).

Ayrıca, AB'nin döngüsel ekonomi ve atık yönetimi direktiflerine uyum süreci, Türkiye'de hem kamu kurumlarını hem de özel sektör paydaşlarını PV atıklarının yönetimi konusunda yeni stratejiler geliştirmeye yöneltmiştir (European Commission, 2021)(PV CYCLE, 2022).

Bu kapsamda dikkat çeken örneklerden biri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (GÜNAM) ve Ahiler Kalkınma Ajansı iş birliğinde yürütülmesi planlanan "fotovoltaik panel atıklarının teknik ve ekonomik fizibilitesinin incelenmesi" çalışmasıdır. Projenin temel amacı, 2030-2035 döneminde Türkiye'de ciddi miktarda ortaya çıkması beklenen PV atıklarının yönetimine yönelik teknik ve ekonomik bir yol haritası oluşturmaktır (Anadolu Ajansı, 2023). Özellikle, panel bileşenlerinin sökülmesi, taşınması, ayrıştırılması ve geri kazanımı süreçlerinin teknik açıdan uygulanabilirliği ile ekonomik fizibilitesi geri kazanım verimi, enerji tüketimi, işlem maliyeti, çevresel

etki ve malzeme kalitesi gibi temel kriterler üzerinden değerlendirilmektedir (Stolz vd., 2018).

Bu değerlendirmeler, IRENA ve IEA-PVPS tarafından geliştirilen LCA metodolojisi ve maliyet-fayda analizi (CBA) yaklaşımları esas alınarak yapılmaktadır. Her bir geri dönüşüm yöntemi (mekanik, termal, kimyasal) için; enerji girdisi, işlem süresi, elde edilen malzeme saflığı, yatırım maliyeti, geri kazanım oranı ve oluşan yan ürün miktarı ayrı ayrı incelenmektedir (IRENA & IEA-PVPS. 2016).

Projenin Güçlü Yönleri

- Akademik bilgi birikimi: ODTÜ GÜNAM'ın sektördeki uzmanlığı, çalışmanın bilimsel güvenilirliğini artırmaktadır.
- Farkındalık yaratma: Kamuoyunda PV atıklarının gelecekteki boyutu hakkında bilinç oluşmasına katkı sağlamaktadır.
- Vizyon: Proje, Türkiye'nin Net Sıfır 2053 hedefleriyle uyumlu olarak döngüsel ekonomi perspektifini desteklemektedir.

Projenin Zayıf Yönleri

Henüz saha uygulamasının bulunmaması, projenin sadece analiz düzeyinde kalması. Analiz kapsamında, örnek PV modüller üzerinde malzeme bileşimi (cam, EVA, alüminyum, silikon, bakır, gümüş vb.), geri kazanım oranı, enerji tüketimi ve geri dönüşüm maliyeti gibi veriler laboratuvar düzeyinde ölçülmüştür. Bu veriler daha sonra IRENA ve IEA-PVPS metodolojilerine göre LCA modeline entegre edilerek; geri dönüşüm sürecinin karbon ayak izi, enerji geri kazanım oranı ve ekonomik geri ödeme süresi gibi parametreler değerlendirilmiştir (IRENA, 2022)(IEA-PVPS, 2022).

Projenin Fırsatları

Türkiye'de PV panel geri dönüşümü için ilk model oluşturma potansiyeli. Yeni iş alanları ve istihdam yaratma imkânı. PV panel geri dönüşüm süreçlerinin sanayiye entegre edilmesi, doğrudan ve dolaylı olarak çeşitli yeni istihdam alanları

yaratma potansiyeline sahiptir (IRENA, 2022)(TÜBİTAK, 2023). Özellikle toplama-taşıma lojistiği, panel söküm ve ayrıştırma tesisleri, malzeme geri kazanım prosesleri, kimyasal ve termal arıtım sistemleri, atık yönetimi danışmanlığı, çevre mühendisliği laboratuvarları ve yeşil enerji teknolojileri Ar-Ge merkezleri gibi alanlarda nitelikli iş gücü ihtiyacı artacaktır.

PV panel geri dönüşüm faaliyetleri; toplama, ayrıştırma, işleme ve yönetim aşamalarında emek yoğun süreçler içerdiğinden, farklı niteliklerde iş gücü talebi yaratarak istihdama katkı sağlamaktadır (Sica vd., 2018). Ayrıca, panel onarımı, yeniden kullanımı ve ikinci el panel piyasasının oluşması, KOBİ düzeyinde yeni girişimcilik alanları yaratacak; bu da bölgesel kalkınma açısından önemli ekonomik katkılar sağlayacaktır. Böylece PV atık yönetimi, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda istihdam ve yeşil ekonomi açısından da stratejik bir fırsat alanı haline gelmektedir (IRENA, 2022).

