ODTÜ GÜNAM
CENTER FOR SOLAR ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS

www.odtugunam.org

T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

#YEREL KALKINMA HAMLESİ

AHİLER Kalkınma Ajansı
Geleceğe Yön Verir

T.C.

AHİLER KALKINMA AJANSI

FOTOVOLTAİK PANELLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ FİZİBİLİTESİ

ODTÜ GÜNAM

19 Şubat 2025

0 312 210 76 77
info@odtugunam.org
Üniversiteler Mah., Dumlupınar Bulvarı, No. 1, 06800
Çankaya, Ankara / TÜRKİYE

FOTOVOLTAİK PANELLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ FİZİBİLİTESİ

Ahiler Kalkınma Ajansı

Adres: Cevher Dudayev Mahallesi Vatan Caddesi No:1 Merkez/Nevşehir
Tel: +90 384 214 36 66
Faks: +90 384 214 00 46
E-Posta: info@ahika.gov.tr
İnternet Sitesi: www.ahika.gov.tr

Sayfa Sayısı: 125
Yayın Tarihi: 15.04.2025
Yayın Yeri: Nevşehir, Türkiye
Doküman Numarası: 10.5281/zenodo.23800503

FOTOVOLTAİK PANELLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ FİZİBİLİTESİ

https://www.ahika.gov.tr/assets/upload/dosyalar/fv-panelleri-geri-donusumu-fizibilitesi.pdf

Yayın Sahibi
Ahiler Kalkınma Ajansı

Hazırlayan Kuruluş
ODTÜ-GÜNAM Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi
Üniversiteler Mah. Dumlupınar Bulv. No: 1 Çankaya Ankara
+90 312 210 7677
www.odtugunam.org
info@odtugunam.org

Hazırlayan
Tayfun HIZ – Uzman Araştırmacı

Tüm hakları saklıdır. Bu eserin tamamı ya da bir bölümü, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu uyarınca kullanılmadan önce hak sahibinden 52. Maddeye uygun yazılı izin alınmadıkça, hiçbir şekilde ve yöntemle işlenmek, çoğaltılmak, çoğaltılmış nüshaları yayılmak, satılmak, kiralanmak, ödünç verilmek, temsil edilmek, sunulmak, telli/telsiz ya da başka teknik, sayısal ve/veya elektronik yöntemlerle iletilmek suretiyle kullanılamaz. Hazırlanmış olan çalışmanın tüm hakları Ahiler Kalkınma Ajansı'na aittir. Ahiler Kalkınma Ajansı tarafından hazırlatılan işbu çalışmadan kaynak gösterilmek suretiyle alıntı yapılabilir

İÇİNDEKİLER

1 Giriş 19

2 TR71 Bölgesi Genel Tanıtımı 21

3 Güneş Enerjisi Teknolojileri ve Uygulamaları 24

3.1 FV Teknolojiler 24

3.2 FV Uygulamaları 29

4 Türkiye'de ve TR71 Bölgesinde Güneş Enerjisi Faaliyetleri 31

4.1 Türkiye'de Güneş Enerjisi 31

4.2 TR71 Bölgesinde Güneş Enerjisi 34

5 FV Panel Atık Miktarları 40

5.1 ÖT FV Panellerin Ömrünü Tamamlama Süresi 40

5.2 Dünyada ÖT FV Panel Atık Öngörüsü 40

5.3 Türkiye'de ÖT FV Panel Atık Öngörüsü 42

6 Sürdürülebilirlik ve Çevre Perspektifinden ÖT FV Paneller 44

6.1 ÖT FV Panellerin Çevresel Etkileri 44

6.2 Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sınırda Karbon Düzenlemesi 46

6.3 Döngüsel Ekonomi ve ÖT FV Panel Yönetimi 48

7 FV Panel Geri Dönüşüm Teknolojileri 51

7.1 Katmanlara Ayırma Öncesi İşlemler 53

7.2 Katmanlara Ayırma Teknikleri 55

7.3 Kırılmamış FV Hücrelerden Dilim Elde Edilmesi 62

7.4 FV Panel Geri Dönüşümü Patent Çalışmaları 63

8 FV Panel Geri Dönüşüm Karşılaşılan Zorluklar 67

9 Çeşitli Ülkelerde ÖT FV Panel Geri Dönüşüm İşletmeleri ve Girişimleri 70

9.1 FV Panel Atığı Toplayan ve İşleyen Firmalar 70

9.2 FV Panel Geri Dönüşüm Makinesi Üreticileri 72

9.3 PV Cycle Derneği 73

9.4 SOREN Derneği 74

10 Dünyada ve Türkiye'de Sektörel Mevzuat 75

10.1 Amerika Birleşik Devletleri 76

10.2 Çin Halk Cumhuriyeti 77

10.3 Japonya 78

10.4 Güney Kore 79

10.5 Avrupa Birliği ve Üye Ülkeler 79

10.6 Türkiye'de FV Atık Yönetimi 81

11 ÖT FV Panel Geri Dönüşüm Tesisi Fizibilitesi 86

11.1 Geri Dönüşüm Tesisi Öncül Kararlar 86
11.2 FV Panel Geri Dönüşümü İş Modeli 89
11.3 İş Modeli Ekonomik Değerlendirmesi 105
11.4 İş Modeli Risk Değerlendirmesi 113
12 Sonuç 120

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Malzeme Gruplarına Göre FV Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması 25
Şekil 2: k-Si FV Güneş Panelinin Yapısı 26
Şekil 3: FV Değer Zincirinde Döngüsel Ekonomi İlkelerinin Uygulanması 50
Şekil 4: k-Si FV Panellerin Geri Dönüşüm Süreç Alternatifleri 52
Şekil 5: ÖT FV Panel Geri Dönüşüm Teknolojileri Akış Diyagramı 55
Şekil 6: Panel Camının Kesici Bıçak ile Ayrılması 57
Şekil 7: ÖT FV Panel Geri Dönüşüm İşletmesi İş Modeli 90
Şekil 8: Risk Derecelendirme Matrisi 116

RESİM LİSTESİ

Resim 1: k-Si FV Hücre Üretim Süreci 26
Resim 2: Bir FV Panel ve Geri Dönüştürme Sonrası Elde Edilen Malzemeler 51
Resim 3: Çerçevenin Mekanik Olarak Sökülmesi 53
Resim 4: a. Çerçeve ve Bağlantı Kutusu Sökülmüş FV Panel; b. Camı Kırılmış FV Panel 53
Resim 5: Çerçeve ve Bağlantı Kutusu Sökülmüş FV Paneller 54
Resim 6: FV Panelin Öğütülmesi ve Öğütme Sonucu Elde Edilen Malzeme 55
Resim 7: Mekanik Öğütme ve Eleme İşlemlerinden Çıkan Toz Malzeme 56
Resim 8: İki Rotorlu Kesme Gerilimli Mekanik Öğütücü 57
Resim 9: (a) Camın Kesici Bıçak ile Panelden Ayrılması ve (b) Sonrasında Panelin Kalan Kısmı 58

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 1: Silisyum Fotovoltaik Panellerde Bulunan Malzemeler 28
Grafik 2: FV Uygulamalarının Pazar Payına Göre Dağılımı 29
Grafik 3: 2023 Yılı İtibarıyla İller Bazında Lisanssız Elektrik Üretim Kurulu Güçleri 33
Grafik 4: Türkiye İklim Sınıflandırması 34
Grafik 5: GEPA Verilerine Göre TR71 İllerinde Güneş Enerjisi Potansiyeli 35
Grafik 6: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Ortalama Global Radyasyon Grafiği 36
Grafik 7: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Günlük Ortalama Güneşlenme Süresi Grafiği 37
Grafik 8: Kurulu Güç Bazında GES'lerin Dağılımı 38
Grafik 9: Küresel FV Panel Atıkları 2050 Projeksiyonu 41
Grafik 10: ÖT FV Paneller İçin Katı Atık Depolama ve Geri Dönüşüm Senaryoları YDA Sonuçları 46
Grafik 11: Ömür Döngüsü Aşamalarının Toplam Ömür Döngüsü Etkilerine Katkı Analizi 46
Grafik 12: Geri Dönüşüm Patent Başvurularının FV Teknolojisi Bazında Dağılımı 66
Grafik 13: FV Panel Geri Dönüşüm Patent Sahiplerinin Ülkeler Bazında Dağılımı 66
Grafik 14: PV Cycle Tarafından 2011-2023 Arasında Toplanan Atıkların Miktarı 74
Grafik 15: 2023 Yılında Ülkeler Bazında FV Kurulu Gücü (GW) 76
Grafik 16: 2023 Yılında Ülkeler Bazında Elektronik Atık İthalatı 76

TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Yönetici Özeti – Engeller ve Zorluklar 13
Tablo 2: Yönetici Özeti – ÖT FV Panel İçeriğindeki Malzemelerin Değeri 15
Tablo 3: Yönetici Özeti – Sabit Yatırım Özeti 15
Tablo 4: Yönetici Özeti – Tam Kapasite İşletimde Yıllık Gider ve Gelirler 16
Tablo 5: Yönetici Özeti – Net Nakit Akımı 16
Tablo 6: Yönetici Özeti – Finansal Değerlendirme Özeti 17
Tablo 7: Yönetici Özeti – Atık Alım Katsayısı Duyarlılık Analizi 17
Tablo 8: Tipik Bir k-Si FV Panelin Bileşenlerinin Oranı ve Değeri 27
Tablo 9: Türkiye Ulusal Enerji Planı'na Göre Güneş Enerjisinin Elektrik Enerji Arzındaki Yeri 31
Tablo 10: TR71 Bölgesinde Aylar Bazında Ortalama Global Radyasyon (kilovat-saat/m^2-gün) 35
Tablo 11: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Günlük Ortalama Güneşlenme Süresi Verileri (Saat) 36
Tablo 12: TR71 Bölgesi Lisanssız GES Verileri 38
Tablo 13: YDA Çevresel Etki Kategorileri 45
Tablo 14: Yayımlanmış Piroliz Uygulamaları (Yan vd. 2023) 60
Tablo 15: Yayımlanmış Çözücü Uygulamaları (Yan vd. 2023) 61
Tablo 16: Si Dilim Elde Edilmesi İçin FV Hücreye Uygulanan Yöntemler 63
Tablo 17: 2024 Yılı İlk Altı Ayında Yayımlanan FV Panel Geri Dönüşüm Patentleri 64
Tablo 18: ÖT FV Panellerin Yönetimi Önündeki Engel ve Zorluklar 69
Tablo 19: FV Atık İşleme Alanında Çalışan Firma ve Kuruluşlar 70
Tablo 20: FV Panel Geri Dönüşüm Makineleri Üreten Firmalar 72
Tablo 21: Atık Akış Öngörüsü 106
Tablo 22: FV Panel Atık Değeri 106
Tablo 23: Tahmini Sabit Yatırım Maliyeti Tablosu 107
Tablo 24: Yıllık İşletme Giderleri 108
Tablo 25: Lojistik ve Taşıma Maliyeti Hesabı 108
Tablo 26: Sabit ve Değişken Yıllık İşletme Giderleri 109
Tablo 27: İşletme Sermayesi 109
Tablo 28: Yıllık Amortisman Tutarları 109
Tablo 29: Kurulu Kapasite için Yıllık Gelir ve Giderler 110
Tablo 30: Proforma Gelirler ve Giderler 110
Tablo 31: Yıllık Nakit Giriş Çıkış Dengesi 110
Tablo 32: İşletmenin Net Nakit Akımı 111
Tablo 33: Net Bugünkü Değer ve İç Karlılık Oranı 111
Tablo 34: Katma Değer Etkisi 112
Tablo 35: Finansal Analiz Özeti 112
Tablo 36: Atık Alım Katsayısı Duyarlılık Analizi 113
Tablo 37: Atık Alım Katsayısı – Devlet Teşviği Duyarlılık Analizi 113
Tablo 38: FV Panel Geri Dönüşüm İş Modelinin Riskleri 116
Tablo 39: Risk Önlemleri 117
Tablo 40: Riskler İçin Alternatif Çözüm Önerileri 118

KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AEEE	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya
AEEEY	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya Yönetmeliği
AHİKA	Ahiler Kalkınma Ajansı
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ARK	Antireflektif Kaplama
AYY	Atık Yönetimi Yönetmeliği
BBN	Başa Baş Noktası
B/O	Bakım ve Onarım
CdTe	Kadmiyum Tellür
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenür
EEE	Elektrikli ve Elektronik Eşya
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EUR (€)	AB Para Birimi Avro
EVA	Etilen Vinil Asetat
FV	Fotovoltaik
GaAs	Galyum Arsenit
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	Güneş Enerji Sistemi
GSYH	Gayrisafi Yurt İçi Hasıla
GÜS	Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu
GW	Gigavat
IEA PVPS	Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı
IPCC	Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
k-Si	Kristal Silisyum
KDV	Katma Değer Vergisi
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler
MW	Megavat
NBD	Net Bugünkü Değer
NNA	Net Nakit Akımı
NREL	ABD Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Laboratuvarı
LETID	Işık ve Yüksek Sıcaklık Kaynaklı Bozulma
LID	Işık Kaynaklı Bozulma
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
ODTÜ-GÜNAM	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Uygulamam ve Araştırma Merkezi
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
ÖT	Ömrünü Tamamlamış
PERC	Pasive Edilmiş Yayıcı Arka Kontak
PET	Polietilen Tereftalat
PID	Potansiyel Kaynaklı Bozulma
PVF	Polivinil Florür

SEIA	ABD Güneş Enerjisi Sanayicileri Derneği
SERI	Sustainable Electronics Recycling International
SKDM	Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TCLP	Toksisite Özellikleri Süzme Prosedürü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TL	Türk Lirası
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TW	Teravat
UEA	Uluslararası Enerji Ajansı
USD ($)	ABD Doları
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Alanı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
YMKT	Yerli Malı Kullanım Karşılığı Tahsis
YÜKT	Yurt İçinde Üretim Karşılığı Tahsis

YÖNETİCİ ÖZETİ

Giriş

Bu rapor, Ahiler Kalkınma Ajansı tarafından, fotovoltaik (FV) panellerin geri dönüşümünün önemini, dünyada ve Türkiye'deki mevcut durumu, ve bu amaçla kurulacak bir tesisin fizibilitesini incelemek amacıyla hazırlatılmıştır. Çalışma, teknik, ekonomik ve çevresel boyutları ele alarak, güneş enerjisinin küresel enerji dönüşümündeki artan önemini ve aynı zamanda kullanım ömrünü tamamlamış FV panellerin yönetilmesindeki büyüyen zorluğu ele almaktadır. Rapor, Türkiye bağlamında, özellikle de TR71 Bölgesine odaklanarak, FV panel geri dönüşüm teknolojileri, pazar dinamikleri ve potansiyel iş modelleri hakkında kapsamlı bir analiz sunarak, güneş ve geri dönüşüm sektörlerindeki paydaşlara rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. FV panellerin tüm yaşam döngüsünü incelendiği çalışmada, konunun teknik detayları, atık projeksiyonları ve çevresel ve ekonomik etkileri ele alınmaktadır. Raporun son bölümünde FV geri dönüşüm tesisi için özel bir iş modeli sunulmakta, ekonomik fizibilite analizi yapılmakta, son olarak ortaya konan iş modelinin barındırdığı risklerle ilgili kapsamlı bir risk değerlendirme modeli önerilmektedir.

Arka Plan ve Kapsam

Türkiye FV teknolojiler alanında sadece güneş enerjisinden elektrik üretilmesi yani GES kurulumları yapan bir ülke olmanın ötesinde FV sanayisini de kurmuş ve geliştirmiş bir ülke konumundadır. Güneşin peş peşe yıllarda en fazla artış kaydeden enerji kaynağı olması Türkiye'nin temiz enerji teknolojilerine geçişine yönelik ümit verici bir sinyaldir. Buna karşılık, güneşten elektrik üretilmesine yarayan FV paneller bir endüstriyel ürün olarak belli ömre sahip olup ekonomik ömürlerini tamamladıklarında içerdikleri değerli ham maddenin ne şekilde ele alınacağı önemli bir konudur. Artan GES kurulumları ile birlikte ömrünü tamamlamış (ÖT) FV panel atık yönetimi giderek daha fazla gündem oluşturması beklenmektedir. FV panel atıklarının döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda öncelikle onarım ve yeniden kullanım gibi seçeneklerin değerlendirilmesi, bunlar mümkün değilse son çare olarak geri dönüşüm yaklaşımı ile üretim aşamasında kullanılan malzemelere ayrıştırılarak geri kazanılması ekonomik, çevresel ve sosyal olarak değer taşımaktadır.

Türkiye'deki GES kurulumları özellikle İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmakta, Konya, Ankara, Kayseri, Gaziantep, Şanlıurfa gibi illerimiz kurulu güç olarak başı çekmektedir. Mevcut durumda TR71 Bölgesindeki illerde kurulu GES kapasitesi komşularına kıyasla az olmakla birlikte ilan edilen YEKA kapasiteleri ile bu durum hızla değişeceği öngörülmektedir. Öte yandan, atık geri dönüşüm konusunda mevcut sektörel deneyimi, bölgenin Türkiye GES haritasının ortasında yer alması ve güçlü lojistik ve ulaşım imkânları gibi faktörler Niğde'yi ÖT FV geri dönüşümü tesisine ev sahipliği yapması için güçlü bir aday haline getirmektedir. Dolayısıyla bu raporda, ÖT FV panel geri dönüşüm işinin TR71 Bölgesinin Niğde ilinde yapılmasına yönelik bir fizibilite analizi ortaya konulmaktadır.

FV atık geri dönüşümüne yönelik kurulacak tesisinin sürdürülebilirliğini belirleyen önemli unsurların başında atık miktarı yer almaktadır. Dünyada genelinde ve çeşitli ülkeler özelinde FV panel atıklarının göstereceği gelişme ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır. 2016 yılında yapılan bir çalışmaya, 2050 yılına gelindiğinde dünya genelinde 60 milyon ton ile 78 milyon ton arasında değişen miktarda FV panel atığı ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. Buna karşılık, dünyadaki bu alanda yapılan çalışmalar, güneş enerjisinin hızlı artışına paralel olarak FV atıkların da çok daha fazla artış göstereceğine işaret etmektedir. Örneğin, sadece Çin'deki panel atık miktarının 2050 yılında 146 milyon ton düzeyine ulaşacağı öngörülmektedir. Türkiye için FV atık akış tahmin modelleri henüz üzerinde yeterince çalışılmış bir alan değildir. Akademik literatürde yer alan çalışmalara göre 2050 yılına gelindiğinde Türkiye'deki FV atık miktarının 1.706.159 ton olacağı hesaplanmıştır.

FV Panel Geri Dönüşüm Teknolojileri

FV panel geri dönüşümüne yönelik Ar-Ge ve yenilikçilik çalışmaları yoğun olarak devam ettiği için çok çeşitli yaklaşım ve teknolojik çözümler önerilmektedir. ÖT FV panellerin geri dönüşüm için öncelikle elektrik

bağlantı kutusunu ve panel çerçevesinin sökülmesi gerekir. Bu işlem mekanik olarak yapılan ve görece basit bir işlemdir. Bu aşamadan sonra elde kalan panel atığı çeşitli ayırma teknikleri (mekanik, termal ve kimyasal) kullanılarak FV hücrelerin camdan ve arka filmden ayrılması gerçekleştirilir. Mekanik ayrıştırma esasen panellerin kesici, doğrayıcı, parçalayıcı ve ufalayıcı bir dizi makineden geçirilmesi ve her aşamada eleme ve seçmeler yapılarak ufalanan parçaların ayrılması prensibine dayanır. Kimyasal katmanlara ayırma işlemlerinde amaç FV hücreleri cam ile birleştiren termal yapıştırıcının (EVA) kimyasal çözücülerle etkisiz hale getirilmesidir. Panel bir bütün olarak kimyasal çözücü içine yerleştirilerek hücrelerin hasar görmeden geri kazanılmasına yönelik girişimler, uzun zaman alması, çok miktarda tehlikeli ve yanıcı kimyasal tüketimi ve hücrelerin kırılması gibi riskler nedeniyle henüz yaygınlık kazanmış bir yöntem değildir. Bunun yerine panelin önce parçalara ayrılması sonra bu parçalara kimyasal çözücü uygulayarak FV hücrelerin kırık olarak elde edilmesi daha sıklıkla üzerinde çalışılan bir yöntemdir. Benzer şekilde paneller küçük parçalara ayrıldıktan sonra ısıl işlem uygulanarak yapıştırıcı EVA malzemesinin eriyerek kendini bırakması hatta uygun sıcaklıkta buharlaşması sağlanarak da FV panel geri dönüşümü yapılmaktadır. Ancak bu yöntemin de yüksek enerji tüketimi ve uzun sürmesi gibi dezavantajları vardır. Kimyasal ve ısıl katmanlara ayrıştırma işlemlerinin problemlerini ortadan kaldırmaya yönelik yeni teknolojiler geliştirilmesi araştırma ve geliştirme çalışmalarının önemli bir alanı olup bunlara ilişkin çok sayıda makale ve patent yayımlanmaktadır.

Sosyal ve Çevresel Etki

ÖT FV panellerin geri dönüştürülmesinin önemli sosyal ve çevresel faydaları bulunmaktadır. Her şeyden önce, ÖT FV panellerin geri dönüştürülmek yerine diğer çöpler gibi atık depolamaya gönderilmesi panel içeriğindeki değerli endüstriyel ham maddelerin kaybı anlamına gelmektedir. Oysa doğru geri dönüşüm teknikleri ile bu malzemeler tekrar kazanılarak döngüsel ekonomi içinde yeniden kullanılabilir. Bu sayede her yeni panel için doğanın sınırlı olan kaynaklarına başvurulması gerekliliği ortadan kalkar. FV panellerin en önemli bileşeni olan FV hücrelerin üretiminde harcanan enerjiden kaynaklanan karbon ayak izi de geri dönüştürülme yapılmazsa çevresel kayıp hanesine eklenmektedir. Ayrıca çeşitli tipteki paneller kimyasal sızmalara neden olarak çevre ve canlı yaşam üzerinde olumsuz etki riski yaratmaktadır.

FV panellerin geri dönüşümü yeni bir iş kolu olarak ortaya çıkacak ve yeni istihdam olanakları yaratarak toplumsal kalkınmaya katkı sağlayacaktır. Geri dönüşüm tekniklerinin gelişmesi için yoğun Ar-Ge çalışmalar devam ettiği için, bu alandaki çalışmalar akademik gelişime imkân oluşturacak ve araştırmacılara iş ortama yaratacaktır.

FV Panel Geri Dönüşümünün Önündeki Engeller ve Zorluklar

FV teknolojiler kullanılarak güneş enerji üretimi giderek yaygınlaşırken, FV atıkların ne şekilde ele alınacağı teknolojik, sosyal, çevresel, hukukî ve ekonomik boyutları olan ve bütüncül yaklaşım gerektiren bir sorun alanı olarak büyümektedir. Henüz bu boyutların hepsinde denge gözeten kapsamlı çözümler üretilememiştir. Akademik literatür ÖT FV panel geri dönüşümünün önündeki engelleri sıklıkla ele alarak incelemektedir. Bu yayınlar analiz edildiğinde, belirlenen engellerin teknolojik, çevresel, ekonomik, sosyal, yasal ve politik ve piyasa koşulları ile ilgili olduğu gözlemlenmektedir. Belirlenen engeller ve zorluklar Tablo 1 ile özetlenmektedir.