PV panel geri dönüşümüne yönelik projeler, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat ve döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumlu sürdürülebilir enerji yatırımları kapsamında değerlendirilmekte; bu tür girişimler çevresel sürdürülebilirlik, inovasyon ve karbon azaltımı kriterleri doğrultusunda finansman ve yatırım fırsatları açısından öne çıkmaktadır (EIT InnoEnergy, 2023).

Projenin Tehditleri

Yasal düzenlemelerin gecikmesi; bu durumda projenin sürdürülebilirliğinin tehlikeye girmesi. Yasal düzenlemelerin gecikmesi durumunda, projenin sürdürülebilirliğini sağlamak için geçici olarak "kurumsal özdenetim, yerel pilot uygulamalar ve üniversite-sanayi işbirliği" temelli bir yönetim modeli devreye alınmalıdır. Bu yaklaşım, yasal çerçeve oluşana kadar hem sürecin teknik kapasitesini hem de paydaş koordinasyonunu koruyarak projenin uzun vadeli devamlılığını güvence altına alır. Mevzuat yürürlüğe girmeden önce, güneş enerjisi sektörü (üretici, ithalatçı, montaj firmaları, sivil toplum kuruluşları) kendi iç standartlarını belirleyebilir. Ulusal mevzuat çıkmadan önce belediyeler ve organize sanayi bölgeleri, pilot toplama-ayrıştırma sistemleri kurarak PV atıklarının kontrolsüz dağılmasını önleyebilir. Üniversiteler ve özel sektör arasında kurulacak iş birlikleriyle, "deneme ölçekli geri dönüşüm hatları" kurulabilir. Bu hatlar aynı

zamanda teknik personel yetiştirme, süreç optimizasyonu ve veri toplama açısından bir geçiş dönemi modeli oluşturur.

Yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle özel sektörün çekimser kalması. Her ne kadar Türkiye'de PV panel geri dönüşümüne yönelik yerli teknoloji geliştirme çalışmaları artmakta olsa da, bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bunun temel nedeni, geri dönüşüm hatlarının sadece makine ve ekipmandan ibaret olmaması; aynı zamanda çevresel izin süreçleri, kimyasal arıtım altyapısı, enerji tüketimi ve kalifiye personel maliyetlerini de içermesidir. Buna rağmen bu yatırımların yapılması gereklidir çünkü: yerli teknoloji geliştirme; ithalat bağımlılığını azaltarak uzun vadede maliyetleri düşürecektir. Geri dönüştürülen malzemelerin ekonomik değeri ve Net Sıfır 2053 hedefi doğrultusunda PV atık yönetimi. PV panel geri dönüşüm yatırımları yüksek ilk maliyetler nedeniyle kısa vadede özel sektör için riskli görünmektedir. Ancak uzun vadede yerli teknoloji geliştirilmesi, ithalat bağımlılığının azalması, karbon emisyonlarının düşürülmesi ve döngüsel ekonomi gelirlerinin artması, bu yatırımları stratejik olarak gerekli kılmaktadır. Özel sektörün çekimserliği bu nedenle geçici bir ekonomik temkinlilik olarak değerlendirilmelidir. Panel atıklarının lojistiği ve altyapı eksiklikleri nedeniyle süreçlerin verimsiz ilerleme riski. PV atıkları genellikle geniş coğrafi alanlara dağılmış küçük ölçekli santrallerden veya bireysel çatılardan kaynaklanmaktadır. Bu da toplama, taşıma ve geçici depolama süreçlerinde yüksek maliyet ve düşük verim sorununa yol açmaktadır. Türkiye'de lisanslı atık toplama merkezlerinin PV atıkları için özel olarak yapılandırılmamış olması ve panellerin hacimli-kırılgan yapısı nedeniyle taşımada özel ekipman gereksinimi, maliyetleri artırmaktadır. Ayrıca, panellerin "tehlikeli atık" sınıfına tam olarak girmemesi nedeniyle mevcut atık taşımacılığı yönetmelikleri PV modüllerine özgü bir prosedür sunmamaktadır. Bu da kurumsal belirsizlik ve izin süreçlerinde gecikme yaratmaktadır. Bölgesel düzenlemelerle lojistik sorunu kısmen giderilebilir; örneğin bölgesel PV atık toplama merkezleri kurulması, taşıma mesafelerini kısaltarak maliyetleri düşürebilir. Ancak bunun için yetkili kurum koordinasyonu, yerel lisanslama sistemi ve veri tabanlı atık izleme mekanizmasının oluşturulması gerekir. Yani bölgesel çözümler teknik olarak mümkün olsa da, mevcut yasal çerçeve ve altyapı eksikliği nedeniyle şu an için etkin biçimde uygulanabilir

durumda değildir. Dolayısıyla, lojistik zorluklar doğrudan "raporda ifade edilmiş" değil; ancak Türkiye'nin atık yönetimi sisteminin mevcut yapısı ve saha gerçekleri temelinde yapılan analitik bir öngörüdür. Bölgesel planlama yapılmadığı takdirde, bu riskin orta vadede sürdürülebilirliği olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmektedir.

Çevresel risklerin (ağır metallerin sızması vb.) yönetilememesi. PV panel geri dönüşüm sürecinde kullanılan kimyasal işlemler ve atık bileşenleri, uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel riskler doğurabilir. Özellikle Cd, Pb ve Se gibi ağır metallerin kontrolsüz sızıntısı, toprak ve su kirliliği açısından potansiyel tehdit oluşturur. Ancak bu durum, geri dönüşümün yapılmaması gerektiği anlamına gelmez; aksine, bu risklerin varlığı, geri dönüşümün profesyonel ve kontrollü koşullarda yapılmasının neden zorunlu olduğunu göstermektedir. Alternatif olarak, panellerin doğrudan depolama alanlarına gönderilmesi veya kırılarak atık yığınına karışması, çevreye çok daha büyük ve uzun vadeli bir risk yaratır. Yani, geri dönüşüm süreçleri "riskli" değil, riski yöneten çözümler olarak değerlendirilmelidir. Kısacası, çevresel riskler bu teknolojilerin "yapılmaması" için değil, "doğru yapılması" için bir gerekçedir. Bu nedenle, uygun denetim mekanizmaları ve çevresel yönetim planlarıyla birlikte yürütülen geri dönüşüm faaliyetleri, atıkların doğaya bırakılmasından çok daha güvenli ve sürdürülebilir bir seçenektir.

4.11.1.2 TÜBİTAK Destekli Akademik Çalışmalar

Türkiye'de PV panel atıkları üzerine henüz saha ölçeğinde tam anlamıyla uygulamaya geçmiş bir geri dönüşüm tesisi bulunmasa da, akademik literatürde yer alan ve TÜBİTAK tarafından desteklenen araştırmalar, bu alanda öncü niteliğinde pilot uygulamalar ortaya koymaktadır. Özellikle üniversite laboratuvarlarında yürütülen bu çalışmalar, PV panellerin bileşenlerinin ayrıştırılması ve geri kazanımı konularında önemli bulgular sağlamıştır.

Güçlü Yönler

- Üniversite ve araştırma merkezlerinde yapılan deneysel çalışmaların yöntem bilimi sağlamlığı.

- TÜBİTAK gibi ulusal bir kurum tarafından fonlanması, projelere güvenilirlik ve bilimsel destek kazandırmaktadır.
- Çalışmaların bulguları, Türkiye'de henüz oluşmamış geri dönüşüm altyapısına yönelik yol gösterici niteliktedir.

Zayıf Yönler

- Çalışmalar laboratuvar ölçeğinde kalmakta, endüstriyel ölçeğe taşınamamaktadır.
- Ekonomik fizibilite analizleri sınırlı olup, maliyet-fayda dengesine ilişkin kapsamlı saha verileri bulunmamaktadır.
- Geri kazanım süreçlerinde kullanılan kimyasal yöntemlerin çevresel etkilerine dair sınırlı veri vardır.

Fırsatlar

- Bu akademik araştırmalar, Türkiye'de gelecekte kurulacak PV atık geri dönüşüm tesisleri için teknik temel sağlayabilir.
- Üniversite-sanayi iş birliği ile deneysel çalışmaların uygulamaya dönüştürülmesi mümkündür.
- Uluslararası fonlar ile desteklenerek daha geniş kapsamlı projelere dönüştürülebilir.

Tehditler

- Akademik çıktılar sanayiye aktarılmazsa "teorik bilgi" düzeyinde kalma riski vardır.
- Mevzuat eksiklikleri nedeniyle geliştirilen yöntemlerin uygulamaya geçirilmesi gecikebilir.
- Yüksek yatırım maliyetleri, sanayinin bu alana girmesini yavaşlatabilir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışma, PV panellerin kullanım ömrü sonrasındaki atık yönetimi süreçlerini çevresel, ekonomik ve politik boyutlarıyla inceleyerek Türkiye açısından kapsamlı bir değerlendirme sunmuştur. Güneş enerjisi sistemleri sürdürülebilir kalkınmanın temel unsurlarından biri haline gelirken, bu teknolojilerin kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan atıkların yönetimi de giderek daha kritik bir konu haline gelmektedir.