Tablo 1: Yönetici Özeti – Engeller ve Zorluklar

Kategori	Engel / Zorluk
Teknolojik	FV panel teknolojilerinin ve ürün tasarımlarının çeşitliliği
	Geri dönüştürülmüş malzemeden yapılan FV panellerin düşük verimi
	Düzensiz atık akışından doğan operasyonel zorluklar
	FV panel tasarım detaylarının açıklanmamasından doğan belirsizlik
	FV panel tasarımından dolayı geri dönüşümün karmaşıklığı
	Malzeme geri kazanımı için gerekli teknolojinin eksikliği
Çevresel	Atık nakliyesinden kaynaklanan kirlilik ve emisyon
	Geri dönüşüm sırasındaki kirlilik ve emisyon
	Geri dönüşüm sürecinin yüksek enerji gereksinimi
Ekonomik	Geri dönüşüm yatırımlarının cazip olmaması
	Yüksek lojistik maliyetleri
	Geri dönüşüm operasyonunun yüksek maliyeti
	Fizibilite çalışmalarında kullanılacak verilerin eksikliği
Sosyal	Geri dönüşüme/kazanıma yeterince önem verilmemesi
	Geri dönüşüm alanında yetkin/yetişmiş personel eksikliği
	Tüketicilerin dönüştürülmüş malzemeden yapılan panellere güvenmemesi
Politika	Mevzuatsal çerçevenin eksikliği ya da yetersizliği
	FV atıklarının geri dönüşümü için teşvik ve sübvansiyonların eksikliği
	Hedefler ve sorumluluklar konusunda hükümet politikalarının eksikliği
Piyasalar	Atık malzeme miktarının yetersiz ve belirsiz olması
	Endüstri değer zincirinin yetersiz olması
	Geri dönüşüm altyapı ve tesislerinin eksikliği
	İhale ve sözleşmelerde tesis sökümünün konu edilmemesi
	Piyasa aktörlerinin uzun ömürlü işletmeler olmaması
	Üreticiler ve geri dönüştürücüler arasında iletişim eksikliği

FV panellerin geri dönüşümü önündeki engellerle ilgili olarak dikkat edilmesi gereken bir husus, bu engellerin genellikle birbiri ile bağlantılı olduğu ve birine getirilecek çözümün diğerini de etkileyecek nitelikte olmasıdır. Örneğin, devletlerin yasal düzenleme ve politika alanında getireceği teşvik ve finansmanlar, geri dönüşüm iş modeli ile ilgili ekonomik sorunlarını çözecek, böylece geri dönüşüm tesislerinin sayısı ve kapasitesi artacaktır. Dolayısıyla, konu ile ilgili çalışmalar kurumlar ve firmalar arasında güçlü koordinasyon ve iletişim kurularak bütüncül yaklaşımlar izlenerek yürütülmelidir.

Çeşitli Ülkelerde ve Türkiye'de Mevcut Durum

FV atık yönetimi uzun zamandır farkındalık geliştirilen bir alan olduğu için dünyada bu alandaki gelişmeleri takip etmek yararlı olacaktır. FV panel kurulumlarında öncü ülkeler geri dönüşüm konusunu da gündemlerine alarak bu gereksinime yönelik sektörlerini geliştirmeye başlamışlardır. Ülkelerin büyüklüklerini ve güneş enerjisi sektörünün gelişmişlik düzeyini dikkate aldığımızda, mevcut firmaların sayısının henüz az olduğu değerlendirmesini yapmak mümkündür. Bu geri dönüşüm firmalarının çoğu kendi imkânları ile geliştirdikleri teknikleri ve ekipmanları kullanmaktadırlar. ÖT FV panellere özgü geri dönüşüm ekipmanları üreterek ticari olarak satışa sunan firma sayısı ise iyice az olup bu durum henüz geri dönüşüm tekniklerinin optimize edilmediğini gerçeğine işaret etmektedir. Nitekim gerek akademik literatür gerek patent başvuruları bu alanda araştırma ve yeniliklerin devam etmekte olduğunu göstermektedir. Sürdürülen çalışmalar arasından geri kazanım verimliliği ve maliyet etkinlik açısından diğerlerinin önüne geçen alternatifler ticari başarı potansiyeli gösterecek ve önce ekipman üreten firmaların sonra da geri dönüşüm firmalarının sayısının artmasına yol açacaktır.

Mevcut yasal çerçeve ve düzenlemeler Amerika Birleşik Devletleri, Çin Halk Cumhuriyeti, Japonya, Güney Kore ve Avrupa Birliği'nin bazı ülkeleri esas alınarak incelenmiştir. Bu alandaki düzenlemelerde en ileri konum Avrupa Birliği'ndedir. AEEE yönetmeliğinde FV panellerin geri dönüştürülmesi açık olarak tanımlanmış ve bu amaca yönelik organizasyonlar AB'de kurulmuş ve işlerlik kazanmıştır. Fransa'da tüm atıkların toplanmasında tek bir firmanın yasal olarak yetkilendirilmiş olması erken aşamada sürecin rekabetten korunması gereksinimini göstermektedir. İtalya'da santral sahiplerinden panel başına geri dönüşüm ücreti kesilmekte ve santral kapatıldığında bu kesinti geri dönüşüm yapan firmaya aktarılmaktadır. ABD'de bazı eyaletlerde FV panel atıklarına yönelik uygulamalar olmakla birlikte federal düzeyde bir düzenleme bulunmamaktadır. FV teknolojilerinde dünya genelinde önemli pazar payına sahip Çin'de geri dönüşüm konusunda yasal düzenleme bulunmamakta, ancak FV panellere özel geri dönüşüm kılavuzları ve standartları hızla gelişmektedir. Pek çok ülkede sektör derneklerinin ve araştırma kurumlarının süreç içinde aktif rol oynadığı, hatta öncülük ettiği gözlemlenmektedir. Ülkelerin çoğunda ömrünü tamamlayan FV atıklar elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının yönetilmesi ile ilgili mevzuat çerçevesinde işlem görmektedir. Türkiye'de de bu konudaki mevcut düzenleme Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik gibi ilgili mevzuat kapsamındadır. Ülkemizde henüz bu gereksinime özel olarak hazırlanmış bir düzenleme yayınlanmamış olup FV panel geri dönüşümüne yönelik tesis faaliyete geçmemiştir.

İş Modeli Fizibilitesi

Raporda ÖT FV panel geri dönüşümü ile ilgili dünyada ve Türkiye'de teknik, sosyal ve ekonomik durum açıklanmasından sonra, TR71 Bölgesinde kurulacak bir FV panel geri dönüşüm tesisi için fizibilite çalışmasına yer verilmiştir. Ekonomik fizibiliteye geçmeden önce, İş Modeli Kanvası tekniği kullanılarak işletme için bir iş modeli önerilmiştir. Öncelikle, tesisin tasarımı ve işleyişini etkileyen ön kararlar ele alınmıştır. Ardından, işletmeye ilişkin detaylı açıklamalar içeren iş modeli sunulmuştur. İş modeli kanvasının ana unsurları aşağıda özetlenmektedir:

- Değer Önerisi: İşletme, ekonomik olarak değer arz eden malzemelerin geri kazanılmasını sağlayarak sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamalarını mümkün kılacak, firmaların yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini sağlayacak, atık FV panellerin çevre etkilerini azaltacak, güneş enerjisi sektöründeki çeşitli aktörlerin çevre dostu imajlarını güçlendirecektir.
- Temel Faaliyetler: İşletmenin panel toplama ve taşıma, panel söküm ve ayrıştırma, malzeme geri kazanımı, atık yönetimi ve bertaraf gibi temel faaliyetler yürütmesi öngörülmektedir. Ar-Ge çalışmaları ile kalite kontrol ve test de önemli faaliyetler arasında yer alacaktır.
- Temel Ortaklar: Güneş enerjisi şirketleri, atık yönetim şirketleri, devlet kurumları ve malzeme arıtıcıları gibi iş ortakları belirlenmiştir.
- Temel Kaynaklar: İş modeline göre, FV panel geri dönüşüm tesisinin Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas OSB içerisinde 5 bin m^2 arazi üstünde 2 bin 400 m^2 kapalı alana sahip binada, yılda 152.800 adet ÖT FV panel işleme kapasitesine sahip mekanik geri dönüştürme hattı ile faaliyet göstermesi ön görülmektedir. İşletmede toplam 19 personel görev yapacaktır.
- Müşteri Segmentleri: Güneş paneli kurulumu yapan firmalar, büyük ölçekli operatörler, atık yönetim şirketleri ve malzeme alıcıları gibi hedef kitleler tanımlanmıştır.
- Kanallar: Doğrudan satış, çevrim içi platform, endüstri konferansları ve ortaklık anlaşmaları gibi erişim kanalları belirtilmiştir.
- Müşteri İlişkileri: İşletme için kritik olan düzenli ve sürekli FV atık akışını sağlamak için paydaşlarla uzun vadeli ve güçlü ilişkiler kurulmalıdır. Benzer şekilde geri kazanılmış malzemenin satılacağı firmalarla ilişkilerin de iyi yönetilmesi gerekmektedir.
- Maliyet Yapısı: İşletmenin maliyet yapısı öncelikle sabit yatırım maliyeti ve işletme maliyeti olarak ikiye ayrılmaktadır. Sabit yatırım arazi, bina, geri dönüşüm ekipmanı, operasyonu destekleyici diğer alet, teçhizat ve ekipman ile ofis ekipmanı olarak ele alınmalıdır. İşletme giderlerinde en önemli bileşen FV atıkların temin edilmesi için yapılacak ödemeler olup bunun yanı sıra personel maliyetleri,

enerji ve su giderleri, lojistik ve taşıma giderleri ile kalite kontrol ve Ar-Ge giderleri de dikkate alınması gerekmektedir.

- Gelir Kaynakları: İşletmenin temel gelir kaynağı ÖT FV panellerin mekanik ayrıştırılması sonucunda elde edilecek geri kazanılmış malzemenin satışı olacaktır. Bunun dışında atık yönetim hizmetleri, FV santral söküm hizmetleri, danışmanlık hizmetleri gibi yan hizmetler de sunulabilecektir. Ayrıca devlet tarafından ileride verilmesi söz konusu olacak teşvikler de işletme için maliyet düşüşü ya da gelir kaynağı oluşturabilir.

İş Modeli Ekonomik Değerlendirmesi

Önerilen iş modeline göre, işletmenin Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas OSB içerisinde 5 bin m^2 arazi üstünde 2 bin 400 m^2 kapalı alana sahip binada, yılda 152.800 adet ÖT FV panel işleme kapasitesine sahip bir geri dönüştürme hattı ile faaliyet göstereceği varsayımından hareketle yatırımın ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Ekonomik analizde FV atıkların temini için, panel içeriğindeki malzemelerin hurda değerleri esas alınarak hesaplanan FV panel hurda değerinin %50'si kadar ödeme yapılacağı kabulü yapılmıştır. Hesaplamalarda tüm değerler USD karşılığı kullanılmış olup indirgeme oranı %3,2 olarak hesaba katılmıştır.

Akademin literatürde Türkiye için yapılmış bir atık modellemesi çalışması esas alınarak yapılan 2026-2035 aralığı için FV atık projeksiyonuna göre, ilk yıl hariç olmak üzere, işletmenin kapasite kullanım oranının %100 düzeyine çıkabileceği varsayılmıştır.

Tipik bir k-Si FV panelin malzeme içeriği ve bu malzemelerin geri kazanılması durumdaki piyasa değerleri Tablo 2 ile sunulmaktadır. Bu doğrultuda bir adet ÖT FV panelden elde edilebilecek değer 15,61 USD olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 2: Yönetici Özeti – ÖT FV Panel İçeriğindeki Malzemelerin Değeri

Malzeme	Oran	Miktar (kg)	Birim Fiyatı (TL/kg)	Birim Fiyatı (USD/kg)	Panel Başı Değer (TL)	Panel Başı Değer (USD)
Alüminyum	%16,03	490.133,28	48,00	1,33	153,89	4,26
Cam	%67	2.048.592,00	3,97	0,11	53,22	1,47
Plastik	%11	336.336,00	7,00	0,19	15,40	0,43
Silisyum	%4,4	134.534,40	97,49	2,70	85,79	2,38
Gümüş	%0,03	917,28	36.178,21	1.002,00	217,07	6,01
Bakır	%0,8	24.460,80	160,00	4,43	25,60	0,71
Kalay	%0,1	3.057,60	628,00	17,39	12,56	0,35
Kurşun	%0,01	305,76	53,00	1,47	0,11	0,00
				Toplam	**563,63**	**15,61**

Varsayımlar doğrultusunda ve ilgili veri kaynaklarından maliyet bilgileri derlenerek işletmenin ilk yatırım maliyeti 1.560.762 USD olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Bu tutara arazi, bina, geri dönüşüm hattı ve diğer makine, teçhizat ve ofis malzemeleri dahildir.

Tablo 3: Yönetici Özeti – Sabit Yatırım Özeti

Gider Kalemi	Yaklaşık Bedel (TL)	Yaklaşık Bedel ($)
Arazi ve Bina	**30.270.980**	**838.392**
Arazi	3.500.000	96.937
Bina	26.770.980	741.455
Geri Dönüşüm Ekipmanı	**18.103.548**	**501.400**
Çift Kat Cam Fotovoltaik Güneş Paneli Öğütme ve Ayırma Hattı	18.103.548	501.400
Tesis İşletmeye Alma Giderleri	**905.177**	**25.070**
Diğer Makine, Teçhizat, Ekipman	**6.073.159**	**168.204**
Lisans ve İzinler	**1.000.000**	**27.696**
Toplam Sabit Yatırım Tutarı	**56.352.865**	**1.560.762**

İşletmenin, FV atık panel temini için yapılacak harcamalar dışında yıllık 332.200 USD sabit ve 462.786 USD değişken gideri olması öngörülmektedir (Tablo 4). Tesis tam kapasite ile işletildiğinde yıllık 1.193.264 USD

FV atık temin harcaması yapılması gerekecektir. İşlenen FV panellerin geri dönüştürülmesi sonucu kazanılan malzemelerin satışından elde edilecek gelirlerin yıllık 2.386.528 USD olması beklenmektedir.

Tablo 4: Yönetici Özeti – Tam Kapasite İşletimde Yıllık Gider ve Gelirler

Yıllık Sabit İşletme Gideri (A)	332.200
Yıllık Değişken İşletme Gideri (B)	462.786
Yıllık FV Atık Gideri (C)	1.193.264
Yıllık İşletme Gelirleri (D)	2.386.528

Bu değerler esas alınarak işletmenin yıllar bazında gelir giderleri ve net nakit akımları hesaplanmış, daha sonra bu değerlerin net bugünkü değere indirgemesi yapılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5: Yönetici Özeti – Net Nakit Akımı

AÇIKLAMA/YILLAR	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
A.Yatırım Faaliyetlerinden Doğan Nakit Akımı	-1.560.762	-69.904	-29.469	0	0	0	0	0	0	0	534.625
1. Sabit Yatırım (-)	1.560.762										
2. İşletme Sermayesi Yatırımı (-)		69.904	29.469	0							
3. Tesisin Hurda Değeri (+)											534.625
B.İşletme Faaliyetlerinden Doğan Nakit Akımı		26.159	341.297	323.273	323.273	323.273	316.484	316.484	316.484	316.484	316.484
1. Proje Gelirleri (+)		1.170.785	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528
2. İ.K.D.V. (+)											
3. İşletme Giderleri (-)		1.144.626	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249
4. Vergi Ödemeleri (-)		0	56.981	75.005	75.005	75.005	81.795	81.795	81.795	81.795	81.795
C.Finansmandan Doğan Nakit Akımı		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1. Faiz Ödemeleri (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Temettü Ödemeleri (-)											
Projenin Net Nakit Akımı (NNA) (A+B+C)	**-1.560.762**	**-43.746**	**311.828**	**323.273**	**323.273**	**323.273**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**851.108**
Projenin İndirgenmiş Net Nakit Akımı (Hurda Değer Dahil)	**-1.560.762**	**-42.389**	**292.790**	**294.124**	**285.004**	**276.166**	**261.983**	**253.859**	**245.988**	**238.360**	**621.138**
Projenin İndirgenmiş Net Nakit Akımı (Hurda Değer Hariç)	**-1.560.762**	**-42.389**	**292.790**	**294.124**	**285.004**	**276.166**	**261.983**	**253.859**	**245.988**	**238.360**	**230.969**

Yatırım ile ilgili hesaplamalar sonucunda önerilen iş modeli için finansal göstergeler Tablo 6'te özetlendiği şekilde elde edilmiştir.

Tablo 6: Yönetici Özeti – Finansal Değerlendirme Özeti

Finansal Değerlendirme Özeti *(Parasal değerler USD cinsindedir)*	
Panel İşleme Kapasitesi (adet)	152.880
Öngörülen KKO	%65;%100;+
Gerekli Minimum Arazi Büyüklüğü (m2)	5.000
Sabit Yatırım Tutarı	1.560.762
İşletme Sermayesi İhtiyacı	69.904
Toplam Yatırım Tutarı	1.630.666
Finansman İhtiyacı (KDV Dahil)	1.769.601
Finansman İhtiyacı (KDV Hariç)	1.630.666
İndirgeme Oranı	3,20
NBD (Hurda Değer Dahil)	1.166.261
NBD (Hurda Değer Hariç)	776.092
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Dahil)	9,55%
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Hariç)	7,41%
Geri Dönüş Süresi	6 yıl 3 ay
Başabaş Noktadaki KKO	45,48%
Fayda/Maliyet Oranı	1,19
Katma Değer Etkisi (Net)	4.545.935
Katma Değer Etkisi (Brüt)	5.269.951
Yatırımın Gerçekleştirilme Süresi (ay)	12
Kurulu Kapasitede İstihdam Sayısı (kişi)	19

Finansal değerlendirme özetinde görüleceği üzere, ÖT FV panel geri dönüşüm tesisinin ekonomik yapılabilirliği başta kabul edilen varsayımların hepsinin gerçekleşmesi koşuluna bağlıdır. Bu durumda bile iç karlılık oranı, fayda/maliyet oranı ve geri dönüş süresi gibi göstergeler yatırımın yüksek cazibesi olduğu izlenimini vermemektedir. Bu bulgu, literatürde zorluk ve engeller konulu çalışmalarda ayrıntıları verilen çeşitli ekonomik zorluklarla birbirini destekler niteliktedir. Ekonomik engellerin aşılması için devlet desteklerinin gerekliliği uluslararası literatürde sıklıkla yer verilen bir görüş olup bu alanda düzenlemeler yapmış ülkelerin ÖT FV panel geri dönüşümü yatırımlarını daha hızlı ve sürdürülebilir şekilde hayata geçirebildikleri görülmektedir. Yapılan analizler kapsamında panel başına belli bir miktarda devlet desteği uygulanmasının ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesinin finansal göstergelerinde önemli iyileşmeler elde edilmesini olası hâle getireceği sonucu elde edilmektedir (Tablo 7).

Tablo 7: Yönetici Özeti – Atık Alım Katsayısı Duyarlılık Analizi

Atık Alım Katsayısı - Devlet Teşviği Duyarlılık Analizi *(%98 Emre amade; %75 Pazar Payı)*											
	Atık Alım Katsayısı (%)										
Devlet Teşviki (USD/panel)	**0%**	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**	**70%**	**80%**	**90%**	**100%**
1	3,12	2,42	1,97	1,66	1,44	1,27	1,13	1,02	0,93	0,86	0,79
2	3,31	2,56	2,09	1,76	1,52	1,34	1,20	1,08	0,99	0,91	0,84
3	3,50	2,71	2,21	1,86	1,61	1,42	1,27	1,15	1,05	0,96	0,89
4	3,69	2,85	2,32	1,96	1,70	1,49	1,34	1,21	1,10	1,01	0,94
5	3,88	3,00	2,44	2,06	1,78	1,57	1,40	1,27	1,16	1,06	0,98

İş Modeli Riskleri

Finansal değerlendirmeden de anlaşılacağı üzere, önerilen FV panel geri dönüşüm iş modeli, mevcut piyasa koşulları ve yasal düzenlemeler çerçevesinde, önemli riskler barındırmaktadır. Bu riskler arasında aşağıdakiler özellikle yüksek risk düzeyinde görünmektedir:

- Geri Kazanım Verimsizliği: Seçilen geri dönüşüm yöntemlerinin beklenilen verimlilikte malzeme geri kazanımı sağlamaması

- Malzeme Fiyat Dalgalanmaları: Geri kazanılan malzemelerin piyasa fiyatlarında öngörülemeyen düşüşlerin gelirleri azaltması
- Atık Akışı Belirsizliği: Yeterli miktarda ve sürekli olarak FV panel atığı temininde belirsizlik yaşanması
- Çevresel Mevzuata Uyum Güçlüğü: Geri dönüşüm süreçlerinin çevresel standartlara uyumunun sağlanmasında zorluklar çıkması
- Yatırım Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış: Tesis kurulumu, ekipman alımı ve ilk işletme giderlerinin beklenenden yüksek çıkması

Öne çıkan risklerin FV panel geri dönüşümünde karşılaşılan zorluklar ve engeller ile büyük ölçüde örtüşmekte olduğu dikkat edilmesi gereken bir husustur. Başta yüksek düzey olanlar olmak üzere tüm risklerin işletme tarafından kesintisiz olarak izlenmesi, gerekli önlemlerin alınması ve gerektiğinde alternatif uygulamaların devreye alınmasına hazırlıklı olunması kurulacak işletmenin başarısı için gereklidir.

Sonuç

Bu rapor, ekonomik ömrünü tamamlayarak artık kullanılamaz hale gelen güneş panellerinin modern teknolojiler kullanılarak geri dönüştürülmesinin çevresel, toplumsal ve ekonomik fayda potansiyelini ortaya koymaktadır. Yüksek saflıkta ve değerli malzemeler içeren panellerin hurda haline geldiğinde doğaya terke edilmek yerine döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde tekrar kullanılabilir kaynaklar haline getirilmesi gerekli görülmekte olup dünya genelinde bilimsel araştırmacılar, düzenleyici kamu otoriteleri ve özel şirketler bu alanda yoğun olarak çalışmalar yürütmektedir. Mevcut koşullarda FV panel geri dönüşümünün yaygınlık kazanmasının önünde çeşitli engel ve zorluklar bulunmakta, özellikle geri dönüşüm tesislerinin ekonomik sürdürülebilirliğini destekleyen güçlü finansal göstergeler henüz mevcut değildir. Ancak bu durum FV panel atıklarının yönetilmesine yönelik çalışmaların rafa kaldırılması anlamına gelmemekte, tam tersine konu üzerinde daha detaylı teknik ve ekonomik çalışmaların devam ettirilmesi gerekliliğini desteklemektedir.

1 Giriş

Günümüz dünyası, sürdürülebilirlik ve enerji dönüşümü gibi kritik öneme sahip kavramların etrafında şekillenirken, güneş enerjisi teknolojileri bu dönüşümün itici gücü olarak öne çıkmaktadır. Ancak, güneş enerjisi üretiminin artmasıyla birlikte, fotovoltaik (FV) panellerin yaşam döngüsünün sonundaki yönetimi de giderek daha önemli bir hâle gelmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma, hem güneş enerjisinin sunduğu potansiyeli incelerken, hem de giderek artan FV panellerinin çevre ve doğa için yarattığı tehdidi ve beraberinde getireceği ekonomik kayıpları da gözler önüne sermeyi amaçlamaktadır. Çalışma, sadece teknolojiye değil, aynı zamanda bu teknolojinin sürdürülebilir ve döngüsel bir şekilde yönetilmesinin gerekliliğine de odaklanmaktadır. Bu kapsamda rapor, FV panellerin ömrünü tamamladıktan sonraki süreci, geri dönüşüm teknolojilerini, bu alanda ortaya çıkan iş modellerini ve bu sektörün geleceğini kapsamlı bir şekilde ele alarak öncelikle bu alandaki potansiyel girişimcilere, ama bunun dışında akademik çalışmalara ve sektördeki uygulamalara rehberlik etmeyi hedeflemektedir.