Elde edilen bulgular, PV panel atıklarında bulunan cam, alüminyum ve silikon gibi malzemelerin geri kazanımının yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimini ve çevresel yükleri azalttığını; bu durumun kaynak verimliliği ve dolaylı ekonomik faydalar açısından önemli olduğunu göstermektedir (Fthenakis vd., 2020). Bununla birlikte, Türkiye'de PV panel atık yönetimine ilişkin spesifik bir mevzuatın bulunmaması, geri dönüşüm altyapısının sınırlı olması ve üretici sorumluluğu çerçevesinin belirsizliği gibi yapısal eksiklikler devam etmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

Bu nedenle, Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde fotovoltaik teknolojilerin sürdürülebilirliğini sağlamak için yalnızca yenilenebilir enerji üretimine değil, aynı zamanda bu teknolojilerin ömür sonu yönetimine de odaklanması gerekmektedir.

5.1 Bulguların Önemi ve Literatüre Katkı

Tez kapsamında yapılan analizler, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında Türkiye'nin PV panel atıkları açısından erken uyarı döneminde bulunduğunu göstermektedir. Avrupa Birliği ülkeleri, PV CYCLE gibi uygulamalarla üretici sorumluluğu esasına dayalı atık yönetim sistemlerini 2010'lu yılların başında kurarken; Türkiye henüz mevzuat hazırlığı aşamasındadır (Koçkaya, 2025).

Bu çalışma, PV atık yönetimi alanında Türkiye özelinde yapılan sınırlı sayıdaki akademik katkılardan biridir. Özellikle konan analizlerle;

- PV atıklarının çevresel risklerinin (ağır metal sızıntısı, toprak ve su kirliliği vb.) boyutu,

- Geri dönüşüm teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirliği,
- EPR modelinin Türkiye'deki potansiyeli, literatüre özgün katkı sağlamaktadır.

Ayrıca önceki bölümde incelenen iki örnek olay (ODTÜ GÜNAM + Ahiler KAJ ve TÜBİTAK destekli akademik projeler), Türkiye'deki gelişme potansiyelinin yüksek olduğunu ve kamu-akademi iş birliğinin bu alanda güçlü bir temel oluşturabileceğini göstermiştir.

5.2 Politika ve Uygulama Önerileri

Türkiye'de PV panel atık yönetimi sisteminin geliştirilmesi için hem kurumsal hem de teknik düzeyde bir dizi önlemin alınması gerekmektedir:

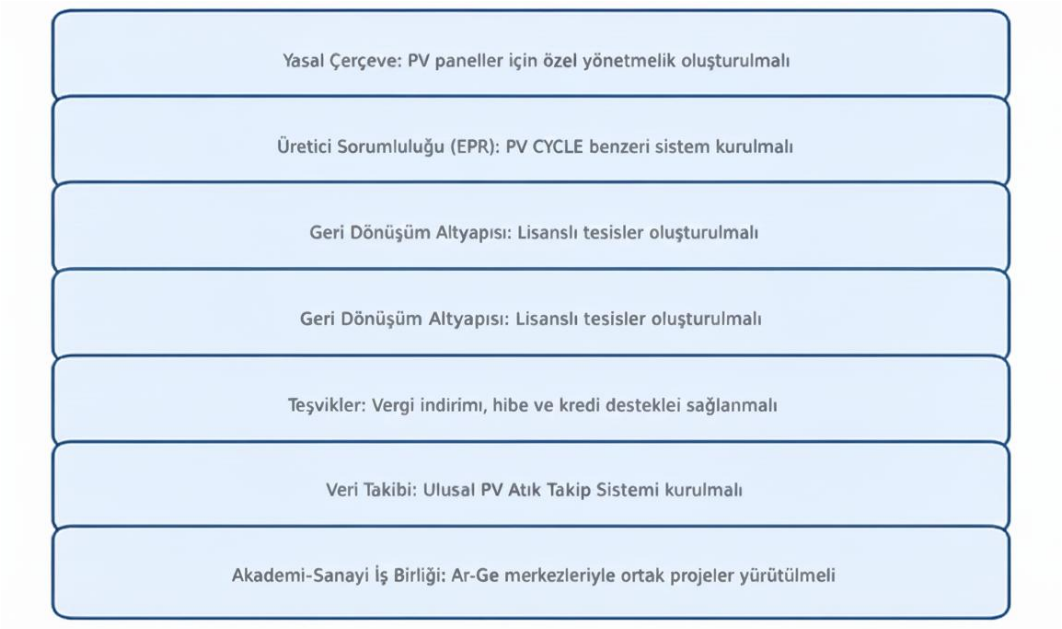
1. **Yasal Çerçevenin Oluşturulması:** PV panellerin, "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE)" mevzuatından ayrılarak ayrı bir düzenlemeyle ele alınması gerekmektedir. Bu, panel üreticileri, ithalatçıları ve kullanıcılarının sorumluluklarını netleştirecektir (European Commission, 2020).
2. **EPR:** Avrupa'daki PV CYCLE modeline benzer biçimde, Türkiye'de de üreticilerin atık toplama ve geri dönüşüm maliyetlerinden sorumlu olduğu bir sistem kurulmalıdır.
3. **Geri Dönüşüm Altyapısının Güçlendirilmesi:** Lisanslı PV atık geri dönüşüm tesislerinin kurulması, hem çevre koruma hem de istihdam açısından önem taşımaktadır. Bu tesislerde mekanik, termal ve kimyasal yöntemlerin bir arada kullanıldığı hibrit teknolojiler tercih edilmelidir.
4. **Teşvik ve Finansman Destekleri:** PV geri dönüşüm yatırımlarına KOSGEB, TÜBİTAK ve Kalkınma Ajansları tarafından vergi indirimi, hibe ve kredi desteği sağlanmalıdır.
5. **Veri İzleme ve Raporlama Sistemi:** Kullanım ömrü dolan PV panellerin kayıt altına alınması için bir ulusal PV Atık Takip Sistemi kurulmalı, bu veriler düzenli olarak kamuoyuyla paylaşılmalıdır.
6. **Eğitim ve Farkındalık:** Güneş enerjisi sektöründe çalışan mühendis, teknisyen ve yatırımcılar için atık yönetimi konusunda eğitim programları düzenlenmelidir.

7. **Akademi-Sanayi İş Birliği:** Üniversitelerde geliştirilen geri dönüşüm yöntemlerinin sanayiye aktarılması için Ar-Ge merkezleri ve özel sektör ortaklıkları teşvik edilmelidir.

5.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu araştırma, Türkiye'de PV panel atık yönetimi konusunda ilerleyen yıllarda yapılacak çalışmalar için önemli bir temel sunmaktadır. Ancak daha kapsamlı ilerlemeler için:

- Kullanım ömrünü tamamlayan panellerin LCA kapsamında detaylı karbon ayak izi çalışmaları yapılmalıdır.
- Geri dönüşüm sürecinde ortaya çıkan ikincil atıkların çevresel etkileri de ayrıca değerlendirilmelidir.
- Türkiye'nin farklı bölgelerindeki güneş enerjisi potansiyeline göre bölgesel atık yönetimi planları hazırlanmalıdır.
- Ekonomik açıdan, geri dönüşüm tesislerinin kurulabilirliği için maliyet-fayda analizleri genişletilmelidir.
- Son olarak, PV atık yönetiminde dijital teknolojilerin kullanılabilirliği araştırılmalıdır.



Şekil 5.1 .Türkiye'de PV panel atık yönetimi sisteminin geliştirilmesi için öneriler

Şekil 5.1, mevcut durum analizi ve uluslararası örnek uygulamalardan elde edilen sonuçlara dayanarak, Türkiye'nin fotovoltaik panel atık yönetimi sistemini güçlendirmeye yönelik önerilen yapısal adımları göstermektedir. Şemada öneriler; mevzuat altyapısı, kurumsal sorumluluk, geri dönüşüm altyapısı, ekonomik teşvikler ve farkındalık artırma başlıkları altında beş temel eksende toplanmıştır.

İlk olarak, Türkiye'de PV atıklarının yönetimi için mevzuatın WEEE Direktifi ile uyumlu hale getirilmesi ve PV panellerin "elektrikli-elektronik atık" sınıfına açık biçimde dahil edilmesi önerilmektedir. Bu adım, EPR modelinin yasal zeminini oluşturacaktır.

İkinci olarak, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda, üretici birlikleri, geri dönüşüm firmaları ve enerji sektörü temsilcilerinden oluşan bir ulusal PV atık yönetim platformu kurulması önerilmektedir. Bu yapı, toplama, izleme ve raporlama süreçlerinin etkin yürütülmesini sağlayacaktır.

Üçüncü adımda, lisanslı PV geri dönüşüm tesislerinin kurulması ve bu tesislere yönelik yatırım teşvikleri, vergi indirimleri ve Ar-Ge destekleri sağlanması öngörülmektedir. Ayrıca, panel yeniden kullanımını teşvik etmek amacıyla "ikincil kullanım sertifikasyonu" sisteminin geliştirilmesi önerilmektedir.

Dördüncü olarak, yerel yönetimler ve enerji kooperatiflerinin sürece dâhil edilmesi; atık toplama ve yeniden değerlendirme süreçlerinin yerel ölçekte yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Son olarak**,** kamu bilinci ve farkındalığının artırılması, PV atıklarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesi için en temel destekleyici unsur olarak görülmektedir (IRENA,2016).