Bu dokümanın temel amacı, artan küresel enerji talebi ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda, güneş enerjisi teknolojilerinin önemli bir parçası olan fotovoltaik (FV) panellerin tüm yaşam döngüsünü kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu alanda bilgi birikimini artırmak ve sektördeki gelişmelere ışık tutmaktır. Çalışma, hem güneş enerjisi teknolojilerinin potansiyelini ve uygulamalarını değerlendirmekte, hem de FV panellerin ömrünü tamamladıktan sonraki süreçte ortaya çıkan çevresel ve ekonomik etkileri analiz etmektedir. Bu kapsamda, okuyuculara güneş enerjisi sektörüne dair temel bilgiler sunulurken, aynı zamanda FV panel geri dönüşüm teknolojileri, mevzuat, iş modelleri ve bu alandaki uluslararası uygulamalar hakkında detaylı bir bakış açısı sağlamak hedeflenmektedir. Dokümanın bir diğer amacı da FV panellerin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için gerekli olan bilgi ve stratejileri sunarak, döngüsel ekonomi ilkelerine uygun çözümler üretilmesine katkıda bulunmaktır. Bu bağlamda, atık yönetimi, geri dönüşüm teknolojileri ve bu alandaki potansiyel iş fırsatları üzerinde durularak hem çevreye duyarlı hem de ekonomik olarak sürdürülebilir bir gelecek için yol haritası çizilmeye çalışılmaktadır. Sonuç olarak, bu doküman hem akademik araştırmacılar hem de sektör profesyonelleri için değerli bir kaynak olarak hizmet vermeyi amaçlamakta ve güneş enerjisi sektörünün sürdürülebilir bir şekilde gelişimine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Giriş bölümünün ardından, okuyucuları bu kritik konularla tanıştırmak amacıyla, öncelikle TR71 Bölgesinin genel bir tanıtımı sunulmaktadır. Bu tanıtım, coğrafi konum, iklim özellikleri ve sosyoekonomik yapı gibi faktörlerin değerlendirilmesiyle, bölgenin güneş enerjisi potansiyelini ve bu potansiyelin sürdürülebilir kullanımı için gereken önlemleri anlamak için bir zemin oluşturur. Ardından, güneş enerjisi teknolojilerinin temel prensipleri ve çeşitleri, özellikle fotovoltaik (FV) teknolojileri detaylı bir şekilde incelenmektedir. FV teknolojileri içerisinde, en yaygın kullanılan kristal silisyum teknolojisinin yanı sıra, diğer alternatif teknolojiler de ele alınarak, her birinin avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları değerlendirilmektedir. FV uygulamaları ise, konutlardan endüstriyel tesislere, güneş enerjili sulama sistemlerinden elektrikli araç şarj istasyonlarına kadar geniş bir yelpazede incelenerek, güneş enerjisinin farklı sektörlerdeki kullanım potansiyeli ve etkileri analiz edilmektedir.

Çalışmanın sonraki bölümünde, Türkiye'de ve TR71 Bölgesinde güneş enerjisi faaliyetleri, yasal düzenlemeler, üretim durumu, sanayi altyapısı ve potansiyel kaynaklar açısından değerlendirilmektedir. Türkiye'deki güneş enerjisi sektörünün gelişimini etkileyen üst politika belgeleri ve ilgili mevzuatlar incelenerek, sektörün yönü ve geleceği hakkında öngörüler sunulmaktadır. Aynı zamanda, güneş enerjisi üretim ve sanayi altyapısı değerlendirilerek, sektördeki mevcut durum ve potansiyel darboğazlar belirlenmektedir. TR71 Bölgesine özel olarak, bölgenin güneş enerjisi potansiyeli, mevcut güneş enerjisi santralleri ve güneş enerjisi sanayisi detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

FV panellerin ömrünü tamamlamasıyla ortaya çıkan atık miktarları, bu çalışmanın önemli bir odak noktasını oluşturmaktadır. ÖT FV panellerin ömrünü tamamlama süreleri, dünyadaki ve Türkiye'deki FV panel atık öngörüleri analiz edilerek, geri dönüşüm konusunun ne denli acil ve önemli olduğu vurgulanmaktadır. Bu

analizler, artan atık miktarlarının sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik kayıplara da yol açabileceğine dikkat çekmektedir. Sürdürülebilirlik ve çevre perspektifinden ÖT FV paneller ele alınarak, bu atıkların çevresel etkileri, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin önemi açıklanmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sınırda Karbon Düzenlemesi gibi uluslararası politikalar, bu konunun sadece ulusal değil, küresel bir öncelik olduğunu göstermektedir. Döngüsel ekonomi prensipleri çerçevesinde, ÖT FV panellerin geri kazanılması, yeniden kullanımı ve atıkların minimize edilmesi konuları değerlendirilerek, sürdürülebilir bir geleceğe nasıl katkı sağlanabileceği tartışılmaktadır.

FV panel geri dönüşüm teknolojileri bölümünde, katmanlara ayırma öncesi işlemler ve katmanlara ayırma teknikleri ayrı ayrı incelenmektedir. Mekanik, ısıl ve kimyasal katmanlara ayırma yöntemlerinin her birinin avantajları ve dezavantajları detaylı olarak ele alınmakta ve hangi tür paneller için hangi yöntemlerin daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, kırılmamış FV hücrelerden dilim elde edilmesi, geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan özel ekipmanlar ve patent çalışmaları incelenerek, bu alandaki teknolojik gelişmeler hakkında bilgi verilmektedir.

FV panel geri dönüşümü süreçlerinde karşılaşılan zorluklar ele alınarak, bu zorlukların aşılması için gereken önlemler ve çözümler tartışılmaktadır. Farklı ülkelerdeki ÖT FV panel geri dönüşüm işletmeleri ve girişimler, sektördeki küresel yaklaşımları ve uygulamaları anlamak için incelenmektedir. FV panel atığı toplayan ve işleyen firmalar, FV panel geri dönüşüm makinesi üreticileri ve PV Cycle, SOREN gibi sektördeki önemli dernekler hakkında bilgiler sunulmaktadır.

Dünyada ve Türkiye'de sektörel mevzuat, bu çalışmanın önemli bir diğer bölümünü oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Çin Halk Cumhuriyeti, Japonya, Güney Kore ve Avrupa Birliği'nin geneli ve bazı üyeleri gibi farklı ülkelerdeki yasal düzenlemeler ve uygulamalar incelenerek, geri dönüşüm sektörüne yönelik politikalar değerlendirilmektedir. Türkiye'deki FV atık yönetimi mevzuatı, mevcut durum ve önerilen politikalar çerçevesinde ele alınarak, geri dönüşüm sektörünün gelişimine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Son olarak, örnek bir ÖT FV panel geri dönüşüm tesisinin fizibilitesi esas oluşturacak bir iş modeli önerilmektedir. Bu bölümünde öncelikle, bu amaçla kurulacak bir işletme için alınması gereken teknoloji ve ürün seçimi, geri dönüşüm konsepti seçimi, işletme kapasitesi ve ortaklık yapısı gibi kritik kararlara ilişkin varsayımlar yapılmaktadır. Ardından, bu karar doğrultusunda oluşturulan İş Modeli Kanvası ayrıntılarıyla ortaya konulmaktadır. Geri dönüşüm tesisinin değer önerisi, temel faaliyetleri, ortakları, kaynakları, müşteri segmentleri, kanalları, müşteri ilişkileri, maliyet yapısı, gelir kaynakları ve sosyal-çevresel etkileri detaylı bir şekilde açıklanarak, bu alanda yatırım yapmayı düşünenlere rehberlik edilmektedir. Özellikle bu bölümde sunulan iş modelinin doğru kurgulanması, yatırımın başarısı ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. FV panel geri dönüşüm tesisinin iş modelinin önemi, sadece operasyonel süreçlerin doğru kurgulanmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda işletmenin uzun vadeli sürdürülebilirliği, karlılığı ve rekabet gücü açısından da hayati bir rol oynamaktadır. Etkin bir iş modeli, FV panel geri dönüşüm tesisini sadece kârlı bir işletme haline getirmekle kalmaz, aynı zamanda çevre ve toplum için de sürdürülebilir bir değer yaratmasını sağlar.

Bu çalışma hem akademik araştırmalar hem de sektör profesyonelleri için kapsamlı bir kaynak sunarak, güneş enerjisi sektörünün sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

2 TR71 Bölgesi Genel Tanıtımı

TR71 Bölgesi, İç Anadolu Bölgesinde yer alan ve Aksaray, Kırıkkale, Kırşehir, Nevşehir ve Niğde illerini kapsayan Düzey 2 bölgesidir. TR71 Bölgesi, TR72 Bölgesi ile birlikte Düzey 1'deki TR7 Orta Anadolu Bölgesini oluşturmaktadır. TÜİK'e göre 31.753 km²'lik coğrafi genişliğiyle TR71 Bölgesi, Türkiye'nin toplam arazi alanının %4,1'ini oluşturmaktadır. Bölgenin nüfusu 1,6 milyon kişiyi aşmakta, bu da Türkiye'nin toplam nüfusunun yaklaşık %2'sine karşılık gelmektedir. Raporun bu bölümünde FV panel geri dönüşümü ile ilgili olabilecek bilgilere öncelik verilerek TR71 Bölgesi hakkında özet bilgiler verilmektedir. Bölge ile ilgili ayrıntılı bilgiler için Ahiler Kalkınma Ajansının yayınlarına ve ilgili kaynaklarına bakılması güncel ve kapsamlı bilgilere ulaşmak açısından yerinde olacaktır.

Çevresel ve İklimsel Özellikler

Bölge, İç Anadolu'nun kıtasal iklimini Akdeniz iklimi ile birleştiren geçiş iklimi etkisi altındadır. Bu iklimsel geçiş, tarımsal üretimin çeşitliliğini artırır, aynı zamanda kuraklık ve su kaynakları yönetimi gibi çevresel zorlukları da beraberinde getirir. Yenilikçi sulama metodolojileri ve enerji verimliliği girişimleri, iklim değişikliğiyle mücadele bağlamında giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Ekonomik Yapı

TR71 Bölgesinin ülke ekonomisine katkısı, Türkiye'nin toplam gayrisafi yurt içi hasılasının %1,30'u olarak ölçülmüştür. Bölgedeki ekonomik faaliyetler içinde sanayi %31, hizmetler %48, tarım ise %20 paya sahiptir. Bu dağılım, hizmet sektörünün bölgedeki en yaygın ekonomik faaliyet alanının oluşturduğunu göstermektedir.

Sanayi sektörü özellikle Aksaray'da ön plana çıkmaktadır. Ayrıca Kırıkkale ağır sanayi kuruluşları, Niğde ise tarım temelli ve başta atık geri dönüşümü olmak üzere imalat sanayileri ile bölgenin ekonomik profilinde önemli bir konuma sahiptir. Niğde OSB ve Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas OSB'nin hâlen aktif olduğu Niğde'de iki OSB daha planlama aşamasındandır (OSBÜK, 2024). Deri ihtisas OSB'de hâlen 26 ila 28 dericilik firması yer almakta olup bunlar Avrupa'nın önemli ülkelerine ihracat yapmaktadır. Niğde Bor'da Tarıma Dayalı İhtisas Besi Organize Sanayi Bölgesi kurulması girişimi de bulunmaktadır. Nevşehir'de Nevşehir OSB, Nevşehir Acıgöl OSB işletmededir. Kırşehir OSB ve Kaman OSB Kırşehir ilindeki faal OSB'lerdir. Kırıkkale'nin Kırıkkale Silah Sanayi İhtisas, Kırıkkale I ve Kaman OSB'leri bulunmaktadır. Aksaray'da işletmede yalnız bir OSB olmakla birlikte, planlama, kamulaştırma ve altyapı hazırlık aşamalarında ikişer olmak üzere toplam 6 yeni OSB geliştirme aşamasındadır.

Atık yönetimi bölgede bilhassa Niğde'de dikkat çeken faaliyet alanlarından biridir. Atığın toplanması, ıslahı ve bertaraf faaliyetleri ile maddelerin geri kazanımı olarak tanımlanan NACE 38 kodunda çok sayıda işletme bulunmaktadır. Bu firmaların kapasitesi bölge dışından atık alınarak işleyebilecek derecede yüksektir. Atık yönetimi ile ilgili faaliyetler metal ve plastik geri dönüşümü ile hurdacılık üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bölgenin doğal ve kültürel mirasa sahip olması nedeniyle, önemli faaliyet alanlarından biri turizmdir. Nevşehir ise turizm faaliyetlerinden dolayı hizmetler sektöründe öncüdür. Bölge genelinde kırsal nüfus için tarım sektörü temel bir geçim kaynağı olmaya devam etmektedir. Modern tarım tekniklerinin ve organik tarım metodolojilerinin benimsenmesi, bölge genelinde giderek daha fazla ilgi kazanmaktadır. Kırşehir tarımsal üretimde öne çıkan il konumundadır. Tarım alanında yurt dışından yatırımcılar da çeken bölgede yüksek katma değerli gıda üretimi de belirgin bir gelişmişlik göstermektedir. Tarımsal faaliyet arasında besicilik ve süt ve süt ürünleri de ön plandadır.

Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

TR71 Bölgesi, yenilenebilir enerji kaynakları konusunda Türkiye'nin önde gelen bölgelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle, güneş enerjisi potansiyeli yüksektir. Nevşehir ve Niğde gibi iller, uzun güneş ışığı süreleri ile öne çıkmakta olup bölge özellikle güneş enerjisi yatırımları için cazip konumdadır. Ek olarak, bölge rüzgâr ve biyokütle enerjisi de dâhil olmak üzere alternatif yenilenebilir enerji kaynakları için yatırım faaliyetleri devam etmektedir. Yenilenebilir Kaynak Alanları Yönetmeliği uyarınca Niğde Bor'da 26 bin

hektar arazi yaklaşık 1 GW gücünde güneş enerjisi tesisine tahsis edilmiş olup bu santralların kurulumu aşamalı olarak devam etmektedir.

Demografik ve Sosyoekonomik Gelişim

Aksaray, Kırıkkale, Kırşehir, Nevşehir ve Niğde illerini kapsayan TR71 bölgesi, ülke ortalamasına kıyasla nispeten daha düşük bir nüfus yoğunluğu ve özellikle büyük şehirler dışında önemli bir kırsal nüfus barındıran, çeşitli demografik özellikler sergilemektedir. Bölgenin ekonomisinde hizmetler, tarım ve imalat sektörleri ön plandadır. GSYH açısından TR71 Bölgesinin ortalaması Türkiye ortalamasının altında olup iller arasında ekonomik gelişimde farklılıklar bu gösterge üzerinden okunabilir. Kırıkkale ve Aksaray GSYH'de güçlü durumdayken, Niğde ve Nevşehir'in ekonomik konumu görece daha geride kalmaktadır.

Bölge genç nüfus oranının Türkiye ortalamasının üzerinde olması ve özellikle Aksaray'da nüfus artışının yüksek olmasıyla dikkat çekmektedir. Bölge genelinde kırdan kente göç hızı ülke ortalamasından daha yüksek seyretmekte, bu durum kırsal nüfusun azalmasına ve merkezlerde yoğunlaşmasına yol açarak, demografik yapıyı etkilemektedir.

Eğitim ve sağlık altyapıları bölge genelinde yeterli görülmektedir; yine de bu hizmetlere erişilebilirlikte iyileştirmeler, özellikle kırsal bölgelerde, zorunludur. Bölgenin genç ve dinamik demografik bileşimi kalkınma için önemli bir varlık olarak kabul edilmektedir. Tersine, yüksek göç oranları bölge için bir zorluk oluşturmaktadır.

İşgücü ve İstihdam

TR71 Bölgesinin iş gücüne katılım oranı %48,9'dir (TÜİK, 2024). Bu değer Türkiye ortalaması olan %54,7'nin altındadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2024). Bölge içerisinde Kırşehir %44,3 ile en düşük, Nevşehir ise %53 ile en yüksek iş gücüne katılım oranına sahiptir. Bölge genelinde istihdam oranı %44,7'dir. İşsizlik oranı %8,6 ile %8,8'lik Türkiye ortalamasının çok az altındadır. Kırıkkale'de işsizlik oranı %11,8'ken, Nevşehir'de bu oran yalnızca %5,5'tir. Bölge nüfusunun büyük kısmı %51,72 hizmetler sektöründen geçimini sağlarken, %21,72 tarım sektöründe, %21,16 sanayide istihdam edilmektedir. Bölgenin iş gücü konusunda yaşadığı önemli zorlukların başında nitelikli personel açığı gelmektedir. İşletmeler bu güçlükten ötürü gelişmekte zorlandıkları için istihdam talepleri de düşük kalmaktadır.

Kültürel ve Doğal Miras

Zengin kültürel ve doğal miras dokusu ile karakterize edilen bölge, Türkiye'nin turizm potansiyeline hayati bir katkı sağlamaktadır. Ağırlıkla Nevşehir ilinde olmakla birlikte Niğde ve Aksaray'a da yayılan Kapadokya kültür ve doğa bölgesi hem yerli hem de yabancı turistler için eşsiz bir cazibe merkezidir. Bu bölge peri bacaları, yer altı şehirleri ve tarihi ambiyansı ile dünya çapında tanınmaktadır. Ayrıca Aksaray'daki Ihlara Vadisi ve Kırşehir'deki termal tatil köyleri ek önemli turizm varlıkları oluşturmaktadır.

Ulaşım ve Altyapı

TR71 Bölgesi, Anadolu'nun ortasında yer alan konumu nedeniyle ulaşım açısından stratejik olarak avantajlara sahiptir. Bölge, Türkiye'nin kritik kara yolu ağlarının bir bağlantı noktasında yer almakta ve ticaret ve lojistik operasyonlarını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, özellikle demir yolu ve hava taşımacılığındaki altyapı yatırımlarının artırılması, bölgenin ekonomik ilerlemesini daha da hızlandırma potansiyeli sunmaktadır. Bölge sınırları içinde hava yolu ulaşım altyapısı henüz yeterince güçlü değildir. Bölgenin tek havalimanı 1998 yılında faaliyete giren Nevşehir Kapadokya Havalimanı'dır. İç ve dış hat uçuşlarına hizmet veren havalimanının 3.000 metre uzunluğunda beton pisti ve 3.500 m^2 alana sahip terminal binası bulunmaktadır. TR71 Bölgesinin yakın çevresinde görece yüksek kapasiteye sahip Ankara Esenboğa, Kayseri Erkilet, Konya, Çukurova Uluslararası Havalimanları bulunmaktadır. Bölgenin güçlü yönlerinden biri kara yolu ağıdır. Türkiye'nin Güneydoğu ve Akdeniz Bölgeleri'ni İç Anadolu üzerinden ülkenin kalanına bağlayan devlet kara yolları bölgeden geçmektedir. Ayrıca 2020 yılında faaliyete açılan Ankara – Niğde otoyolu, Türkiye'nin en önemli otoyolları olan Anadolu Otoyolu ile Pozantı'dan güneydoğu yönünde Şanlıurfa'ya ve güneybatı yönünde Tarsus'a kadar uzanan otoyolları birleştirerek, Edirne'den Şanlıurfa'ya

uzanan ağını tamamlamıştır. Mersin Uluslararası Limanı bölgenin en güneydeki ili olan Niğde'ye 193 km uzunluğunda otoyol niteliğinde bir kara yolu ile bağlıdır. Ankara'dan gelen demir yolu hattı Kırıkkale il merkezinden geçtikten sonra TR71 Bölgesinin kuzey ve doğusunu takip ederek devam etmekte, ardından Boğazköy'den tekrar güneybatı istikametine yönelerek Niğde'de bölge sınırlarına tekrar girmektedir. Bu hat Niğde'den devam ederek Ulukışla'da batı istikametinde Ereğli, Karaman ve Konya üzerinden ülkenin batısına, doğu istikametinde ise önce Torosları geçerek Adana üzerinden Güneydoğu Anadolu'ya bağlanmaktadır. Ayrıca Mersin limanına kadar uzanan bir hat da mevcuttur. Demir yolu taşımacılığı açısından Niğde önemli bir konumda olduğu için TCDD tarafından Andaval Yükleme Merkezi çalışmaları devam etmektedir.

Bölgesel Kalkınma ve Stratejik Hedefler

Ahiler Kalkınma Ajansı, TR71 Bölgesinin sürdürülebilir kalkınmasını teşvik etmeyi amaçlayan çeşitli projeler ve stratejik çerçeveler oluşturmaktadır. Bu girişimler, bölgenin ekonomik ve sosyal dokusunu güçlendirmeyi ve hem Bölge içindeki hem de bölgeler arasındaki gelişimsel eşitsizlikleri azaltmayı amaçlamaktadır. Tarım, turizm, enerji ve sanayiye odaklanan projeler bölgenin rekabet gücünü artırmaya hizmet etmektedir. TR71 Bölgesi için hazırlanmış olan Bölge Planı belgesi bölge için gelecek tasarımını, öncelikli konuları, gelişme şemalarını ve bunların hayata geçirilmesine ilişkin stratejileri kapsamlı olarak ortaya koymaktadır (Ahiler Kalkınma Ajansı, 2023).

3 Güneş Enerjisi Teknolojileri ve Uygulamaları

İnsanların enerjiye olan ihtiyacı, sadece temel yaşam faaliyetlerini sürdürebilmeleri için değil, aynı zamanda modern toplumlarda konforlu bir yaşam sürebilmeleri ve ekonomik faaliyetlerini devam ettirebilmeleri için de hayati öneme sahiptir. Enerji, evlerde ısınma ve aydınlatma gibi temel ihtiyaçlardan, sanayi üretiminde ve ulaştırma sektöründe kullanılan ileri teknolojilere kadar geniş bir yelpazede kritik bir rol oynar. Bu nedenle, sürdürülebilir ve güvenilir enerji kaynaklarına erişim hem bireylerin yaşam kalitesini artırmak hem de küresel ekonomik istikrarı sağlamak adına büyük önem taşır.

Hızla gelişen ve kalabalıklaşan dünyada enerji gereksinimi, ülkelerin bağımsızlığının ana unsuru olacak ölçüde önem kazanmıştır. Pek çok ülke enerji ihtiyacını olabildiğince dış kaynaklara bağımlı kalmadan yerel kaynakları ile karşılamaya gayret etmektedir. Öte yandan Küresel İklim Krizi olgusu da sera gazı emisyonuna neden olan fosil yakıtların kullanımına kısıtlamalar getirilmesini gerekli kılmıştır.

Bu koşullar altında, güneş enerjisi, bilhassa son yıllarda düşen üretim, kurulum ve işletme maliyetleri ile temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında hızla ön plana çıkan bir kaynak olarak yerini almıştır. Güneş enerjisinin en önemli avantajlarından biri, atmosferde karbondioksit ve diğer zararlı gazların emisyonunu azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamasıdır. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve bakımı, yerel istihdamı artırarak ekonomik kalkınmaya katkı sağlamaktadır.

Sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin çevresel, ekonomik ve stratejik açılardan taşıdığı büyük önem nedeniyle, enerji üretim portföyü içindeki payının artması, yaşanabilir bir dünya sağlamak adına kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

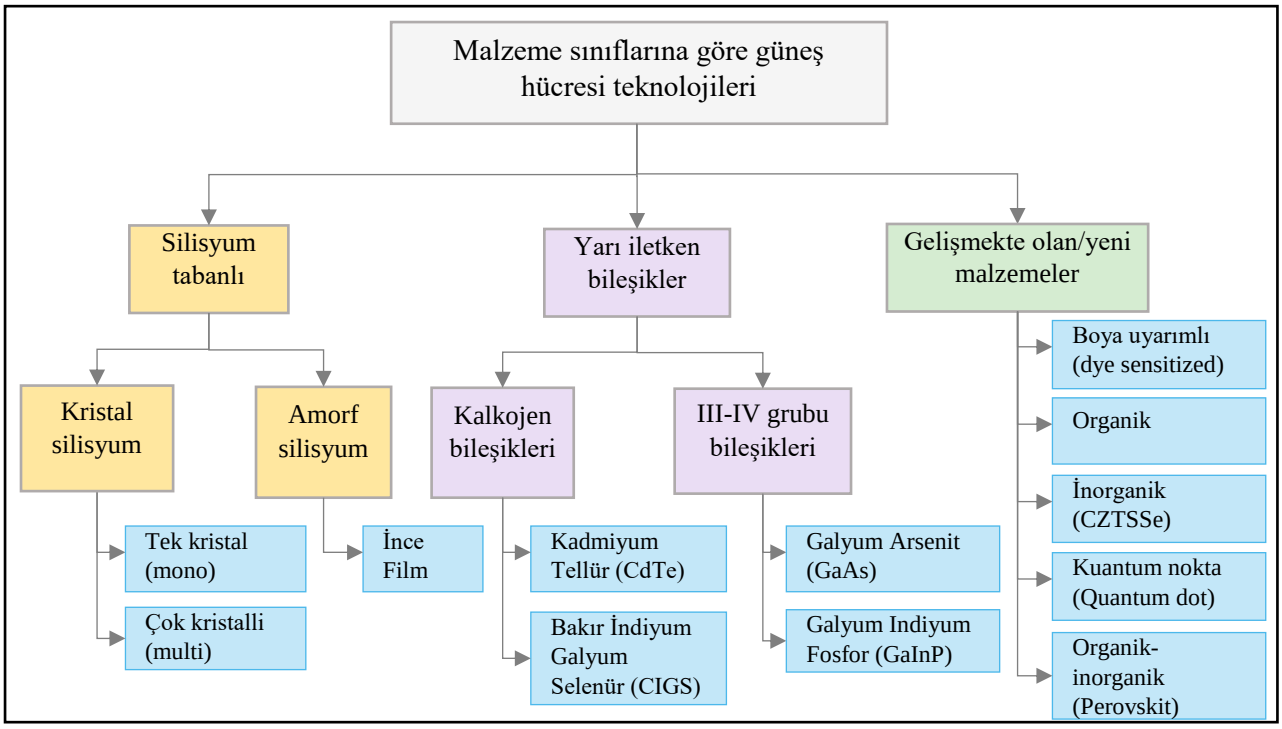
Güneş enerjisi teknolojileri, güneşin enerjisinden hem ışık hem de ısı olarak yararlanılmasına imkân sağlamaktadır. Güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine çevriminde fotovoltaik (FV) teknolojilerden faydalanılmaktadır. Isıl güneş teknolojileri ise nihai olarak ısı enerjisi elde edilmesi veya bu ısının diğer termik yöntemlere benzer şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesi için kullanılabilse de bunların güneşten elektrik üretmeye yarayan teknolojiler içindeki payı, FV teknolojilerin hızlı yükselişi ile %1'in altına düşmüştür. FV güneş enerjisi ise dünyada son 10 yılda kurulumu en hızlı artan ve maliyeti en fazla düşen elektrik üretim teknolojisi olmuştur.

3.1 FV Teknolojiler

FV teknolojilerin temel ilkesi güneşten yayılan fotonların ışığa duyarlı yarı iletken özellikteki çeşitli malzemeler tarafından soğurularak elektrik akımına dönüştürülmesi üzerine kuruludur. Güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren FV paneller, panellerden çıkan elektriği taşıyan kablolar, panelin ürettiği doğru akımı alternatif akıma dönüştüren eviriciler, elektriğin şebekeye aktarımını sağlayan diğer elektrik ekipman ve yapısal taşıyıcı bileşenler birlikte FV Sistemi oluşturmaktadır.

FV sistemler güneşten gelen ışınların içerdiği fotonları kullanarak elektrik ürettikleri için bir FV modülün üzerine düşen güneş ışınımından ne kadarının enerji üretebildiği önemli bir ölçüttür. Verimlilik adı verilen bu ölçüt sayesinde, panellerden ne kadar fazla çıktı elde edildiği ölçülmektedir. Dünya üzerindeki her nokta için coğrafi konumuna göre açık hava koşullarında yıl boyunca düşen güneş ışınımı miktarı bellidir. Aynı coğrafi konuma yerleştirilen iki panelden verimliliği yüksek olan panel daha fazla güç üretecektir. Dolayısıyla fotovoltaik teknolojilerin en temel gelişme ekseni modül güç dönüşüm verim artışı yönündedir. Yarı iletken malzemelerin sahip oldukları bant aralıklarından kaynaklanan teorik verim sınırlamaları vardır. Piyasada en yaygın teknoloji olan kristal silisyum (k-Si) için bu değer %29,43'tür (Andreani vd., 2019). k-Si dışında farklı yarı iletken malzemelerin tek başına ya da birlikte kullanılarak oluşturulan yenilikçi çok eklemli yapılar ile

güneş spektrumunun farklı bölgelerinin kullanılması sonucunda daha yüksek verim değerlerine ulaşmak mümkündür. Ancak günümüze kadar yeryüzü uygulamalarında, maliyet ve üretim kolaylığı gibi faktörler de dikkate alındığında çok eklemli güneş hücreleri yaygınlık kazanmamıştır. Kullanılan malzemelerin tip ve türüne göre sınıflandırılan FV teknolojiler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Malzeme Gruplarına Göre FV Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması

3.1.1 Kristal Silisyum Teknolojisi

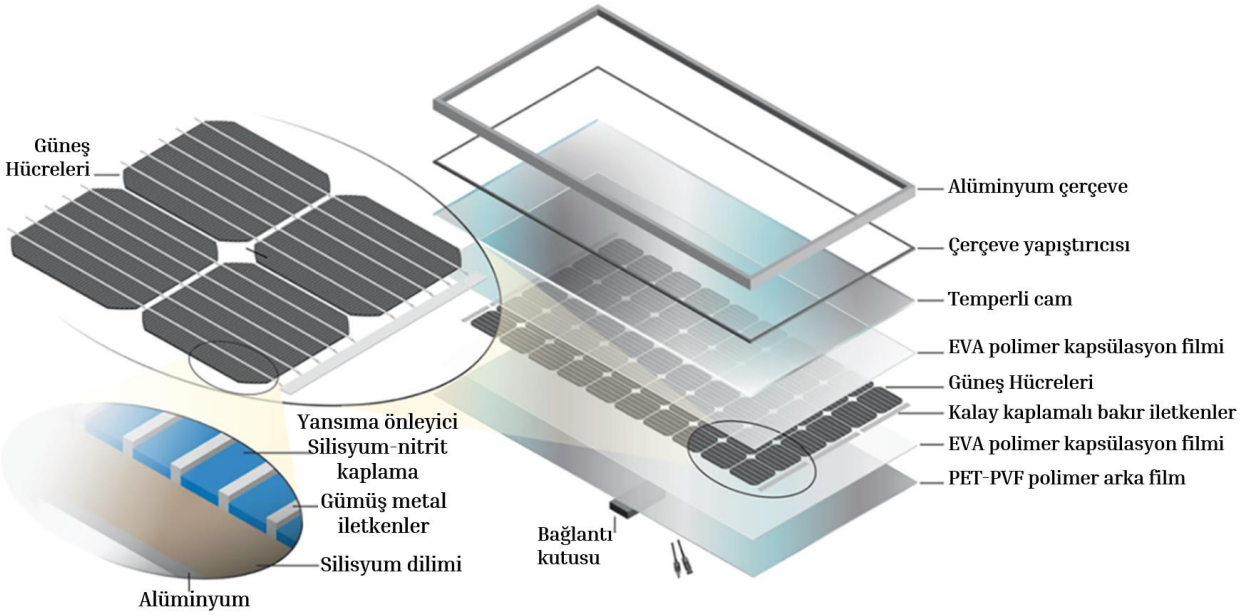
Küresel FV panel piyasasına kristal silisyum (k-Si) teknolojisi hâkimdir. Kristal silisyum fotovoltaik hücre teknolojisi, yüksek saflıkta kristal yapıdaki silisyum tabakalarına dayanan, fotovoltaik etki aracılığıyla güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren, yüksek verimliliği ve enerji dönüşüm etkinliği ile öne çıkan bir yarı iletken teknolojisidir. k-Si hücrelerden üretilen panellerin pazar payı son 10 yılda %90 ve üzerinde seyretmiş, 2021 yılı itibarıyla %95 olan değer, Temmuz 2024'te %97 oranına ulaşmıştır (Fraunhofer ISE, 2024).

Ömrünü Tamamlamış (ÖT) FV panellerin geri dönüşüm süreçlerinin anlaşılması için panellerin üretim süreç aşamalarının kavranması önemlidir. FV modül imalat değer zinciri, en basit anlamda polisilisyum saflaştırma, kütük büyütme, dilim kesme, güneş hücresi üretimi ve modül imalatı olmak üzere 5 ana basamağa ayrılabilir (Resim 1). İlk aşamada polisilisyum, metalürjik kalitedeki silisyumun en az %99,999999-%99,9999999 gibi yüksek oranlarda saflaştırılması ile elde edilir. Daha sonra yüksek saflıkta polisilisyum malzeme özel fırınlarda kristal büyütme işleminden geçirilerek kütük (ingot) foruma getirilir. Sonraki aşamada özel elmas kesiciler kullanılarak kütükten 165-175 µm inceliğinde, 156,75 mm ve 210 mm arasında değişen ebatlarda ve kare şeklinde dilim (wafer) adı verilen parçalar üretilir. Dilimler üzerine kimyasal, fiziksel ve elektriksel işlemler uygulanarak, güneş ışığı altında elektrik akımı üretebilen bir aygıt olan güneş hücresi elde edilir. Bu aşamada hücrelerde bor ve germanyum elementleri de kullanılır (Carrara vd., 2023). Hücre içinde fotovoltaik etki sonucu oluşan elektron hareketliliğinin aygıt içinden toplanarak dışarıya elektrik olarak aktarılmasını sağlamak üzere, alüminyum ve az miktarda gümüş elementlerinden oluşan iletken macunların basılması işlemine metalizasyon adı verilir. FV panellerde kullanılan gümüş, özellikle güneş enerjisi yatırımlarının hızla artması nedeniyle dünya gümüş piyasaları üzerinde etkili olacak derecede önemli bir bileşendir (Yahoo, 2023).



Resim 1: k-Si FV Hücre Üretim Süreci

Tek bir güneş hücresi yaklaşık 5 ila 8 vat gibi çok düşük güce sahip olduğu için daha fazla elektrik verimi elde edilebilmek amacıyla çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesi gerekir (Şekil 2). Bu amaçla genellikle 60 ya da 72 hücre ya bütün olarak ya da ortadan ikiye bölündükten (yarım hücre) sonra birbirlerine elektriksel olarak bağlanır. Bu bağlantı, hücrelerin bakır veya alüminyum şeritlerin kurşun ve kalay içerikli lehim ile kaynatılması ile sağlanır. Hücrelerin kullanım hayatı boyunca dış ortamın etkilerinde korunması için izole edilmesi gerekmektedir. Elbette bu koruma yapılırken, güneş ışınlarının hücrelere erişmesi engellenmemesi gerekmektedir. Hücrelerin güneşe bakan yüzleri için bu amaca en uygun malzeme olarak cam öne çıkmaktadır. Hücrelerin cam ile daha iyi birleşerek kullanım ömrünün daha da uzamasının sağlanması amacıyla, basınç ve sıcaklık altında hücreler etil-vinil asetat (EVA) adı verilen polimer bazlı termoplastik yapıştırıcı malzemeler kullanılarak cam ile kapsül içine alınır. Arka yüzde ise arka film (backsheet) adı verilen yine polivinil florür (PVF) and Polietilen tereftalat (PET) polimerlerinden oluşan filmler kullanılmaktadır. Son dönemde hem ön hem arka yüzünde cam kullanıldığı iki taraflı paneller de yaygınlaşmıştır. Kütlesel olarak en büyük bileşeni cam olduğu için panelin çarpma, bükülme, darbe alma gibi etkilerden korunması için genellikle alüminyumdan yapılan bir çerçeve içerisine sabitlenmektedir. Bu işlem için yine kimyasal yapıştırıcı ve izolasyon malzemeleri kullanılmaktadır. Son olarak paneli oluşturan hücre dizilerinin ürettiği elektriğin toplanarak dışarı aktarılması için genellikle panelin arka yüzüne içinde basit bir elektrik devre bulunan bağlantı kutusu monte edilmektedir.



Şekil 2: k-Si FV Güneş Panelinin Yapısı

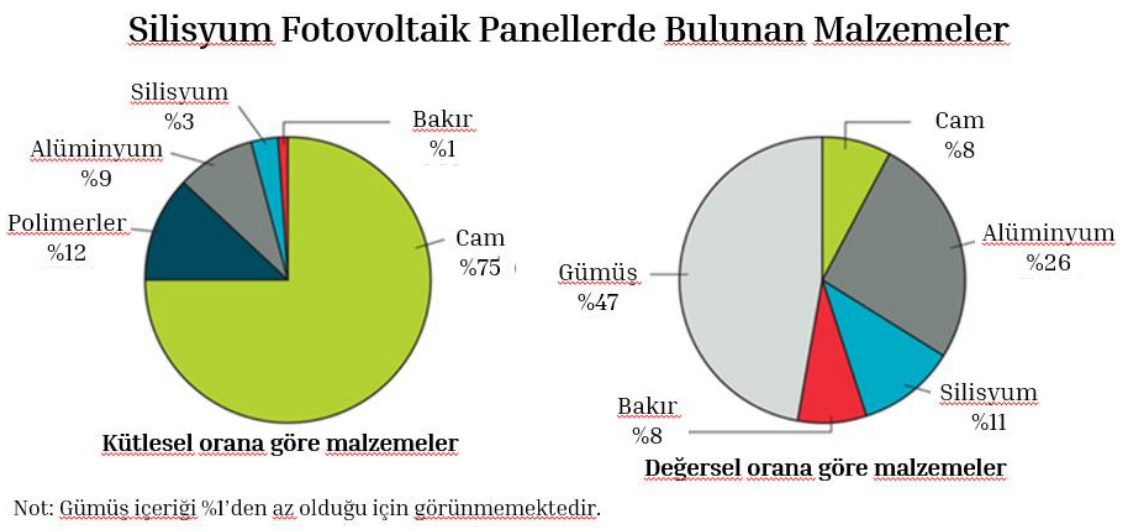
Yukarıda anlatılan k-Si FV panel yapısı genelleştirilmiş bir açıklamadır. Ancak her üretici hücre ve panel imalatında kendine özel reçeteler kullanarak, birbirinden farklılıklar gösteren ürünler çıkarmaktadır. Özellikle hücre üretim teknolojileri ve süreçleri çeşitli kimyasalları içermekte olup firmalar bu bilgileri gizli tutmayı tercih edebilmektedir. Panel bileşenlerinin hangi malzemelerden oluştuğu ve bunların yaklaşık değerleri

Deng vd.'nin 2022 tarihli çalışmasında tipik bir panel için listelenmiştir (Deng vd., 2022). Tablo 8'de görüleceği üzere hücrelerdeki yüksek saflıkta silisyum, alüminyum ve gümüşün oranları sırasıyla %4,4, %0,3 ve %0,03 oranında olmasına rağmen, geri dönüşüm açısından yüksek değere karşılık geldiği görülmektedir. Oysa panel ağırlığının %67'sine karşılık gelen solar camın değeri çok daha düşüktür. Paneli çerçeveleyen alüminyum kasa ise %16 ağırlığı ile FV hücreye yakın bir değere sahiptir.

Tablo 8: Tipik Bir k-Si FV Panelin Bileşenlerinin Oranı ve Değeri

Malzeme		**Ağırlık Oranı**	**Birim Fiyat ($/kg)**	**Geri Dönüşüm Geliri ($/m^2)**
FV Hücre	**Toplam**	**%4,73**		**3,10**
	Silisyum	%4,4	2,7	1,30
	Alüminyum	%0,3	1,5	0,05
	Gümüş	%0,03	647,0	1,79
Şerit	**Toplam**	**%0,91**		**0,56**
	Bakır	%0,8	4,4	0,38
	Kalay	%0,1	16,0	0,18
	Kurşun	%0,01	2,0	0,00
Cam	**Solar cam**	**%67**	0,091	**0,67**
Plastik	**Toplam**	**%11**		0,14
	EVA	%6,7		
	PVF	%0,8		
	PET	%2,6		
	Silisyum	%0,9		
Çerçeve	Alüminyum	**%16**	1,5	**2,70**

Deng vd. (2022) çalışmasına benzer bir başka yayında (Peplow, 2022) paneli oluşturan bileşenlerin ağırlık oranlarını ve değerlerini Grafik 1'de gösterilen oranlarda belirtmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi hücre ve panel üreticilerinin değerleri farklılık gösterdiği için bu tür çalışmalarda da değişik oranlar ortaya çıkmakta, ancak panellerin en ağır iki bileşeninin cam ve alüminyum iken en değerli bileşenlerinin gümüş, alüminyum ve silisyum olduğu gerçeği değişmemektedir. Lovato vd.'nin yaptığı bir diğer çalışmada, alüminyum çerçevesi sökülmüş FV modüllerin ağırlıklarının %77,41 ± 1,13 oranında cam, %1,6 ± 0,89 oranında metal filament, %6,77 ± 0,09 oranında FV hücre ve %14,06 ± 0,46 oranında polimerlerden oluştuğu bulgusuna ulaşılmıştır (Lovato vd., 2021)



Grafik 1: Silisyum Fotovoltaik Panellerde Bulunan Malzemeler

3.1.2 Diğer Teknolojiler

Pazarın %92'sine hâkim olan kristal silisyum dışındaki diğer teknolojiler içinde anlamlı pazar payı olan diğer malzemeler, %5 oranla kadmiyum tellür (CdTe), %2 oranla bakır indiyum galyum selenür (CIGS), %1 oranla amorf silisyum (a-Si) ve silisyuma nazaran daha geniş bant aralığı ile daha yüksek teorik verim limitine sahip olduğu için uzay araçları gibi çok özel uygulamalarda tercih edilen galyum arsenit (GaAs) olarak sıralanabilir (Ramanujam vd., 2020). CdTe, CIGS, GaAs malzemelere dayalı teknolojilerin tek eklem yapılı ve konsantre olmayan güneş ışığı altında ölçülen en yüksek laboratuvar ölçekli hücre verimleri sırasıyla %23,1 %23,6 ve %29,1'dir (NREL, 2024).

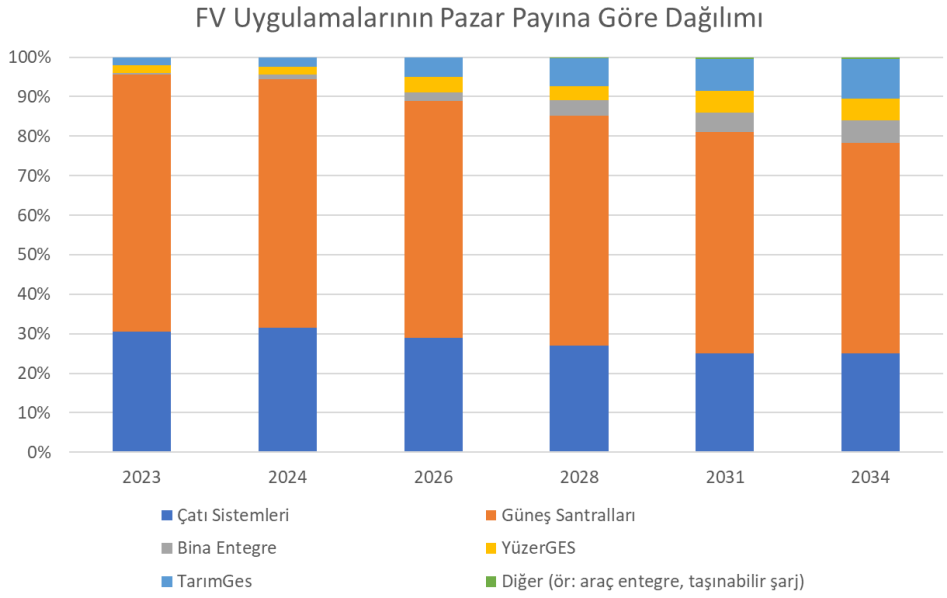
Bu tür FV paneller ve yeni/gelişmekte olan malzemelere dayalı teknolojiler, esnek de olabilen plastik veya inorganik cam gibi sabit bir yekpare zemin malzemesi üzerinde kimyasal buhar biriktirme, çözelti kaplama vb yöntemlerle katmanlar hâlinde büyütülerek oluşturulan hücre yapılarına dayanır. Üretim süreçleri gereği bu teknolojilerde değer zinciri genelde bir bütün olarak entegre şekilde tek çatı altında toplanmıştır.

Metil amonyum kurşun iyodür yapılı perovskit malzemelere dayalı hücreler ise tek başına kullanılabileceği gibi silisyum ile birlikte tandem adı verilen ikili kullanım olarak da değerlendirilebilir. Bu teknolojilerin bir arada kullanılması ile %33 verim değerlerine ulaşılması teknik olarak mümkündür. İlerleyen zamanlarda perovskit yapıların sıcaklık, nem ve ışık kararlılığı kaynaklı performans kayıplarına dair sorunların aşılması ile yukarıda bahsedilen verimlerin altındaki değerlerde dahi kristal silisyum hücrelere kıyasla daha düşük elektrik üretim maliyetlerine erişmek mümkün olabilmesi beklenmektedir.

Çin menşeli üreticilerin son yıllarda k-Si tabanlı hücre teknolojilerine ağırlık vererek maliyetleri düşürmeleri pazarın büyük kısmını ele geçirmeleri sonucunu doğurmuştur. Bu nedenle ince film teknolojilerine dayanan paneller sektördeki kullanım oranları %5'ler gibi çok daha düşük kalmaktadır. Maliyet düşüşü sonucu k-Si ile rekabet edebilirliği sağlayacak bilimsel ve teknolojik gelişmeler olmadığı müddetçe, ince film teknolojilerinin bu konumunun fazla değişmesi beklenmemektedir. Gelecek 10 yılda gündeme gelecek teknolojilerin k-Si varyasyonları olarak süreceği öngörülmektedir.

3.2 FV Uygulamaları

Güneş enerjisi sektöründe panel ve modül sözcükleri dönüşümlü olarak kullanılır. Güneş enerjisini diğer yenilenebilir enerji teknolojileri arasında ön plana taşıyan unsurlardan biri de ölçeklenebilir olmasıdır. Günümüz koşullarında her biri 500-600 kW civarında olan standart FV modüllerden istenilen miktarda bir araya getirilerek, kullanıcının enerji gereksinimini karşılayacak güçte santral kurulumu basit ve fazla zaman gerektirmeyen bir süreçtir. FV panellerin en yaygın kullanımı sistem düzeyinde şebekeye bağlı büyük ölçekli güç üretebilen Güneş Enerjisi Santralleri (GES) olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra özellikle geniş ve düz çatısı olan ticari işletmelerin, fabrikaların ve benzeri binaların çatılarına GES kurularak binanın gereksiniminin karşılanması da çok yaygın bir uygulama alanıdır. FV uygulamalarının 2023 yılı itibarıyla yaklaşık %64'ü şebekeye bağlı güç santrallerinden, %31'i çatı tipi GES'lerden oluşmaktadır (Grafik 2). Merkezi santraller ve çatı kurulumları dışında çift amaçlı kullanıma yönelik yenilikçi FV uygulamaları da diğer ülkelerle birlikte Türkiye'de giderek yaygınlaşmaktadır. Bunlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.