Bu şekil, Türkiye'nin PV panel atık yönetiminde "reaktif" bir yaklaşımdan "proaktif" ve "entegratif" bir modele geçişini temsil etmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışma, fotovoltaik panellerin kullanım ömrü sonrasında ortaya çıkan atıkların çevresel, ekonomik ve politik boyutlarıyla ele alınarak, Türkiye'de sürdürülebilir bir atık yönetimi sisteminin gerekliliğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, güneş enerjisi teknolojilerinin yalnızca enerji üretiminde değil, yaşam döngüsünün her aşamasında çevresel sorumlulukla yönetilmesi gerektiğini göstermektedir.

Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşabilmesi için, fotovoltaik atıkların doğru şekilde yönetilmesi; yasal düzenlemeler, üretici sorumluluğu, altyapı yatırımları ve toplum bilincinin birlikte geliştirilmesiyle mümkündür. Bu kapsamda, çalışmada sunulan analizler ve politika önerileri, gelecekte PV atık yönetimi konusunda hem kamu hem özel sektör için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Ayrıca, bu araştırma Türkiye'de henüz sınırlı sayıda çalışılan bir alana katkı sunarak, akademik literatürde fotovoltaik panel atıkları üzerine yapılan araştırmalara temel oluşturmayı amaçlamaktadır. Güneş enerjisinin "ışığın ardından" bıraktığı izleri anlamak, yalnızca çevre politikalarının değil, aynı zamanda insanlığın sürdürülebilir geleceğinin de bir parçasıdır.

KAYNAKLAR

Anadolu Ajansı (AA). (2023). *Türkiye'de 2030–2035'te yüksek miktarda güneş paneli atığı bekleniyor*.

Belançon, M. P., Sandrini, M., Tonholi, F., Herculano, L. S., & Dias, G. S. (2022). Towards long term sustainability of c-Si solar panels: The environmental benefits of glass sheet recovery. *Renewable Energy Focus*, *42*, 206-210.

Celep, O., Deveci, H., & Yazici, E. Y. (2025). A comprehensive review on recycling end of life solar photovoltaic panels. *Waste Management*, *206*, 115092.

Chen, P. H., Chen, W. S., Lee, C. H., & Wu, J. Y. (2024). Comprehensive review of crystalline silicon solar panel recycling: from historical context to advanced techniques. *Sustainability*, *16*(1), 60.

Chhillar, I., Sandhu, S., Parida, S., & Majewski, P. (2025). Certification for Solar Panel Reuse: A Systematic Review of Cross-Sector Practices and Gaps. *Sustainability*, *17*(13), 5995.

Choi, J. K., & Fthenakis, V. (2010). *Design and optimization of photovoltaic recycling infrastructure*. Environmental Science & Technology, 44(22), 8678–8683.

Corcelli, F., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). *End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels*. Renewable Energy, 128, 663–674.

Cucchiella, F., & Rosa, P. (2015). End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 552-561.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2012). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar Yönetmeliği Taslak Raporu*. Ankara.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar Yönetmeliği*. Resmî Gazete, 12 Mart 2023.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2024–2028)*. Ankara.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. *ÇED Yönetmeliği*, Resmî Gazete No: 31907, 29.07.2022.

Daljit Singh, J. K., Molinari, G., Bui, J., Soltani, B., Rajarathnam, G. P., & Abbas, A. (2021). Life cycle assessment of disposed and recycled end-of-life photovoltaic panels in Australia. *Sustainability*, *13*(19), 11025.

Das, H. J., & Sarmah, N. (2025). Photovoltaic module Recycling: A review on material recovery methods and waste management approach. *Solar Energy*, *299*, 113708.

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *109*, 532-550.

Dias, P. R., Benevit, M. G., & Veit, H. M. (2016). Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. *Waste Management & Research*, *34*(3), 235-245.

Dias, P. R., Benevit, M. G., & Veit, H. M. (2016). *Recycling WEEE: Characterization of spent PV modules and strategies to recover valuable materials*. Waste Management, 51, 245–251.

Divya, A., Adish, T., Kaustubh, P., & Zade, P. S. (2023). Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *253*, 112151.

EIT InnoEnergy. (2023). *Sustainable energy innovations and investment opportunities in PV recycling*. Brussels: EIT InnoEnergy.

Enerji Bakanlığı (ETKB). *Yenilenebilir Enerji Yatırım Süreçleri Rehberi*. ETKB Yayınları, 2023.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2023). *Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği*. Ankara.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). *Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği*. Resmî Gazete No: 29098, 02.11.2014.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). *Türkiye Güneş Enerjisi Sektör Raporu 2023*. Ankara.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). *Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2023–2030*. Ankara: ETKB.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024). *Türkiye Güneş Enerjisi Sektör Raporu. Ankara*: ETKB Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024). *Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinde Yerlileşme Strateji Belgesi 2024–2030*. Ankara: ETKB Yayını.

EPDK,*GENSED*.2022

EPDK. *Elektrik Piyasası Üretim Lisansı İçin Teknik ve Mali Yeterlilik Kılavuzu*. 2022.

EPDK. *Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği*. Resmî Gazete No: 31462, 12.03.2021.

European Commission. (2020). *Extended producer responsibility and circular economy models*. Brussels: Publications Office of the European Union.

European Commission. (2021). *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive 2012/19/EU* – Implementation and Review Report. Brussels.

European Commission. (2021). *Türkiye 2021 Raporu (Turkey 2021 Report)*. Brussels.

European Commission. (2012). *Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Official Journal of the European Union.

European Parliament. (2012). *Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Official Journal of the European Union

EPIA (2012). Connecting the Sun. Solar Photovoltaics on the Road to Large-Scale Grid Integration. *Brussels, Belgium*.

EPIA (2019). *PV waste management in Europe*. Brussels: EPIA.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2020). *Photovoltaics report*. Fraunhofer ISE.

Fthenakis, V. M. (2004). Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8*(4), 303-334.

Fthenakis, V. (2009). Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(9), 2746-2750.

Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, *85*(8), 1609-1628.

Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2012). *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. Solar Energy, 86(10), 2697–2706.

Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2020). *Photovoltaic life-cycle assessments*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(5), 439–449.

Gerold, E., & Antrekowitsch, H. (2024). Advancements and challenges in photovoltaic cell recycling: A comprehensive review. *Sustainability*, *16*(6), 2542.

Granata, G., Altimari, P., Pagnanelli, F., & De Greef, J. (2022). Recycling of solar photovoltaic panels: Techno-economic assessment in waste management perspective. *Journal of Cleaner Production*, *363*, 132384.

Green, M. A. (2021). Photovoltaic technology overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *29*(7), 1–14.

Green, M. A. (2020). *Solar cells: Operating principles, technology and system applications*. UNSW Photovoltaics.

Güven, G., & Bilhan, A. (2024). Güneş panellerinin üretim ve kurulum süreçlerinde verimliliği belirleyen faktörlerin analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *13*(4), 1-1.

Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2019). An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *Journal of hazardous materials*, *380*, 120887.

Held, M., & Ilg, R. (2011). Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe. *Progress in photovoltaics: research and applications*, *19*(5), 614-626.

IEA PVPS. (2023). *Trends in Photovoltaic Applications*: 2023 Edition. Paris: International Energy Agency.

IEA. *Solar Energy Market Update*,2023.

IEA-PVPS. (2022). Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems: Methodological Guidelines. Paris: IEA Publications.

IEA. (2021). Trends in Photovoltaic Applications. IEA-PVPS.

IEA-PVPS. (2023). Snapshot of Global PV Markets. Paris.

IEA (2011). *Renewable energy country profile: Turkey*. Paris: IEA.

IEA. (2023). Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028. Paris: OECD/IEA.

IEA-PVPS. (2022). Status of PV Module Recycling in Selected Countries. Paris: IEA PVPS.

IRENA. (2020). Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-economic Aspects. Abu Dhabi: IRENA.

IRENA. (2023). Renewable Capacity Statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA Publications.

IRENA & IEA-PVPS (2018)

IRENA. (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. Abu Dhabi: IRENA.

IRENA, 2020

IRENA. (2023). End-of-Life Management of Solar PV Panels: Technology Review. Abu Dhabi: IRENA Publications.

Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). *Photovoltaic degradation rates—An analytical review*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21(1), 12–29.

Kittel, C. (2005). *Introduction to solid state physics* (8th ed.). Wiley.

Koçkaya, K. (2025). Estimation of Türkiye's Solar Panel Waste Using Artificial Neural Networks (ANNs): A Comparative Analysis of ANNs and Multiple Regression Analysis. *Sustainability*, *17*(9), 4085.

Komoto, K., Lee, J., Zhang, J., & Ravikumar, D. (2018). *End-of-life management of PV modules*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26(5), 332–347.

Kwon, S., Kim, H. J., Kim, S., & Hong, S. J. (2025). Sustainability Impact Evaluation of the Recycling of End-of-Life Crystalline Silicon Solar Photovoltaic Panel Waste in South Korea. *Sustainability*, *17*(2), 431.

Latunussa, C., Mancını, L., Blengını, G., Ardente, F., & Pennıngton, D. (2016). Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels.

Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mathieux, F. (2016). *Recycling of solar panels: Analysis of potential and challenges*. Joint Research Centre, European Commission.