Grafik 2: FV Uygulamalarının Pazar Payına Göre Dağılımı

TarımGES

FV modüllerin bitkilerin büyüme uzunluklarına ve insan veya motorlu tarım aracı çalışmasına uygun olacak yükseklikte tarım arazileri üzerine monte edilmesi ile hem alışılagelmiş tarım süreçlerinin sürdürülmesi hem de yaratılan gölgelenme yoluyla bitkilerin sıcaktan korunması, bu şekilde buharlaşmanın ve dolayısı ile su kaybının önlenmesi ve aynı zamanda dolu, don gibi doğrudan bitki üzerine düşerek fiziksel zarar oluşturabilecek etkilerin engellenmesi amaçlanır. Japonya 2021 yılı itibarıyla 500-600 MW arasında bir kapasiteye ulaşan 1.800 adet TarımGES uygulaması gerçekleştirmiş; Fransa, Almanya, İsrail ve Hollanda'da da sırasıyla 300, 150, 100 ve 45 MW TarımGES'e özel ihale çağrıları açılmıştır (IEA PVPS vd., 2022). Ayrıca tam olarak raporlanmamak ile birlikte Çin'de de önemli miktarda TarımGES kurulumu olduğu bilinmektedir.

YüzerGES

Göller, denizler, barajlar, su kanalları gibi su yüzeyine kurulabilecek yüzer sistemler ile alan kullanımı bakımından yenilenebilir enerji türleri içinde en dezavantajlı olan FV güneş santrallerinin toprak arazilerini işgal etmeden elektrik üretmesi ve aynı zamanda buharlaşmanın azaltılarak su kaynaklarının korunmasına katkı sağlanabilir. Diğer yandan suyun soğutma etkisi sayesinde sıcaklık artışından negatif etkilenen FV panellerin elektrik üretim performansı artabilir. Hidroelektrik santrallerde baraj üstüne kurulan YüzerGES'lerde şebeke bağlantısından da faydalanılabilir. Dünyadaki en büyük YüzerGES320 MW olarak

2022 Ocak ayında Çin'de kurulmuş olup Kore ve Endonezya'da her biri 2 GW'tan büyük dev YüzerGES'lerin kurulumu planlanmaktadır (SolarPower Europe & Schmela, 2022).

Diğer entegre sistemler: Hâlihazırda bir yapıya, cihaza, araca ait olan yüzeyin genelde uygulama ve kullanım amacına yönelik özel tasarımlara sahip FV paneller kullanılarak kaplanması ile oluşturulan yapısal/mimari tasarımlardır. Bina cephelerine estetik görünüm de gözetilerek farklı renk, geometri ve dizilim tasarımlarında yapılan FV uygulamalar (Bina Entegre); fosil yakıt kullanan taşıtların iklimlendirme sistemlerindeki elektrik ihtiyacını veya elektrikli araçların enerji ihtiyacının bir kısmını sağlamak üzere taşıtların tavanına veya çeşitli yüzeylerine yapılan FV uygulamalar (Taşıt Entegre); parklar ve bahçeler gibi ortak kullanım alanlarında şarj üniteleri gibi sistemler üzerinden ücretsiz enerji sağlayan veya otoban kenarlarına ses bariyeri görevi görecek şekilde dikey yerleştirilen FV uygulamalar; bataryalı veya bataryasız küçük aygıtlara, aletlere IoT cihazlarına, entegre sistemler bu grupta değerlendirilebilir.

4 Türkiye'de ve TR71 Bölgesinde Güneş Enerjisi Faaliyetleri

4.1 Türkiye'de Güneş Enerjisi

4.1.1 Üst Politika Belgeleri ve İlgili Mevzuat

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından 19 Ocak 2023 tarihinde yayımlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı ile 2035 yılına kadar kapasite ve üretim olarak enerji kaynak dağılımının gelişim hedefleri belirlenmiştir (ETKB, 2023). Bu planda güneşin yeri Tablo 9'de özetlenmiştir. Bu tabloda görüleceği üzere, 2035 yılına gelindiğinde, Türkiye'nin toplam kurulu gücünün dörtte birinden fazlasının güneş enerji santrallerinden oluşması öngörülmektedir. 2024 yılı itibarıyla 15 GW olan kurulu gücün 52,9 GW seviyesine çıkması, mevcut kurulumların 3 katına kadar çıkması anlamına gelmektedir.

Tablo 9: Türkiye Ulusal Enerji Planı'na Göre Güneş Enerjisinin Elektrik Enerji Arzındaki Yeri

Yıl	Güneş Kurulu Güç (GW)	Güneşin Toplam Elektrik Kurulu Gücündeki Oranı (%)	Güneşin Toplam Elektrik Üretimdeki Oranı (%)
2025	17,9	15,4	7,4
2030	32,9	22,1	11,5
2035	52,9	27,9	16,5

Orta Vadeli Program 2023-2025 ve İklim Şurası 2022 kararları gibi güncel politika belgelerinde güneş enerjisi kurulumların artırılması yönünde çabaların dışında yerli Ar-Ge ve imalatın da desteklenmesi konularına değinilmiştir.

Özellikle İklim Şurası 2022 kararları 89. maddede bulunan, "Yüksek verime ve yaşam ömrüne sahip, hafif, esnek ve maliyet-etkin; bina, araç, tarım ve su yüzeyi gibi uygulamalara sinerjik ve ergonomik olarak entegre edilebilecek FV hücre, panel ve sistemler geliştirilmelidir" ifadesi ile hem farklı uygulamalar ile yenilikçi hem de yüksek performans talebi ile rekabet edebilir ürünlerin geliştirilmesi öngörülmüştür. Güneş termal ısı teknolojileri için ise 90. maddede, yüksek verimli yoğunlaştırılmış ısıl güneş enerjisi sistemleri ve bileşenleri geliştirilmesine yönelik teknolojik odaklar belirtilmiştir. Ayrıca 12. maddede yer alan "Isıtma ve soğutmada emisyon azaltımı için ısı pompası, bölgesel ısıtma (jeotermal, biyokütle vb.) ve güneş kollektörlü ısıtma uygulamaları yaygınlaştırılmalıdır" ifadesi ile daha çok konut, ticarethane, kamu binaları için iklimlendirme veya sıcak su temini için kullanılan yoğunlaştırmasız güneş termal toplayıcılara değinilmiştir.

Türkiye'de güneş enerjisinden lisanslı ve lisanssız olmak üzere iki tür elektrik üretimi mümkündür. Yatırımcının öncelikli olarak kendi ihtiyacını karşılamasına uygun lisanssız yatırım türünde, tüketilmeyen enerji fazlasının şebekeye beslenmesi ve ihtiyaç duyulduğunda da şebekeden elektrik çekilmesi mümkündür. Mevcut durumda 50 kW ve altındaki mesken abone grupları hariç, üretim fazlasının yalnızca tüketilen elektrik miktarı kadarı satışa konu edilebilmektedir. Lisanssız modelde, üretim lisansı ve ön lisansı almadan ve şirket kurma zorunluluğu olmadan, yönetmelikte tanımlanan çeşitli istisnalar haricinde genel olarak 1 MW kurulu gücü aşmayacak şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı şebekeye bağlı elektrik üretim santral yatırımı yapılabilir.

Güneş elektriği için 10 yıl alım garantisi ve 5 yıl yerli katkı ilavesi destek fiyatları, 1/5/2023 tarihinde 32177 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 7189 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı ile güncellenmiştir. Buna göre, kararın

çıktığı tarihten önce alınan destekler için geriye dönük geçerli olmamak şartı ile 1/7/2021'den 31/12/2025 tarihine kadar işletmeye girecek tesislerde, destek fiyatı 106 TL kuruş/kilovat-saat, yerli katkı ilavesi 8,80 TL kuruş/kilovat-saat, taban fiyat 4,95 ABD dolar sent/kilovat-saat ve tavan fiyat 6,05 ABD dolar sent/kilovat-saat olarak belirlenmiştir. Bu fiyatlarda üç ay sıklıkla güncelleme yapılacaktır.

Diğer yandan güncel durumda 09.10.2016 tarihli 29852 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) Yönetmeliği kapsamında yapılan yarışmalar ile lisanslı güneş enerjisi santrallerinin kurulumu teşvik edilmektedir. Bu zamana kadar beş YEKA GES yarışması ilan edilmiş; bunlardan ikincisi iptal edilmiş, beşincisi ise henüz gerçekleştirilmemiştir. YEKA yarışmalarının temel amacı, hem yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik enerjisinin şebekedeki payının artırılması hem de güneş ve rüzgâr gibi kaynaklara dayalı konvansiyonel olmayan elektrik üretimi teknolojilerinin yerlileştirilmesi yönünde destekler sağlamaktır. Bu kapsamda ETKB tarafından ilan edilen sahalara belirlenen kapasitelerde GES yatırımı yapmak isteyen firmalar, belli bir tavan fiyat üzerinden eksiltme usulü ile yarışmaya katılır ve kazanan firmaların bu alanlara kurdukları santrallerden üretilen elektriğe belli süre (YEKA GES 1 ve 3) veya belirli üretim miktarına kadar (YEKA GES 4 ve 5) alım garantisi ve 30 yıl lisans hakkı verilir. Bu yatırımlarda değerlendirilecek aksamın ve santral bileşenlerinin ihaleyi kazanan firma tarafından yurt içinde imal edilmiş olması (Yurt İçinde Üretim Karşılığı Tahsis (YÜKT)) veya yurt içinde imal edilmiş ürünlerin kullanılmış olması (Yerli Malı Kullanım Karşılığı Tahsis (YMKT)) gibi temel şartlar mevcuttur. YEKA GES1 hariç diğer ilgili yarışmalar YMKT şartı ile düzenlenmiştir.

Ayrıca, 02.11.2013 tarihli ve 28809 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanmış olan Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği kapsamında kesintisiz enerji sağlanması amacıyla lisansa konu diğer elektrik üretim tesisleri ile ana kaynağın lisans gücünü geçmeyecek şekilde güneş enerjisi santrallerinin kurulumuna ve işletilmesine ve güneş enerjisi santrallerinin lisans kapasitesi kadar depolama ünitesi kurulmasına izin verilmektedir.

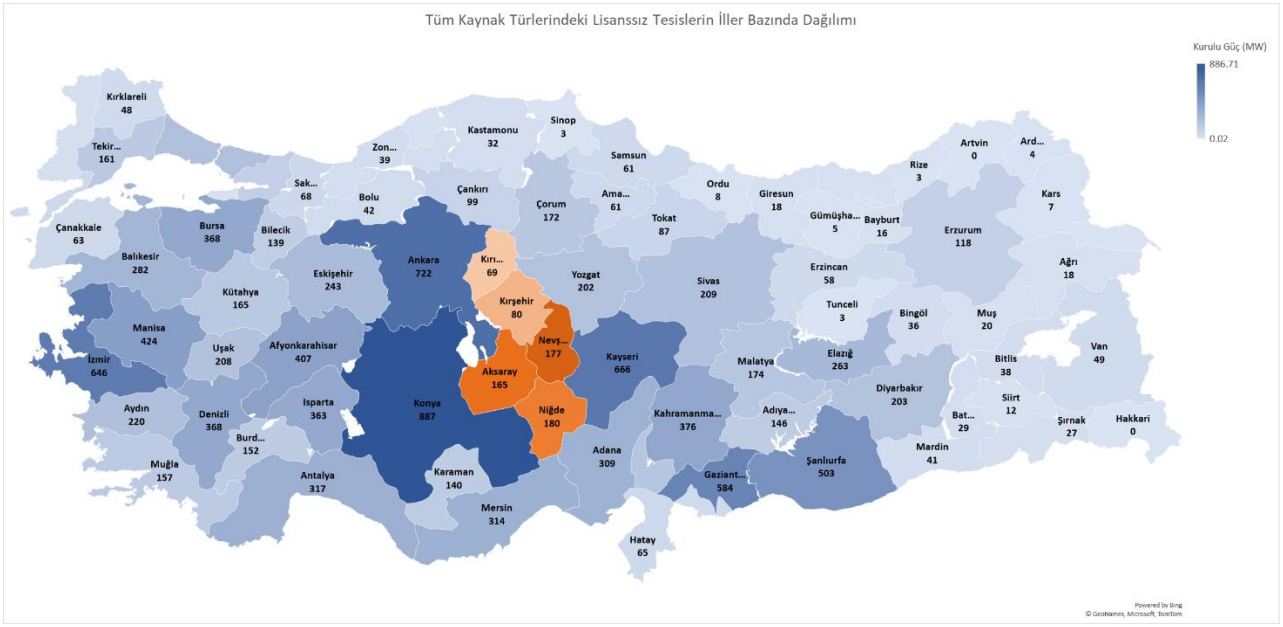
4.1.2 Güneş Enerjisi Üretimi ve Sanayisi

Türkiye'de birincil enerji kaynağı arzı içindeki güneş enerjisinin %58'i elektrik enerjisi olarak, kalan %42'si ise ısı enerjisi olarak tüketilmektedir. TEİAŞ tarafından yayımlanan Türkiye Elektrik İstatistikleri'ne göre, 2024 yılı Kasım ayı sonu itibarıyla Türkiye'nin toplam 115.056 MW olan kurulu gücü içinde güneşe dayalı tesislerin kapasitesi 19.425 MW'a ulaşmıştır (TEİAŞ YTBS, 2024).

EPDK tarafından yayımlanan 2023 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu'nda yer alan verilere göre 2023 yılı sonu itibarıyla toplam gücü 1.668,81 MW_e olan 39 adet güneş enerjisine dayalı üretim lisansı almıştır. Henüz ön lisans aşamasında olan GES projelerinin sayısı 402, toplam gücü 14.454,21 MW_e olarak bildirilmiştir. 2023 yılında lisanslı güneş santrallerinden 4.161,98 MWh güç elde edilmiş olup bu değer toplam lisanslı üretimin sadece %1,34'lük kısmını oluşturmuştur.

6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun 14'üncü maddesinin birinci fıkrasında lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutulan üretim tesisleri tanımlanmaktadır. EPDK'nın 2023 Piyasa Gelişim Raporu'na göre, 2023 yılı sonu itibarıyla toplam lisanssız güneş enerjisi kurulu gücü 12.333,60 MW_e'dir. Bu miktar tüm lisanssız elektrik üretimleri arasında GES'lerin %94,58'lik oranla ezici bir çoğunlukta olduğunu göstermektedir. 31.11.2024 tarihi itibarıyla lisanslı GES sayısı 44 adetken, lisanssız tesislerin sayısı 30.797 adettir (TEİAŞ YTBS, 2024). 2023 yılında lisanssız santrallerden elde edilen elektrik enerjisinin %97,62'lik kısmı GES'lerden sağlanmıştır. Piyasa Gelişim Raporu'nda iller bazındaki elektrik kurulu güçleri kaynak bazında ayrıştırılmadan verilmiş olmasına rağmen, toplam kurulu lisanssız gücün neredeyse tamamı güneşten üretildiği dikkate alınırsa, lisanssız GES'lerin özellikle Konya, Ankara, Kayseri, İzmir, Gaziantep ve Şanlıurfa illerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Grafik 3). Bütün bu verilerden de anlaşılacağı üzere Türkiye'de güneşten elektrik üretimi çok büyük oranda lisanssız elektrik üretim mevzuatı çerçevesinde

yapılmaktadır. Lisanssız üretim modeli genellikle öz tüketim ihtiyacını karşılamak amacıyla tasarlanmış olup güneş enerjisi uygulamalarının Türkiye'nin hemen her bölgesi için yerinde bölgesel üretim ve tüketime imkân sağlamaktadır. Güneş elektriği Türkiye için şehirleşme ve tüketici tarafına yönelik düzenlemeler ile birlikte kapsamlı şekilde planlandığında iletim yatırımları ve bağlantı kayıpları gibi gereksinim veya sorunları da bertaraf edebilecek çok daha yaygın bir temiz enerji türü niteliği taşımaktadır.



Grafik 3: 2023 Yılı İtibarıyla İller Bazında Lisanssız Elektrik Üretim Kurulu Güçleri

Türkiye'de çok canlı bir güneş enerjisi sanayisi hareketliliği de söz konusudur. Resmî olmayan verilere göre, bir kısmı aktif üretim yapmayan, yaklaşık 80 modül üreticisi mevcut olup bunların yıllık üretim kapasitelerinin yaklaşık 30 GW olduğu, yaklaşık olarak üçte birinin aktif üretim yaptığı tahmin edilmekte, ancak bu konuda resmî olarak yayımlanmış güvenilir bir kaynak bulunmamaktadır. TR71 Bölgesinde Kırıkkale il sınırları için Alfa Solar firması modül üretmektedir.

FV modül üretimi dışında aktif olarak hücre, dilim ve kütük üretimi yapan YEKA GES 1 kapsamında kurulmuş olan Kalyon PV firması vardır. İzmir Aliağa'da faaliyet gösteren Smart Güneş Enerjisi firmasının 800 MW hücre üretim kapasitesine sahip olduğu Kamuyu Aydınlatma Platformuna yaptıkları bildirimlerden anlaşılmaktadır. Yine Kamuyu Aydınlatma Platformuna yapılan açıklamada CW Enerji firmasının hücre ve ingot üretimi ile ilgili devlet desteği aldığı görülmektedir. Ayrıca, başka sanayicilerin de hücre üretimine yönelik girişimleri olduğu bilinmektedir. Bu firmaların yanı sıra daha önce tesis kurulumunu tamamlamış olmasına rağmen sonraki süreçte hücre üretimine son vermiş firmalar olduğu da bilinmektedir. TR71 Bölgesi sınırları içerisinde Bor Organize Sanayi Bölgesinde (OSB) yerleşik GTC Güneş Sanayii ve Ticaret AŞ firmasının henüz devreye alınmamış hücre üretim hattı olduğu bilinmekle birlikte hücre üretimi yapıldığına dair bilgi bulunmamaktadır.

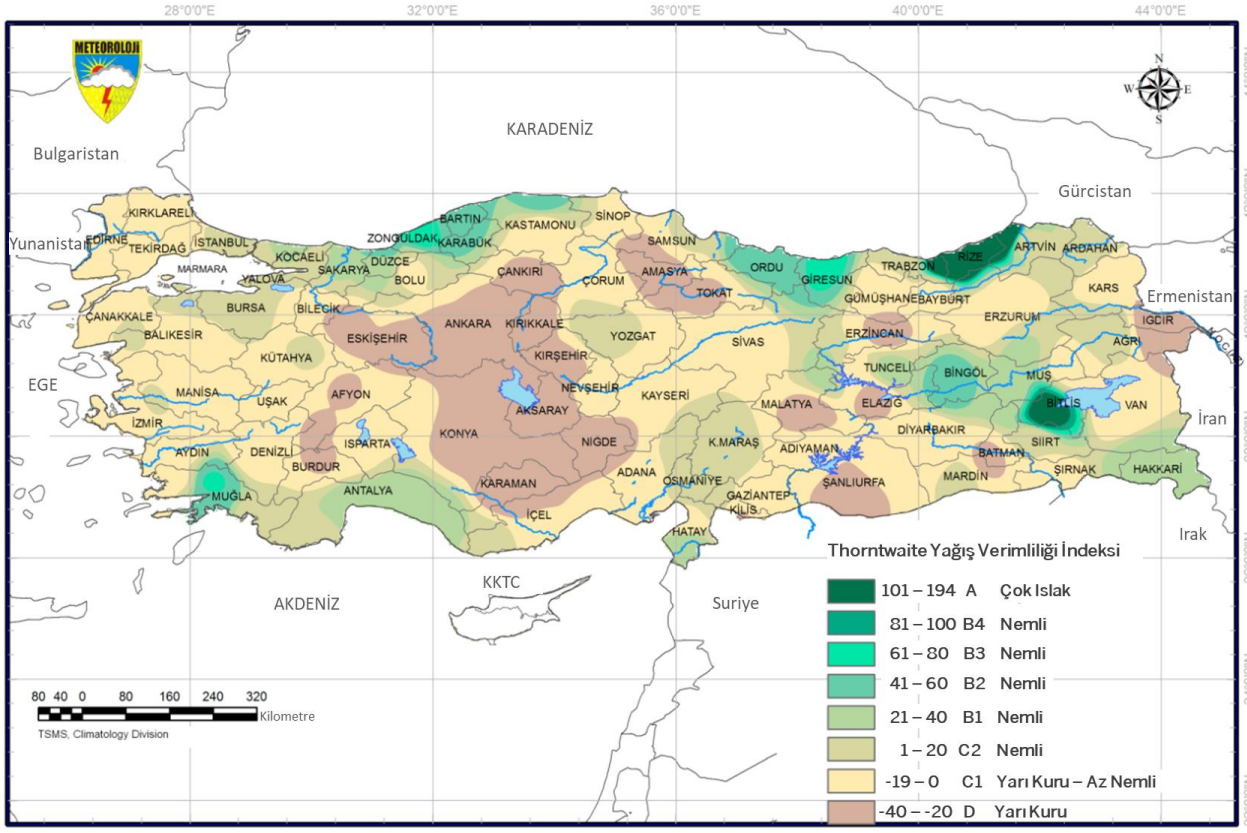
GES ekipman imalatı yapan firmaların daha çok İç Anadolu Bölgesinde kümelendiği ve Marmara Bölgesinin bunu takip ettiği görülmektedir. FV imalatının yüksek teknoloji sınıfına girmesi, nitelikli iş gücü bakımından gerekli ihtiyacı karşılayabilecek bölgelerde yatırım yapılması gereksinimini doğurmaktadır. Modül üretiminde kullanılan diğer bileşenlerden güneş camı, alüminyum çerçeve, modülden çıkan elektrik tellerinin birleştiği bağlantı kutusu üretimi de yerli olarak mevcuttur. Türkiye güneş camı ihtiyacının %35'i Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. (Şişecam) firması tarafından sağlanmaktadır. Bağlantı kutusu üretimi yapan

firma sayısı da son yıllarda artmıştır. Hem cam hem de bağlantı kutusu için iç ihtiyacı daha fazla karşılamaya yönelik olarak mevcut üreticiler tarafından yeni kapasite artışları planlanmaktadır.