Li, F., Shaw, S., Libby, C., Preciado, N., Bicer, B., & Tamizhmani, G. (2024). A review of toxicity assessment procedures of solar photovoltaic modules. *Waste Management*, *174*, 646-665.

Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.

Mulazzani, A., Eleftheriadis, P., & Leva, S. (2022). Recycling c-Si PV modules: A review, a proposed energy model and a manufacturing comparison. *Energies*, *15*(22), 8419.

Ndiaye, A., Kébé, C. M., Charki, A., Ndiaye, P. A., Sambou, V., & Kobi, A. (2014). Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment. *Solar energy*, *103*, 70-77.

OECD. (2023). Net Zero and Circular Economy: Integrating Resource Efficiency into Climate Strategies. Paris: OECD Publishing.

Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 99-112.

Philipps, S., & Warmuth, W. (2018). Photovoltaics Report Fraunhofer ISE. *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg im Breisgau, Germany. Accessed: Sep*, *15*.

PV CYCLE (2022). Annual Report 2022.

PV CYCLE. (2023). Annual Report 2022. Brussels: PV CYCLE Association.

REN21. (2023). Renewables 2023 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.

Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. C. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 2934-2945.

Stolz, P.; Frischknecht, R.; Wambach, K.; Sinha, P.; Heath, G. (2018). Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling (IEA-PVPS T12-13).

Stolz, P., Frischknecht, R., Wambach, K., Sinha, P., & Heath, G. (2016). Life cycle assessment of photovoltaic module recycling. *Uster, CH: treeze Ltd*.

Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). LEDs and lasers. *Physics of semiconductor devices*, *3*, 601-657.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği*. Resmî Gazete (14/03/2021-31425).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar Yönetmeliği*. Resmî Gazete (14/05/2022-31835).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *AEEE Yönetmeliği ve Yenilenebilir Enerji Mevzuatı Taslağı*.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2012). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği*. Resmî Gazete, 22 Mayıs 2012.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). *Türkiye Ulusal Enerji Planı (2023–2035)*. Ankara: ETKB Yayınları.

Tan, Y. D., Lim, J. S., Andiappan, V., & Alwi, S. R. W. (2021). Cooperative game-based anchor process allocation within sustainable palm oil based complex for environment-food-energy-water nexus evaluation. *Journal of Cleaner Production, 314*, 127927.

Tao, J., & Yu, S. (2015). Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 141*, 108–124.

Tasnim, S. S., Rahman, M. M., Hasan, M. M., Shammi, M., & Tareq, S. M. (2022). Current challenges and future perspectives of solar-PV cell waste in Bangladesh. *Heliyon, 8*(2).

TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.). *Üretim Tesisleri İçin Bağlantı Başvuru Kılavuzu*. TEİAŞ Teknik Doküman Serisi, 2022.

TEİAŞ. (2023). *Elektrik Üretim Kapasite Raporu*. Ankara.

TEİAŞ. (2024). *Türkiye Elektrik İstatistikleri Raporu*.Ankara

TEİAŞ. Elektrik İletim Sistemi Bağlantı "Teknik Görüş" Prosedürü. 2023.

TÜBİTAK MAM. (2023). Türkiye'de Güneş Enerjisi Geri Dönüşüm Ekosisteminin Ekonomik Etki Analizi. Gebze: Marmara Araştırma Merkezi Yayını.

Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM). (2021). Paris Anlaşması'nın Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun (7335 Sayılı Kanun). Resmî Gazete, 7 Ekim 2021.

USEPA United States Environmental Protection Agency. (2022). *Solar panel waste and recycling overview*.

Vinayagamoorthi, R., Bhargav, P. B., Ahmed, N., Balaji, C., Aravinth, K., Krishnan, A., ... & Ramasamy, P. (2024). Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(1), 111715.Journal of Environmental Chemical Engineering,2024

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). *End of life management: solar photovoltaic panels* (No. NREL/TP-6A20-73852; T12-06: 2016). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).

Wei, G., Zhou, Y., Hou, Z., Li, Y., Liu, Q., Chen, J., & He, D. (2025). Review of c-Si PV module recycling and industrial feasibility. *EES Solar*.

World Bank Group. (2022). Global Solar Atlas: Average Annual Global Horizontal Irradiation (GHI). Washington, D.C.

World Health Organization. (2010). *Childhood lead poisoning*. Geneva: WHO.

Zhang, L., & Xu, Z. (2016). *Towards minimization of cadmium hazard in end-of-life CdTe solar cells*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 639–652.

Zhao, W., Liu, X., & Xu, Y. (2022). *Policy evolution and implementation of PV waste management in leading countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112191.

Zhong, X., et al. (2021). *Status and challenges of photovoltaic panel recycling in China*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110152.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emre FİDAN

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Makine Mühendisliği

Yabancı Diller : İngilizce