4.2 TR71 Bölgesinde Güneş Enerjisi

4.2.1 TR71 Bölgesinin Güneş Enerjisi Kaynağı

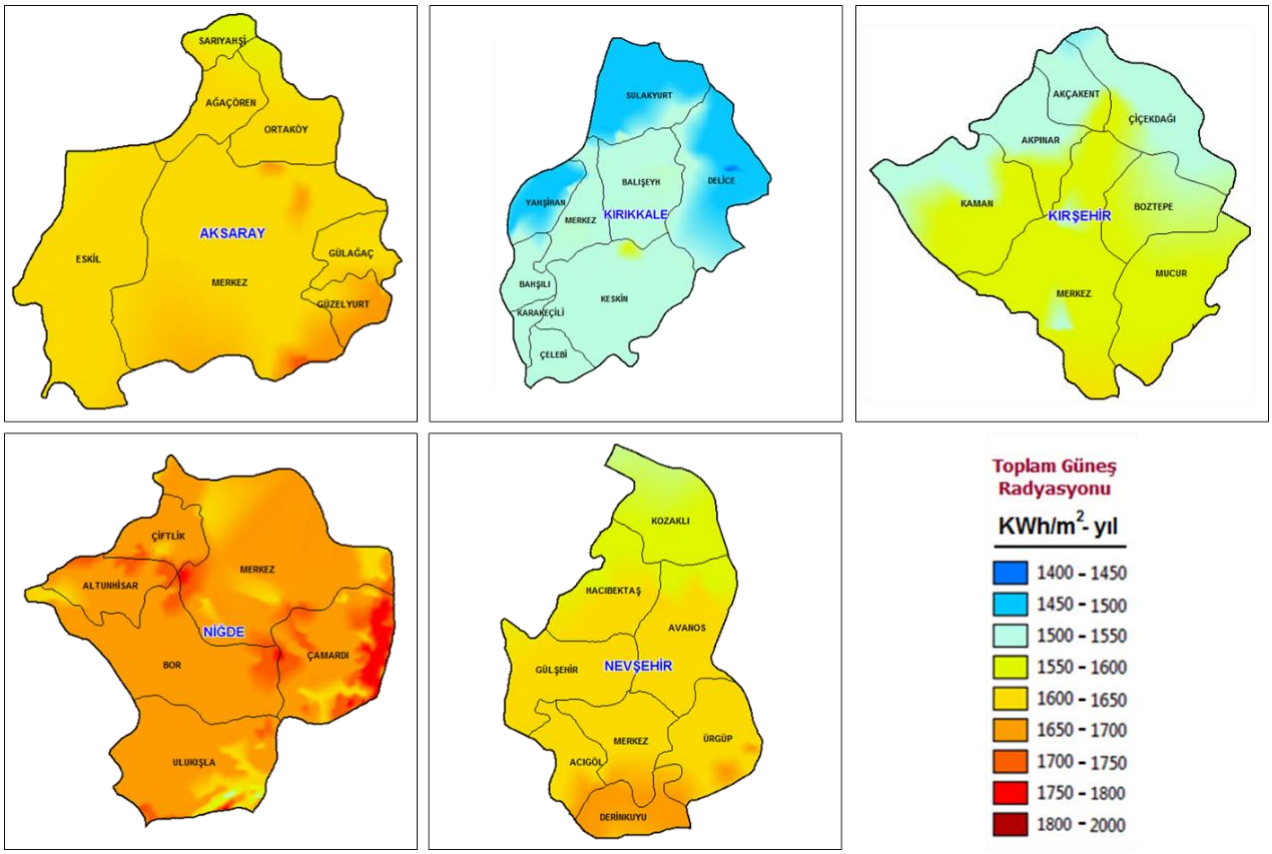
Kış aylarında kutupsal, yaz aylarında tropikal hava kütlelerinin etkilediği Türkiye çok sayıda iklim türünün bir arada gözlemlendiği nadir ülkelerden biridir. Ülkenin 3 tarafının denizlerle çevrili olması, ülkenin iç bölgesindeki yüksek Anadolu platosunun kuzey ve güneyde yüksek dağ sıraları ile sınırlanmış olması bu çeşitliliği daha da güçlendirmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yağış verimliliği indeksi baz alınarak Türkiye'nin iklim koşullarının sınıflandırıldığı çalışma sonucunda elde edilen Türkiye İklim Sınıflandırması Haritası, Grafik 4'te sunulmuştur (Şensoy vd., 2008). Harita kutup iklimi sınıfı dışındaki tüm ana iklim sınıflarının Türkiye'de gözlemlediğini göstermektedir. TR71 Bölgesi illeri Yarı Kuru – Az Nemli ve Yarı Kuru olarak tanımlanan iklim koşullarının etkisi altındadır. Bu iklim koşulları genellikle az bulutluluk ve düşük yağış ile ön plana çıkmakta olup bu durum FV güneş santralları için yıllık güneşlenme süresinin uzun olması anlamına gelmektedir.



Grafik 4: Türkiye İklim Sınıflandırması

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli hakkında ön bilgi sağlamak amacıyla hazırlanan bir çalışma olup iller ve ilçeler bazında güneşlenme süreleri ve toplam güneş radyasyonu değerleri verilmektedir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kilovat-saat/m^2 olarak hesaplanmıştır.

TR71 Bölgesindeki illerin GEPA kaynaklarında yayımlanan tematik güneş radyasyonu haritaları Grafik 5'te sunulmaktadır. Tematik haritalar güneş radyasyonu değerlerinin bir il içerisinde ne şekilde dağıldığının renk kodları ile görselleştirildiği grafiklerdir.



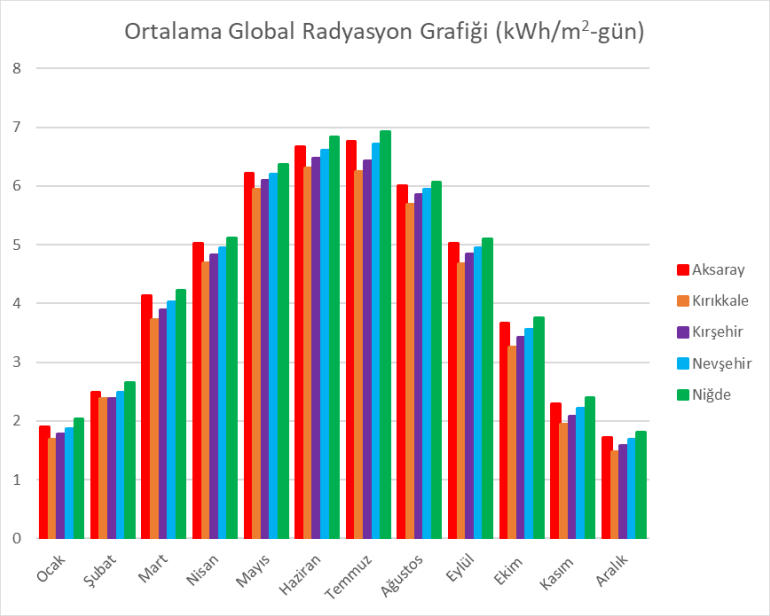
Grafik 5: GEPA Verilerine Göre TR71 İllerinde Güneş Enerjisi Potansiyeli

TR71 Bölgesi illerinin günlük ortalama güneş radyasyonu verileri Tablo 10'te verilmiştir. Tabloda yer alan veriler, son satır hariç olmak üzere, ilgili ayın ortalama bir gününde 1 m^2 alana düşen güneş ışınlarının gücünü göstermektedir. Örneğin buna göre Ocak ayının ortalama bir gününde Aksaray'daki 1 m^2 alana düşecek güneş enerjisinin gücü 1,9 kilovat-saat olarak öngörülmektedir. Tablonun son satırında ise 1 m^2 alana bir yıl boyunca düşecek toplam güç bilgisi verilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, bu verinin güneş radyasyonu verisi olduğu, bu gücün ne kadarının FV panel tarafından elektrik enerjisine çevrilebileceğinin kullanılan panelin verimlilik değerine bağlı olduğudur. Örneğin %22 verim değerine sahip ve yüzey alanı 2 m^2 olan bir FV panel Niğde'de ortalama bir yılda 1.561 kilovat-saat/m^2-yıl * 2 m^2 * %22 = 686,64 kilovat-saat elektrik üretecektir. İller bazındaki veriler incelendiğinde, ortalama global radyasyon verileri açısından illerin Niğde, Aksaray, Nevşehir, Kırşehir ve Kırıkkale olarak sıralandığı görülmektedir. Bu veriler grafik olarak Grafik 6'da verilmektedir. Türkiye ortalaması olan 1.527,46 kilovat-saat/m^2 değerini sadece Niğde geçmektedir.

Tablo 10: TR71 Bölgesinde Aylar Bazında Ortalama Global Radyasyon (kilovat-saat/m^2-gün)

	Aksaray	Kırıkkale	Kırşehir	Nevşehir	Niğde
Ocak	1,90	1,68	1,78	1,87	2,03
Şubat	2,48	2,38	2,38	2,48	2,65
Mart	4,13	3,72	3,89	4,03	4,23
Nisan	5,03	4,69	4,83	4,95	5,11
Mayıs	6,22	5,95	6,09	6,20	6,37
Haziran	6,67	6,31	6,47	6,61	6,84
Temmuz	6,76	6,25	6,42	6,71	6,92

Ağustos	6,00	5,69	5,85	5,94	6,06
Eylül	5,03	4,68	4,84	4,95	5,1
Ekim	3,66	3,26	3,43	3,56	3,76
Kasım	2,29	1,95	2,08	2,22	2,39
Aralık	1,71	1,47	1,58	1,68	1,81
Yıllık (kilovat-saat/m2-yıl)	**1.523**	**1.412**	**1.458**	**1.503**	**1.561**

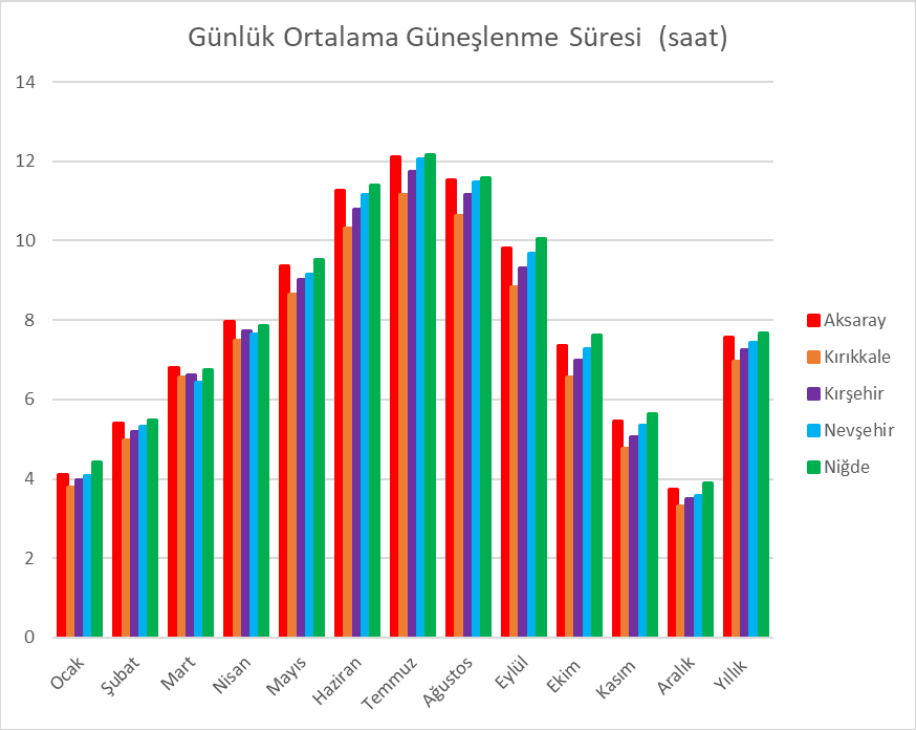


Grafik 6: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Ortalama Global Radyasyon Grafiği

Güneş enerjisi açısından önemli parametrelerden bir diğeri de güneşlenme süresidir. TR71 Bölgesi illeri için Tablo 11'te verilmiş olan aylar bazında günlük ortalama güneşlenme süreleri incelenecek olursa diğer illere göre daha güneyde yer alan Niğde'nin güneşlenme süresinin daha uzun olduğu, diğer illerin Aksaray, Nevşehir, Kırşehir ve Kırıkkale olarak sıralandığı görülmektedir. Beş il arasında sadece Kırıkkale, 2.741 saat olan Türkiye ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin altındadır. İllerin güneşlenme süreleri Grafik 7 ile sunulmuştur.

Tablo 11: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Günlük Ortalama Güneşlenme Süresi Verileri (Saat)

	Aksaray	**Kırıkkale**	**Kırşehir**	**Nevşehir**	**Niğde**
Ocak	4,11	3,79	3,97	4,07	4,41
Şubat	5,4	4,99	5,18	5,32	5,48
Mart	6,8	6,57	6,61	6,43	6,74
Nisan	7,97	7,48	7,72	7,65	7,85
Mayıs	9,36	8,66	9,02	9,16	9,51
Haziran	11,27	10,32	10,78	11,17	11,39
Temmuz	12,12	11,17	11,73	12,05	12,16
Ağustos	11,53	10,63	11,15	11,48	11,57
Eylül	9,81	8,84	9,32	9,68	10,06
Ekim	7,36	6,57	6,98	7,27	7,61
Kasım	5,45	4,76	5,07	5,35	5,65
Aralık	3,73	3,31	3,51	3,57	3,9
Yıllık	**7,57**	**6,95**	**7,26**	**7,43**	**7,67**



Grafik 7: TR71 Bölgesi İllerinin Aylar Bazında Günlük Ortalama Güneşlenme Süresi Grafiği

4.2.2 TR71 Bölgesinin Güneş Enerjisi Santralleri

Güneş kaynağı açısından genel olarak Türkiye ortalaması yakınlarında kaynaklara sahip olan TR71 Bölgesi illeri güneşten elektrik üretilmesine yönelik GES santralleri açısından da yoğun aktiviteye sahne olmaktadır. Lisanssız GES kurulumlarının Türkiye'de yaygınlaşmaya başladığı 2015 yılından itibaren bölgede bu konudaki faaliyetler başlamıştır. Lisanssız GES'ler temelde ruhsat sahibi elektrik abonesinin öz tüketimini karşılamak amacı taşımakta birlikte, özellikle lisanssız GES kurulumu yapılan ilk dönemlerde YEKDEM desteği kapsamında 1 MW kurulu çok sayıda santral kurulmuştur. Daha sonra mevzuat değişiklikleriyle tamamını öz tüketimde harcayarak YEKDEM'den yararlanmamak kaydıyla 1 MW üzerinde de santral kurulmasına izin verilmiştir.

TR71 Bölgesi illerinin GES kurulu güç bilgileri, 18.10.2024 tarihi itibarıyla TEİAŞ'tan edinilmiştir. Bu veri seti Aksaray, Kırıkkale, Kırşehir, Nevşehir ve Niğde illerinde güneş kaynağından elektrik üreten lisanssız ve lisanslı tesislerin kurulu güçlerini içermektedir. Listelenen GES'lerin ilçe bazında dağılımı, tesisin devreye giriş tarihi ve teknolojisi hakkında bilgi bulunmamaktadır.

TR71 Bölgesi illeri kurulu güç değerlerine göre sıralandığında 475 MW ile Niğde ilk sırada yer almakta, Nevşehir 200 MW ile ikinci, Aksaray ise 193 MW ile üçüncü sırada gelmektedir. Kırıkkale ili 90 MW, Kırşehir ili 83 MW kurulu güce sahiptir. Niğde'deki kurulu gücün yüksek olmasının sebebi bu ilde yer alan ve toplam kurulu güçleri 236 MW olan 4 lisanslı GES'tir. Yenilenebilir Kaynak Alanları Yönetmeliği kapsamında ETKB tarafından Niğde Bor'da 26 bin hektar arazi yaklaşık 1 GW gücünde güneş enerjisi tesisine tahsis edilmiş olup bu santralların kurulumu aşamalı olarak devam etmektedir. Bunun dışında, Niğde'de yer alan lisanssız GES'lerin kurulu güç toplamı 239 MW olup bu değer diğer illere yakın bir değerdir. Bölgenin toplam kurulu gücü 1.313 MW'dir. YEKA yatırımları tamamlandığında, TR71 Bölgesi Türkiye'nin en yüksek kurulu güce sahip Düzey 2 bölgelerinden biri konumuna gelecektir.

EPDK verilerine göre Niğde ilinde mevcut 236 MW kurulu güç dışında, 140 MW ve 15 MW güçlerinde iki GES daha lisans almıştır. Diğer illerde GES lisansı bulunmamaktadır. Lisanslı olup yardımcı kaynak olarak güneş enerjisi kullanmak üzere ilgili üretim lisansı sahibi firmalar Kırıkkale'de 60 MW, Kırşehir'de 59 MW, Nevşehir'de 19 MW Niğde'de 15 MW ve Aksaray'da 3 MW lisans düzenlemesi yapmışlardır. Bunların

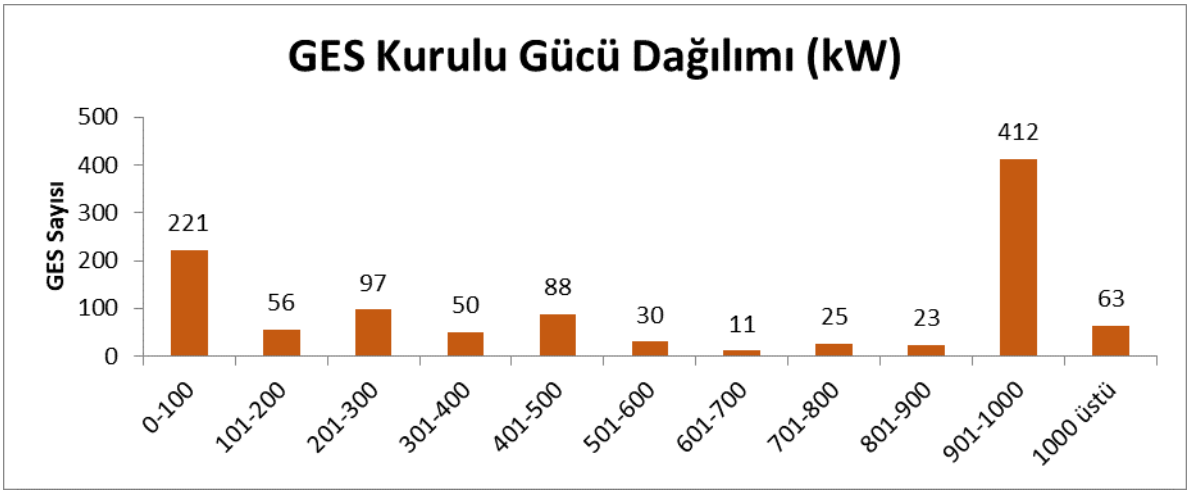
dışında tüm illerde ön lisans aşamasında projeler olmakla birlikte lisansa dönüşüp dönüşmeyecekleri belli olmadığı için bu çalışma kapsamına alınmamıştır.

Lisanssız GES'lerin kurulu güç limitleri nedeniyle, kurulan tesislerin çoğu düşük kurulu güçlere sahiptir. Bölge genelinde GES'lerin ortalama kurulu gücü 0,78 MW olarak hesaplanmıştır (Tablo 12). Bölgedeki lisanssız GES'ler Aksaray'da 276 adet, Kırıkkale'de 108 adet, Kırşehir'de 98 adet, Nevşehir'de 327 adet ve Niğde'de 268 adet olmak üzere toplam 1.077 tesisten ibarettir. En büyük kurulu güce sahip santraller 11 MW, 10,01 MW ve 9,9 MW'tır. 5 MW üzerinde 14 adet, 1 ila 5 MW arasında 49 adet GES bulunmaktadır.

Tablo 12: TR71 Bölgesi Lisanssız GES Verileri

	Aksaray	Kırıkkale	Kırşehir	Nevşehir	Niğde	TR71
Toplam Kurulu Güç	192,62	90,33	82,9	200,36	239,17	**805,43**
GES Sayısı	276	108	98	327	268	**1.077**
Ortalama Kurulu Güç	0,70	0,84	0,85	0,61	0,89	**0,78**
Azami Kurulu Güç	9,84	3,75	5,90	11,00	10,01	**11,00**
Asgari Kurulu Güç	0,005	0,004	0,005	0,003	0,005	**0,003**

Bölgedeki GES'lerin kurulu güç değerlerinin dağılımı Grafik 8'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde lisanssız GES'lerin kurulu güç limiti olan 1 MW civarında yoğunlaştığı (%38) dikkati çekmektedir. Diğer bir yoğunlaşma da 0-0,1 MW bandında bulunmaktadır ki bu durum öz tüketim gereksinimlerine yönelik düşük kurulu güce sahip çatı sistemlerinin yaygınlaştığını göstermektedir.



Grafik 8: Kurulu Güç Bazında GES'lerin Dağılımı

4.2.3 TR71 Bölgesinin Güneş Enerjisi Sanayisi

Güneş enerjisinden elektrik üretiminin Türkiye'de yaygınlaşmasına paralel olarak, artan iç talebi karşılamak üzere güneş paneli üretim tesislerinin de sayısı hızla artmıştır. FV güneş paneli üretim tekniklerinin anlatıldığı bölümde de ayrıntıları verildiği üzere, panel üretimi görece kolay süreçler içermekte olup üretim hattının kurulumu kısa sürede ve uygun maliyetlere yapılabilmektedir. Bu sebeplerle, FV panel üreticilerinin sayısı hızla artarak yaklaşık 80 civarına ulaşmıştır. Panel üretimi sektöründe faaliyet gösteren firmalardan Alfa Solar

Enerji A.Ş.'nin fabrikası Kırıkkale'nin Yahşihan ilçesindeki Kırıkkale OSB'de yer almaktadır. 2011 yılından beri sektörde yer alan firma 40.000 m² kapalı alanda kurulu tesislerinde 1,3 GW/yıl FV panel üretim kapasitesine sahiptir.

TR71 Bölgesinde güneş enerjisine yönelik üretim yapmak üzere tesis kurmuş bir diğer firma GTC Güneş Sanayi ve Ticaret A.Ş.'dir. 2013'ten itibaren Adıyaman'da FV panel üretim hattı çalıştıran firma, 2020 yılında Niğde Bor Karma ve Deri OSB'de yıllık 150 MW kapasiteye sahip çift yüzlü monokristal PERC hücre üretim hattı kurduğu bilgisi bulunmakla birlikte firmanın hücre üretimi yaptığına dair kamuya açık kaynaklara yayılmış bir gösterge bulunmamaktadır.

Milsan firması Niğde Bor Karma ve Deri OSB'de Pixel markası altında FV sektörüne yönelik eviricilerin üretimi yapmaktadır. Firmanın 5 kW ila 300 kW arasında çeşitli seviyelerinde evirici ürünleri bulunmaktadır.

5 FV Panel Atık Miktarları

5.1 ÖT FV Panellerin Ömrünü Tamamlama Süresi

Fotovoltaik sistemler için ömür tanımı, "FV sisteminin rutin bakım ve onarımlar ile birlikte, elektrik üretme yeteneğinde ciddi bir bozulma olmadan çalışmaya devam ettiği süre" olarak tanımlanmaktadır (Hsu vd. 2012). Bu tanım FV panellerinden ziyade bir bütün olarak FV sistemlere atıfta bulunsa da FV paneller için de kullanılması uygundur.

Tipik bir FV panelin ana bileşenleri, güneş hücreleri, dâhili devre, kapsülleme malzemesi, cam, arka film, çerçeve ve bağlantı kutusundan oluşur. FV panelin ömrünün erken aşamasında, üretim hatalarından kaynaklanan arızalar meydana gelebilir. Ambalajlama, taşıma ve kurulum sırasında yanlış kullanım da erken aşamalarda kayıplara yol açabilir. Başarıyla kurulduktan sonra, güneş panelleri zamanla çeşitli bozulma türlerine maruz kalabilir. FV panel montaj işlemi nispeten kolay bir süreç olmasına rağmen, her bir ana bileşen kendi niteliği çerçevesinde bozulmaya eğilimlidir ve bu da belirli arızalara neden olabilmektedir (Aghaei vd. 2022). Güneş hücreleri, Potansiyel Kaynaklı Bozulma (PID), Işık Kaynaklı Bozulma (LID) ve Işık ve Yüksek Sıcaklık Kaynaklı Bozulma (LETID) gibi tipik bozulma senaryolarına maruz kalabilir. Bu bozulmalar, güç kaybına ve sıcak noktaların oluşmasına neden olur. Panel içerisindeki hücreleri birbirine bağlayan bağlantılar korozyona uğrayabilir; bu da akım azalmasına, sıcak nokta oluşumuna ve hücre izolasyonuna yol açabilir. Kapsülleme malzemesi ve arka film, akım azalmasına, hücre izolasyonuna veya korozyon artışına neden olabilen foto-oksidasyona maruz kalabilir. Panelin üst katmanını oluşturan camda kırılma, kirlenme ve aşınma gibi hasarlar oluşabilir. Bu bozulma desenlerinin yanı sıra, FV panelleri, üretim sırasında oluşan kusurlar ve nakliye, kurulum ve işletim sırasında yanlış kullanımdan zarar görebilir. FV teknolojisindeki ilerlemeler, önümüzdeki 10 yıl içinde modül bozulma oranlarında azalmalar vadetmektedir (Fischer, 2024). Bunların dışında, dolu fırtınaları, yoğun kar yükleri ve yangın gibi şiddetli çevresel koşullar ve dış faktörler nedeniyle kullanım dışı kalmaları mümkündür.

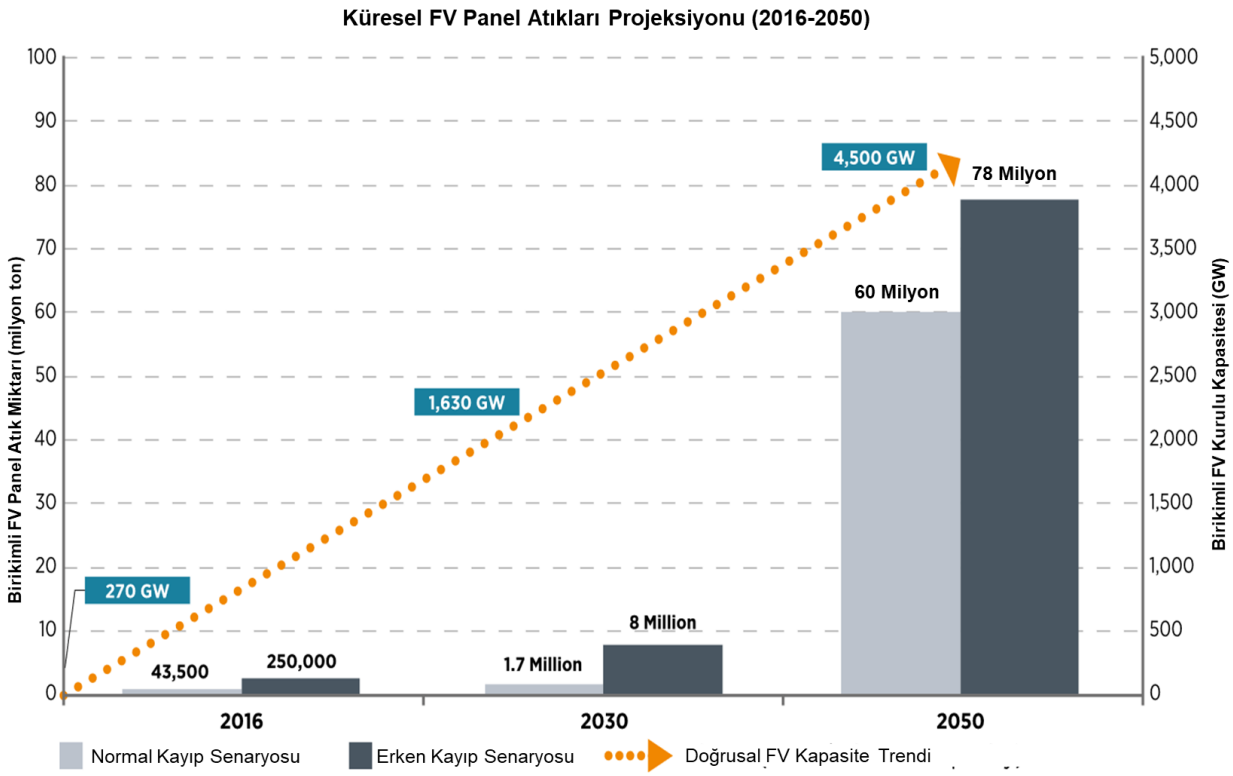
FV panel imalatı ve tedariki yapan firmaların çoğu 25 yıl performans garantisi vermektedir. Diğer pek çok sanayi ürünü ile karşılaştırıldığında, bu süre çok belirgin şekilde uzun olup bunu mümkün kılan işlem kapsüllemenin çok iyi yapılarak hücrelerin çok iyi korunmasıdır.

Tüm FV panellerde, işletme ömürleri boyunca kademeli bir verim düşüşü gözlemlenmektedir. Panelin verimliliği başlangıç verimliliğinin %80'ine düştüğünde, FV panel ekonomik ömrünü tamamlamış kabul edilir. Orta Avrupa'daki 85 FV santrali üzerine yapılan bir çalışmada, (Libra vd. 2023) çok daha kısa ömürlerin, yani 10-12 yıl gibi düşük sürelerin nadir olmadığını bildirmektedir. Eğer bu erken bozulma veya hasar senaryolarından hiçbiri gerçekleşmezse, bir FV panelin 25-30 yıl verimli bir şekilde çalışması beklenir. Tipik FV panellerin yaşam beklentisi 30 yıl olarak belirlenmiştir (Alsema vd. 2009), teknoloji ve üretim yöntemlerindeki gelişmelerle bu sürenin önümüzdeki yıllarda 40 yıla uzaması beklenmektedir (Fischer, 2024).

5.2 Dünyada ÖT FV Panel Atık Öngörüsü

Yarı iletken teknolojisinin ortaya çıkışı birkaç 10 yıl önce FV panellerin üretimine olanak tanımıştır. Ancak, FV paneller 1990'ların sonlarına kadar yaygınlık kazanamamıştır. FV panel fiyatlarında yaşanan hızlı düşüş (Fischer, 2024) ve Asya ve Güneydoğu Asya ülkelerinin, özellikle de Çin'in ulaştığı büyük tedarik kapasiteleri ile dünya genelinde FV santrallerinin kurulumu son birkaç 10 yılda önemli ölçüde artmıştır.

FV atık miktarlarının gelecekteki öngörüleri hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış olmakla birlikte bunları çoğu ülkesel veya bölgesel ölçektedir. Konuyu küresel ölçekte ele alan en kapsamlı çalışma Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) ve Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı'nın (IEA PVPS) iş birliği ile gerçekleştirilmiştir (Weckend vd., 2016). Bu çalışma, FV panellerinin normal ömrünü tamamlaması senaryosunu ve erken kayıp senaryosunu dikkate almaktadır. 2050 yılına kadar üretilecek FV atık miktarı, normal kayıp ve erken kayıp senaryolarında sırasıyla 60 ve 78 milyon ton olarak tahmin edilmektedir (Grafik 9). Bu çalışmaya göre, normal kayıp senaryosunda, Almanya'nın 4,3, Hindistan'ın 4,5, Japonya'nın 6,5, ABD'nin 7,5 ve Çin'in 13,5 milyon ton FV atığı olacaktır. Bir başka çalışmada, Song vd., Çin'in normal kayıp FV atığını 72 milyon ton olarak tahmin etmişlerdir ki bu, önceki çalışmada öngörülenden beş kat daha fazladır (Song vd., 2023). Çin'deki güneş enerjisinin diğer ülkelere göre hızlı büyümesi dikkate alındığında, IRENA ve IEA PVPS raporunun 2050 tahminlerinin gelecekteki yeniden değerlendirmelerde, bu oranda olmasa da artması muhtemeldir.



Grafik 9: Küresel FV Panel Atıkları 2050 Projeksiyonu

Güneş enerjisi, iklim değişikliği ile mücadelede en öne çıkan seçeneklerden biri olarak görülmektedir. Birleşmiş Milletler Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan Altıncı Değerlendirme Raporuna (IPCC, 2023) göre, güneş enerjisi enerji arzına bağlı iklim sorunları için en önemli azaltım seçeneğidir ve yıllık net emisyon azaltımına 4,5 milyar ton karbondioksit eş değeri miktarında katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Bu bilgi, iklim krizini ele almak için FV panellerin kurulumunun gelecekte artmaya devam edeceğini açıkça göstermektedir (IEA, 2023). Güneş panellerinin ortalama ömrü göz önüne alındığında, 2050 sonrası ÖT FV panellerinin miktarının artmaya devam edeceği çok açıktır. 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için 2021 ve 2050 arasında güneş FV kapasitesinin yirmi kat artması gerekmekte olup bu kapasitenin %70 oranında küresel elektrik üretimine ulaşması beklenmektedir (IEA, 2021). 2021'de küresel kurulu kapasitenin 760 GW olduğu göz önüne alındığında, 2050 yılına kadar kurulu kapasitenin 15 TW'ye ulaşması beklenmekte olup bu da 2080-2090 yılları arasında eş değer miktarda atık oluşacağı anlamına gelmektedir (IEA PVPS, 2021).

5.3 Türkiye'de ÖT FV Panel Atık Öngörüsü

Bölüm 5.2'de belirtildiği üzere, FV panel geri dönüşümü ile ilgili literatürde en fazla referans olarak kullanılan kaynak IRENA ve IEA PVPS tarafından 2016 yılında hazırlanan analiz raporudur (Weckend vd., 2016). Raporda hem dünya geneli hem de aralarında Türkiye'nin de bulunduğu bazı ülkeler için 2020, 2030, 2040 ve 2050 yılları için normal kayıp ve erken kayıp senaryolarına göre atık miktarı öngörülerini ton cinsinden verilmektedir. Buna göre Türkiye'nin 2030, 2040 ve 2050 ÖT FV panel atık miktarı normal kayıp senaryosuna göre 1.500, 20.000 ve 200.000 ton, erken kayıp senaryosuna göre ise 11.000, 100.000 ve 400.000 ton olarak öngörülmektedir. FV atık miktarlarının gelecekteki FV panel kurulumlarından yola çıkarak hesaplandığı çalışmada IRENA'nın 2014 yılı ocak ayında yayımladığı 2030 Yenilenebilir Enerji Yol Haritası raporunun temel alındığı ifade edilmektedir. Ocak 2014 itibari ile Türkiye'nin FV kurulu gücünün yalnızca 40 MW olduğu TEİAŞ verilerinden görülmektedir (TEİAŞ, 2024). Zaten raporda da kamu otoritelerinin gelecek hedeflerinden söz edilmektedir. Yıllar içinde Türkiye'de güneş enerjisi hızla gelişmiş ve 2024 yılı sonu itibarıyla, 2023 yılında yayımlanan Türkiye Ulusal Eylem Planı'nda 2025 için belirlenen 17,9 GW hedefini aşarak 19,4 GW seviyesine ulaşmıştır (TEİAŞ YTBS, 2024). Bu açıdan bakıldığında, raporda Türkiye için yapılan FV panel atık öngörüsünün çok daha üzerinde atık miktarları karşılaşılması şaşırtıcı olmayacaktır.

Bu konuda daha güvenilir kaynaklar, Türkiye'den araştırmacıların yaptığı çalışmalar olması beklenir. Yapılan literatür çalışmalarında konuyla ilgili henüz yeterli bir analiz yapılmadığı görülmektedir. Türkiye'nin FV atık öngörüsüne ilişkin en kapsamlı veriler 2023 yılında Birtürk ve Çeliktaş'ın yaptığı bir yayında bulunmaktadır (Birtürk & Çeliktaş, 2023). Bu çalışmada Türkiye'nin 2019-2022 yılları arasındaki kurulu güç gelişimi ve bu gelişim hızının aynı eğilimde devam edeceği varsayımı ile ileriye doğru yapılan projeksiyon kullanılmıştır. Elde edilen projeksiyon verilerinde 2035 yılı tahminleri, ETKB tarafından belirlenen Türkiye Ulusal Enerji Planı'ndaki 2035 güneş enerjisi hedefi ile uyumlu olması çalışmanın FV panel tahminlerinin tutarlı olduğu sonucu vermektedir. FV panellerin devre dışı kalma yollarının oluşma olasılıklarına ilişkin varsayımlar da dikkate alınarak FV atık öngörüsünü kestiren bir modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, eğer hiçbir geri dönüşüm uygulanmazsa, 2050 yılında Türkiye'de toplam 1.706.159 ton ÖT FV panel atığı birikeceği sonucuna ulaşılmıştır. Fakat bu çalışmada FV panel atıklarının teknoloji bazında ayrışmasına yer verilmediği için bu miktar içinde k-Si ve diğer panel türlerinin ne kadar olacağı bilgisine ulaşılamamaktadır. Dünya genelindeki k-Si panellerin toplam FV panellere oranı ve panellerin ortalama malzeme bileşen tabloları kullanılarak bu verilere ulaşılması mümkündür.

Türkiye'deki FV atık öngörüsü ile ilgili bir diğer çalışma da Artaş vd. tarafından 2023 yılında yapılmıştır (Artaş vd, 2023). Bu çalışmada da diğerleri gibi öncelikle Türkiye'nin FV kurulu güç projeksiyonunu yapmakta, daha sonra bu veriye dayalı olarak FV panel atıklarının miktarını tahmin etmektedir. Çalışmada 2030 yılı için FV kurulu güç öngörüsü 18.9 GW olarak ifade edilmekte olup TEİAŞ verilerine göre bu seviye Kasım 2024 yılı itibarı ile aşılmış durumdadır (TEİAŞ YTBS, 2024). Ayrıca çalışmada ifade edilen geleceğe dönük atık miktarlarının IRENA IEA PVPS raporu ile aynı değerleri taşıyor olması dikkat çekmekte olup sunulan sonuçlardan FV panel atık miktarı öngörüsüne dair yeni bir çıkarım elde edilememektedir.

Başta FV panel üretimi yapan firmaların temsilcileri olmak üzere güneş enerjisi sektörü paydaşları ile görüşmeler yapılmıştır. Bu görüşmelerde, panel üretim sürecinde yaşanan hasarlardan ötürü en fazla %1 oranında imalat atıklarının oluştuğu ve bunların elektronik atık firmalarına verildiği belirtilmiştir. Ancak firmalardan bazılarının atıkları bedel karşılığı verirken, bazı firmalar atıkları alması için firmaya ödeme yapıldığı bilgisini vermektedir. Buradan anlaşılacağı üzere sektör aktörleri FV atık yönetimi konusunda ortak bir tavır geliştirmiş gibi görünmemektedir. Sahaya gittikten sonra hasarlanıp geri gelen panellerin miktarının da toplam üretimin %1'i kadar bile olmadığı, bu hasarların da çoğunlukla nakliye aşamasında yaşandığı ifade edilmiştir. Hatta kimi firmaların nakliye araçlarını hassas sensörlerle donatarak, taşıma sırasında fiziksel şoka

maruz kalan modüllerin sahada montaj öncesinde ileri tekniklerle test ettiği bilinmektedir. Kullanım sırasında FV panel hasarlarının önemli bir kısmının yorgun mermi olarak adlandırılan havaya sıkılan mermi çekirdeklerinin paneller isabet etmesi sonrası oluştuğu ilginç bir bilgi olarak not etmeye değerdir. Türkiye'de 2016 – 2020 aralığında devreye alınan santrallerin büyük kısmının finansal olarak geri dönüşlerinin tamamlandığı, bu santrallerin bazılarında yeni teknolojinin kullanıldığı gençleştirme projelerinin başladığı belirtilmiş olup bu gençleştirme sürecinden çıkan panellerin çok büyük bir kısmının hâlen çalışır durumda oldukları için ikinci el olarak kullanıma devam edilmesi seçeneklerinin ön plana çıktığı, dolayısıyla henüz FV atık niteliğine geçmeleri için erken olduğu ifade edilmiştir. Ancak bazı uzmanlar ise panellerin dış ortam koşullarına dayanmaları için taşıyıcı yapılara çok sağlam bağlantı elemanları ile sabitlendiğini, dolayısıyla bunların özel teknikler kullanılmadan sökülmelerinin panellerde verim düşürücü hasarlara yol açarak ikinci el değerlerini düşüreceği hatta hurda niteliğine getirebileceği yönünde görüş belirtmişlerdir.

Bu raporun hazırlanması sürecinde yapılan görüşmelerden, ETKB Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi ile Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yenilenebilir Enerji ve Yeni Teknolojiler Dairesi iş birliği ile Türkiye'nin FV atık öngörüsünün belirlenmesine yönelik çalışmaların başlatıldığı ve ortaya çıkacak potansiyel FV atıkların geri dönüşümü ile sağlanacak ekonomik ve çevresel faydaya yönelik bir rapor hazırlanması çalışmaları devam ettiği bilgisi alınmıştır.

6 Sürdürülebilirlik ve Çevre Perspektifinden ÖT FV Paneller

6.1 ÖT FV Panellerin Çevresel Etkileri

Sera gazları emisyonları nedeniyle çevreye zararlı fosil yakıtların yerini almak için en ön plandaki alternatif olan FV panellerin de ömür döngüsünün her aşamasında çevreye çeşitli ölçülerde etki yaratmaktadır.

FV panel ömür döngüsü ham madde temini, polisilisyum saflaştırma, kütük oluşturma, hücre imalatı, panel imalatı, nakliye ve kurulum, işletme, söküm ve ömür sonu aşamalarından oluşmaktadır. FV paneller için ihtiyaç duyulan cam, alüminyum ve polimerlerin yanı sıra, polisilisyum imalatı için gerekli olan silisyumun elde edilmesi için kuvars madenciliği yapılmasının çevre üzerinde etkileri bulunmaktadır. Polisilisyumun saflaştırılması için ihtiyaç duyulan 1.500-2.000° C sıcaklıkları üreten elektrik ark fırınlarının çok fazla elektrik tüketimi söz konusudur. Aynı şekilde polisilisyum kullanılarak kütük oluşturulması da yüksek enerji tüketen fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Kütükten dilime geçiş aşamasında ise çok sayıda kesme dilimleme işlemleri yapılmakta, yüksek su tüketiminin yanı sıra, kesme sonucu oluşan ve kerf olarak adlandırılan talaşın da atık yönetimi gerekmektedir. Dilimden FV hücreye geçiş sürecindeki işlem adımlarının su tüketimi de önemli ölçüdedir. Ayrıca bu işlemlerde bazı tehlikeli kimyasalların kullanımı söz konusu olduğu için çevresel riskler mevcuttur. FV modül üretimi genellikle enerji tüketimi dışında görece az çevresel etkisi olan bir süreçtir.

Kullanıma hazır hâle gelen panellerin sahaya nakliyesi sonucunda hem ambalaj atıkları hem de taşıtların emisyonları söz konusudur. GES tesisi kurulum işlemlerinin de çevresel etkisi, özellikle diğer elektrik üretim tesisleri düşünüldüğünde, görece düşüktür. GES'lerle ilgili en önemli çevresel etki arazi kullanımının fazla oluşudur. 1 MW santral kurulumu için yaklaşık 10.000-12.000 m^2 arazi gereksinimi vardır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında bu arazi kullanım yoğunluğu bir hayli fazladır. FV modülleri taşıyan yapısal elemanlar genellikle çelik konstrüksiyon olup zemine metal kazıklar çakılması yolu ile sabitlenmeleri yeterlidir; beton temel gerekmemektedir. GES tesislerinin çevre açısından en olumlu yönü, yakıt nakliyesinden kaynaklı bir emisyon olmaması ve elektrik üretim sürecinin de herhangi bir atık ve emisyon üretmemesi ve gürültüsüz çalışmasıdır. Sistemler hareketli parça içermediği için trafolar dışında, kimyasal yağ tüketilmemektedir. Bu aşamada yaşanan çevresel etkiler parlama-yansıma etkileri, görsel kirlilik ve kimi santrallerde uygulanan temizlik işlemlerinin yarattığı su tüketimidir (Bevk ve Golobič, 2020). Ayrıca literatürde ısı adası etkisinden de söz edilmektedir (Demirezen vd., 2022).

Ömrünü tamamlayan GES'lerin yapısal montaj elemanları ve kablolar hurda olarak değerlendirilirken, FV paneller, eviriciler ve diğer elektrik ekipman elektriksel ve elektronik atık kategorisinde değerlendirilmektedir.

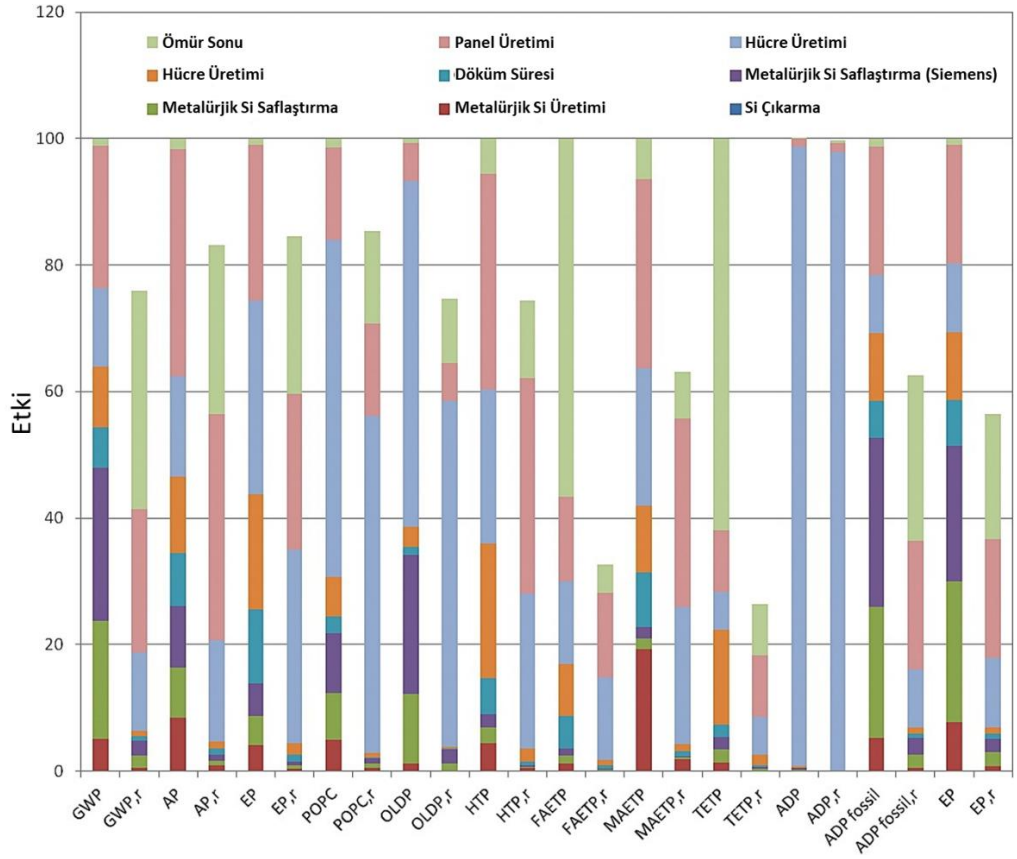
İçeriğinde bakır, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller ile etilen vinil asetat, polietilen tereftalat ve poliviniliden flüorit gibi polimer malzemeler barındıran FV panellerin uygun geri dönüşüm süreçlerine tabi tutulmadan katı atık depolama sahalarına terk edilmeleri hâlinde çevreye etkileri olacağı açıktır (Cheema vd., 2024). Bu etkilerin başında toprağa sızma ve yayılma bulunmaktadır (Fthenakis, 2012). k-Si tabanlı panellerin ana bileşenleri silisyum hücreler, cam, arka tabaka, kapsülasyon polimerleri, alüminyum çerçeve ve plastik ağırlıklı bağlantı kutusudur. Burada hücrelerin üzerindeki gümüş iletkenlerin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Fakat yaygın olarak kullanılan k-Si FV panellerin atık depolamada çevreye zararlı tehlikeli madde sızıntı riski oldukça düşüktür. Buna karşılık CdTe, CIGS, GaAs malzemelere dayalı olarak üretilen ince film panellerde durum daha farklıdır. Bu paneller içinde zehirli maddeler barındırdığı için kapsülün bozulması durumunda çevreye zararlı sızıntılar olması beklenir. Bu nedenle, örneğin ABD'de bu tür panelleri üreten firmalar paneller ömrünü tamamladığında geri alma konusunda çok iyi işleyen sistemler kurmuşlardır.

Benzer şekilde, gelecekte yaygınlaşması beklenen perovskit temelli panellerin en önemli olumsuz yönü üretimde kurşun kullanımına henüz bir alternatif üretilememiş olmasıdır.

FV panellerin ömürleri boyunca ne gibi çevresel etkileri olacağı konusu ilk bakışta göründüğünden çok daha karmaşık bir konudur. Piyasada kullanılan panellerin çok farklı malzemelerden ve farklı tekniklerle üretiliyor olması çok geniş bir ürün çeşitliliği ortaya çıkarmaktadır. Endüstriyel ürünlerin ham maddeden başlayarak üretim, kullanım ve nihai bertaraf aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmekte kullanılan Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), FV paneller için de kullanılmaktadır. Ancak belirtilen ürün çeşitliliği bu analizin en azından her bir ana teknoloji alanı bazında yapılmasını gerektirmektedir. Bu zorluğa bir de FV panel üreticilerinin, ticari kaygılarla, ürün içeriklerini ve kullanılan prosesleri gizlemesi eklenmesi, analizleri daha da zorlaştırmaktadır. Sözü edilen çeşitlilik nedeniyle, akademik literatürde çok sayıda YDA analizi çalışması vardır. YDA analizi yapılırken, ürünün çevresel performansını çeşitli boyutlarda (örneğin, sera gazı emisyonları, su kullanımı, enerji tüketimi) değerlendirmek ve sonuçları daha anlaşılır kılmak için çeşitli etki kategorileri kullanılır (Tablo 13). Vellini vd. tarafından yapılan bir çalışmada, FV panellerin ömür sonunda geri dönüşüme ya da atık depolama alanlarına gönderilmesi şeklindeki iki senaryo için YDA uygulanmıştır (Vellini vd., 2017). Çalışma sonunda, geri dönüşüm yapılan panellerin çevre etkisinin tüm kategorilerde daha düşük çıktığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Grafik 10'da her bir çevresel etki kategorisinin katı atık depolama için olan sonucu ve aynı kategorinin geri dönüşüm uygulandığındaki değeri (r alt indisi ile) verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, tüm çevresel etki kategorileri için YDA sonucu elde edilen çevresel etkilerin geri dönüşüm senaryosuna kıyasla daha düşük çıktığı gözlemlenebilmektedir.

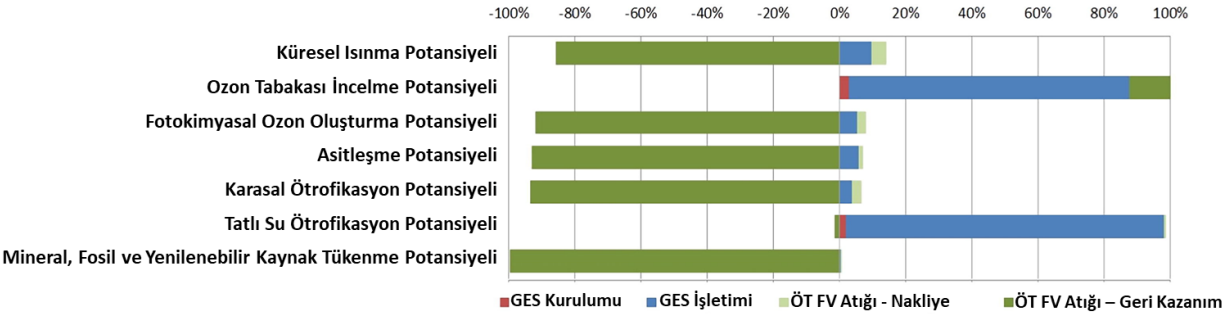
Tablo 13: YDA Çevresel Etki Kategorileri

Çevresel Etki Kategorisi	Kategori Tanımı
A	Asitlenme
AD	Abiyotik Tükenme
ADP	Abiyotik Tükenme Potansiyeli
AP	Asitlenme Potansiyeli
E	Ötrofikasyon
EP	Ötrofikasyon Potansiyeli
EPBT	Enerji Geri Ödeme Süresi
FAET	Tatlı Su Sucul Ekotoksisitesi
FAETP	Tatlı Su Sucul Ekotoksisite Potansiyeli
GW	Küresel Isınma
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
HT	İnsan Toksikolojisi
HTP	İnsan Toksikolojisi Potansiyeli
MAET	Deniz Suyu Sucul Ekotoksisitesi
MAETP	Deniz Suyu Sucul Ekotoksisite Potansiyeli
OLD	Ozon Tabakası Tükenmesi
OLDP	Ozon Tabakası Tükenmesi Potansiyeli
PE	Birincil Enerji
POC	Fotokimyasal Ozon Üretimi
POCP	Fotokimyasal Ozon Üretimi Potansiyeli
TET	Yersel Ekotoksisite
TETP	Yersel Ekotoksisite Potansiyeli



Grafik 10: ÖT FV Paneller İçin Katı Atık Depolama ve Geri Dönüşüm Senaryoları YDA Sonuçları

ÖT FV panellerin geri dönüştürülmesinin, panellerin ömür döngüsü etkilerini belirgin olarak azalttığını gösteren diğer bir araştırmanın sonuçlarının sunulduğu Grafik 11'de görüleceği üzere, FV atıklarının geri kazanılmasının güneş santralinin kurulması, tesisin işletilmesi ve işletim sonunda atıkların nakliyesi aşamalarında ortaya çıkan çevresel etkileri büyük oranda ortadan kaldırarak toplam etkinin çoğu kategori için negatif olmasını sağladığı bulgusuna ulaşılmıştır (Del Pero vd., 2019).



Grafik 11: Ömür Döngüsü Aşamalarının Toplam Ömür Döngüsü Etkilerine Katkı Analizi

6.2 Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sınırda Karbon Düzenlemesi

2019 yılında Avrupa Komisyonu tarafından açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa'yı 2050 yılına kadar ilk iklim nötr kıta konumuna getirmeyi amaçlayan bir büyüme stratejisidir. Bu mutabakat, çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmekle birlikte ekonomik büyümeyi ve sosyal refahı da hedeflemekte olup ana hedefleri 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşmak, kaynak kullanımından bağımsız ekonomik

büyüme sağlamak ve geride hiçbir insan veya yer bırakmadan dönüşüm gerçekleştirmek olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda modern, verimli ve rekabetçi bir ekonomi oluşturmak, adil ve refah bir toplum yaratmak, iklim, çevre, enerji, ulaşım, sanayi, tarım ve sürdürülebilir finansmanı kapsayan geniş bir yelpazede girişimlerde bulunmak da bu hedefler arasında yer almaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda ekonomik büyümeyi ve sosyal refahı da hedefleyen kapsamlı bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda hem kamu hem de özel sektörün iş birliği içinde çalışması gerektiği vurgulanmaktadır.

Yeşil Mutabakat sadece çevre politikalarını değil, aynı zamanda enerji, ulaşım, sanayi ve tarım gibi pek çok sektörü kapsayan geniş bir vizyonu barındırmaktadır. Böylece, ekonomik büyüme sağlanırken doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa ekonomisinin sürdürülebilir bir geleceğe dönüşümünü sağlayacak çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler arasında AB'nin 2030 ve 2050 yıllarına yönelik iklim hedeflerinin artırılması, enerji sektöründe daha temiz ve ekonomik çözümler geliştirilmesi, sanayinin temiz ve döngüsel bir ekonomiye geçişinin sağlanması, enerji ve kaynak verimli inşaat ve kentsel dönüşüm süreçlerinin teşvik edilmesi bulunmaktadır. Ayrıca, kimseyi geride bırakmayan adil bir geçiş süreci, dönüşümün finansmanı, sürdürülebilir ve akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi, tarım ve gıda sistemlerinde çevre dostu ve sağlıklı çözümler benimsenmesi, ekosistemlerin ve biyolojik çeşitliliğin korunması ve zehirli madde içermeyen bir çevre yaratılması gibi geniş yelpazede girişimler de bu bileşenler arasında yer almaktadır.

2050 yılına kadar iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlanması amacıyla, iklime dirençli bir toplum oluşturma hedefiyle Climate-ADAPT platformu gibi önemli araçlar geliştirilmiştir. Climate-ADAPT platformu, adaptasyon konusunda veri tabanına erişim sunarak AB sektör politikaları, ülke ve şehirler hakkında bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca, sivil korumanın iklim değişikliğinden kaynaklanan ekstrem hava olaylarına uyarlanması ve doğa temelli çözümlerle iklim esnekliğinin artırılması gibi tedbirler de stratejinin önemli parçaları arasında yer almaktadır. Bu strateji, iklim değişikliğine karşı daha dirençli bir Avrupa oluşturmayı hedeflerken, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasını ve biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilirliğini de sağlamaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa'nın küresel ölçekte bir lider olmasını hedeflemektedir. Bu kapsamda Avrupa, iklim değişikliğiyle mücadelede öncü rol üstlenmeyi ve diğer ülkelere örnek olmayı amaçlamaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa'nın sadece kendi sınırları içinde değil, küresel düzeyde de etkili olacak politikalar benimsemesini sağlamaktadır.

Avrupa İklim Yasası, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma yönündeki siyasi hedefi AB için yasal bir yükümlülüğe dönüştürmektedir. Bu yasa, AB ve üye devletlerinin, AB'deki net sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar 1990 seviyelerine kıyasla en az %55 oranında azaltmayı taahhüt ettiğini belirtmektedir. Ana eylemler arasında maliyet etkin ve sosyal açıdan adil bir yeşil dönüşümün sağlanması, ilerlemeyi izlemek ve raporlamak için bir sistem geliştirilmesi ve 2050 yılına kadar emisyon azaltım hızının haritalandırılması bulunmaktadır.

"Fit for 55" paketi, AB'nin 2030 ve 2050 yılları için belirlediği iklim hedeflerini gerçekleştirmek amacıyla mevcut politikaların gözden geçirilmesi, güncellenmesi ve yeni girişimlerin hayata geçirilmesini kapsamaktadır. Bu paket, AB'nin net sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar en az %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Bu hedeflere ulaşmak için enerji, ulaşım, sanayi, binalar ve arazi kullanımına yönelik geniş kapsamlı politikalar ve tedbirler öngörülmektedir.

Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), bu süreçte kilit bir araç olarak öne çıkmaktadır. Sera gazı emisyonlarını maliyet etkin bir şekilde azaltmada önemli bir mekanizma ETS kapsamında karbonun fiyatlandırılması, emisyonlar için üst sınır belirlenmesi ve bu sınırın her yıl azaltılması gibi uygulamalarla, kapsamındaki

sektörlerde önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlanmaktadır. ETS, elektrik ve ısı üretimi, enerji yoğun sanayi sektörleri, ticari havacılık ve deniz taşımacılığı gibi sektörleri kapsamaktadır. 2005 yılından beri uygulanmakta olan ETS, kapsamındaki sektörlerde %41 oranında emisyon azaltımı sağlamıştır.

Sosyal İklim Fonu ETS'den en fazla etkilenen kişileri ve işletmeleri finansal olarak desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu fon enerji yoksulluğuyla mücadele etmek, sıfır ve düşük emisyonlu mobilite ve ulaşıma erişimi sağlamak gibi önemli hedefler taşımaktadır. Sosyal İklim Fonu, binalar, kara yolu taşımacılığı ve diğer sektörlerde yeni ETS'nin tanıtılmasından en fazla etkilenen kişileri ve işletmeleri finansal olarak desteklemeyi amaçlamaktadır. Yarar sağlayacak gruplar arasında hassas haneler, mikro işletmeler ve ulaşım kullanıcıları yer almaktadır. Fonun bütçesi 2026-2032 yılları için 65 milyar € olarak belirlenmiştir ve bu kaynak, enerji dönüşümü sürecinde toplumsal ve ekonomik maliyetlerin hafifletilmesinde kritik bir rol oynayacaktır.

Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), karbon kaçağını önlemek amacıyla tasarlanmış bir mekanizma olup karbon yoğun ürünlerin Avrupa Birliği sınırlarına ithalatında uygulanmaktadır. Bu mekanizma, AB ithalatçılarının, ithal edilen malların üretimi sırasında salınan emisyonları beyan etmelerini ve her yıl belirli sayıda sertifika teslim etmelerini gerektirmektedir. SKDM kapsamında belirlenen uygulama dönemleri şunlardır: 1 Ekim 2023'ten itibaren raporlama yükümlülüğü ile sınırlı olarak uygulamaya başlanacak, 1 Ekim 2023 – 31 Aralık 2025 arasında mali yükümlülük doğmayan geçiş dönemi olacak ve 1 Ocak 2026'dan itibaren mali yükümlülükler devreye girecektir. Sertifikaların fiyatı, €/ton-CO_2 emisyonu cinsinden ifade edilen AB ETS tahsisatlarının haftalık ortalama açık artırma fiyatına bağlı olarak hesaplanacaktır. SKDM kapsamında yer alan sektörler arasında çimento, demir ve çelik, alüminyum, gübre, elektrik ve hidrojen bulunmaktadır. İthalatçılar, sertifikalarını ulusal makamlardan satın alabileceklerdir ve ithal edilen malların üretimi sırasında bir karbon fiyatının önceden ödendiğini kanıtlayabilirlerse, ilgili miktar düşülecektir. Bu mekanizma, karbon kaçağı riskini azaltmaya yardımcı olacak ve AB üyesi olmayan ülkelerde daha temiz sanayi üretimini teşvik edecektir.

6.3 Döngüsel Ekonomi ve ÖT FV Panel Yönetimi

Sanayinin temiz üretim yöntemlerine geçişini desteklemek, döngüsel ekonomiye katkıda bulunacak ve sürdürülebilir kalkınmayı mümkün kılacaktır. Bu doğrultuda ekonomik büyümenin kaynak kullanımından ayrıştırılması ve iklim nötrlüğü için üretim ve tüketimde döngüsel sistemlere geçilmesi hedeflenmektedir.

Döngüsel ekonomi kapsamında sürdürülebilir ürünlerin tasarlanması, üretim süreçlerinde döngüsellik, tüketicilerin güçlendirilmesi ve atıkların azaltılması gibi hedefler benimsenir. Döngüsel ekonomi ilkelerine göre ekonomik büyümenin kaynak kullanımından ayrıştırılması ve iklim nötrlüğü için üretim ve tüketimde döngüsel sistemlere geçilmesini hedeflemektedir.

Döngüsel ekonomi, kaynakların verimli kullanımı ve atık miktarının en aza indirilmesi üzerine odaklanan bir ekonomi modelidir. Bu model, malzemelerin yeniden kullanımı, tamiri ve geri dönüşümünü teşvik ederken, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını amaçlamaktadır. Döngüsel ekonominin temel prensipleri (R prensipleri) arasında, gereksiz malzeme kullanımının reddedilmesi (Refuse), mevcut ürün ve süreçlerin çevresel etkilerinin azaltılarak yeniden düşünülmesi (Rethink), kullanılan malzeme miktarının ve atıkların en aza indirilmesi (Reduce), ürünlerin yeniden kullanılması (Reuse), bozulan ürünlerin tamir edilmesi (Repair), eski ürünlerin yenilenmesi (Refurbish), ürünlerin ve bileşenlerinin yeniden üretilmesi (Remanufacture), kullanım ömrü sona eren ürünlerin başka amaçlar için kullanılması (Repurpose), materyallerin geri dönüştürülmesi (Recycle) ve süreçlerin sürekli olarak iyileştirilmesi (Recover) yer almaktadır. Bu prensipler, döngüsel ekonominin temel yapı taşlarını oluşturarak atık oluşumunu en aza

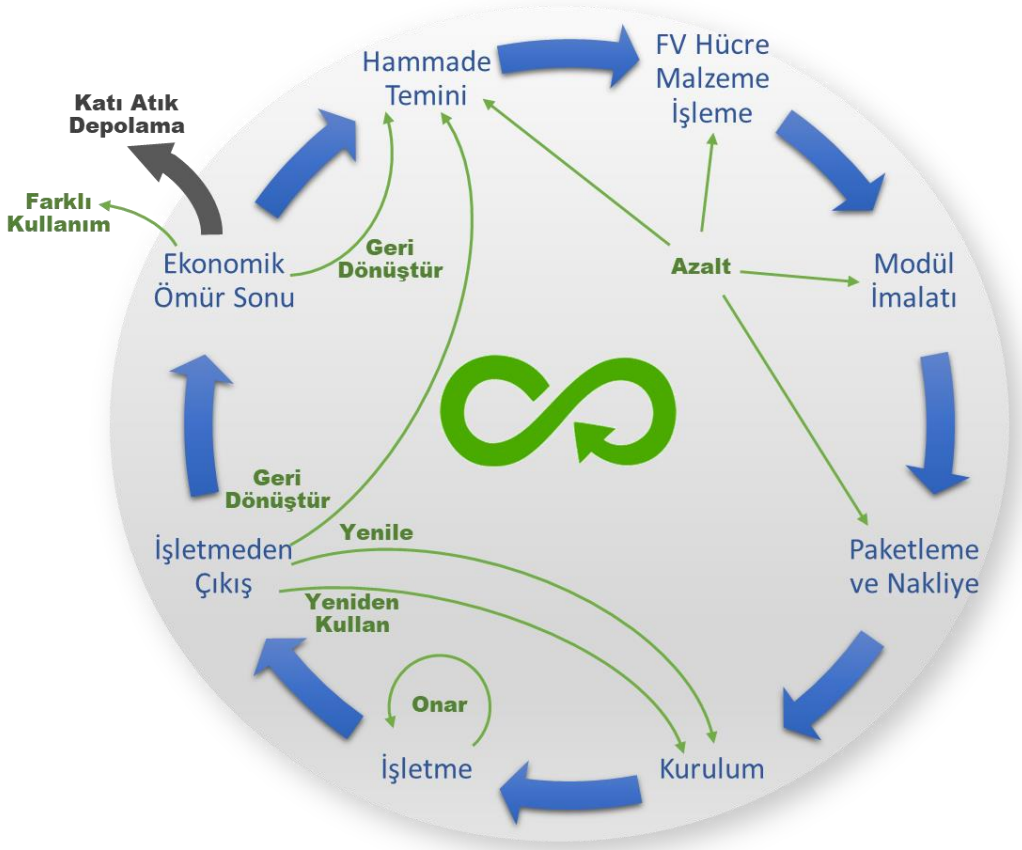
indirmeyi, kaynak verimliliğini artırmayı ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı hedeflemektedir. Doğrusal ekonominin aksine, döngüsel ekonomi, kaynakların üretimden tüketime kadar doğrusal bir akışını değil, sürekli bir döngüyü teşvik ederek, malzemelerin yeniden kullanımını, onarımını ve geri dönüşümünü içermektedir. Doğrusal tedarik zincirlerinin sorunları arasında nadir ve tehlikeli maddelerin kullanımı, çevre dostu tasarımın göz ardı edilmesi, geri alma (take-back) sistemlerinin olmaması ve kayıt dışı geri dönüştürücüler ile düşük geri dönüşüm oranları yer almaktadır. Buna karşın, döngüsel tedarik zincirleri nadir materyallerin kıtlığının önlenmesi, materyallerin yeniden kullanımı ile maliyet tasarrufu sağlanması, yeşil imajın artırılması ile rekabet avantajı elde edilmesi, müşteri deneyiminin iyileştirilmesi, geri dönüşüm ve toplama sektöründe iş olanaklarının yaratılması, insan sağlığı risklerinin azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine imkân vermektedir. Döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanması sayesinde, endüstriyel ürünlerin çevresel zararları azaltılarak doğal denge korunur ve biyoçeşitlilik desteklenir.

2050 yılına kadar her yıl yaklaşık 60-78 milyon ton FV panel atığı oluşması beklenmektedir. Döngüsel tedarik zinciri yaklaşımı, FV panel bileşenlerinin geri kazanımında büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, FV panel atıklarının yeniden kullanımı ve malzemelerin geri dönüştürülmesi ile kaynak verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Malzemelerin geri kazanımı sayesinde, FV panel bileşenlerinin %95'ine varan oranlarda geri dönüşüm potansiyeli bulunmakta olup bu sayede çevresel sürdürülebilirlik desteklenirken aynı zamanda ekonomik değer yaratılacaktır. FV panellerden geri kazanılan materyallerin ekonomik değeri 2022 yılında 170 milyon ABD doları iken, bu değerin 2030 yılına kadar 2,7 milyar ABD dolarına çıkması beklenmektedir. Dolayısıyla, FV panel geri dönüşümünün ekonomik olarak da önemli bir fırsat sunduğu görülmektedir. Fakat döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda, yalnızca ÖT FV atıkların geri dönüştürülmesine odaklanılmaması, 10R prensiplerinin hayata geçirilmesi ve üretimde yaşam döngüsü analizleri gibi sürdürülebilir yaklaşımlar benimsenmesi büyük önem taşımaktadır.

Doğrusal olarak kurgulanmış FV sistem tedarik zincirinde malzeme akışı ham madde temini, imalat, satış ve kurulum, kullanım, ömür sonu ve bertaraf olarak tanımlanan adımlardan geçmektedir. Bu aşamaların her birinde belirgin sorunlara yol açma potansiyeli bulunmaktadır: Örneğin, bazı ham maddeler nadir veya zehirli maddelerden oluşmaktadır. FV panellerin imalatına esas oluşturan tasarımlarda çevresel etkilerin göz ardı edildiği durumlar olabilmektedir. Satış ve kurulumu aşamasında ürünlerin ömrünü tamamladığında ne yapılacağı konusunda düzenlemeler yapılmamakta, konu açıkta bırakılmaktadır. Tüketiciler, ürünler ömrünü tamamladığında gönüllü olarak geri dönüşüme katılım sağlamamaktadır. Ömrünü tamamlayan ürünler, bu konuda yetkili ve standartlara göre çalışan tesisler yerine kayıt dışı geri dönüştürücülerin eline düşmektedir. Ömrünü tamamlayan panellerin yönetiminden sorumlu taraflar için ürünleri çöpe göndermek geri dönüştürmeye kıyasla çok daha düşük maliyetli bir seçenektir.

Döngüsel ekonomi prensiplerinin FV sistemlere uygulanması, değer zincirinin her aşamasında R ilkelerinin nasıl uygulanabileceği üzerinde çalışılmasını gerektirmektedir (Şekil 3). FV panel ömür döngüsünün ilk aşamalarını oluşturan ham madde temini, hücre imalatı ve modül imalatı aşamalarında *Azalt* ilkesi doğrultusunda daha az malzeme kullanımına özen gösterilmektedir. Benzer şekilde, paketleme ve nakliye aşamalarında da *Azalt* ilkeleri uygulanmalıdır. Kullanım sırasında düzenli önleyici bakımların aksatılmadan yapılması FV panellerin verimli ömrünü uzatabilmektedir. Bununla birlikte çeşitli nedenlerle arızalanan GES bileşenlerine *Onarım* yapılarak kullanıma devam etmeleri sağlanabilmektedir. GES tesisinden sökülen FV panellerin, *Yenile* prensibi ile teknik olarak elden geçirilerek ya da doğrudan *Yeniden Kullan* prensibi ile bir müddet daha kullanılmaya devam edilmesine İkinci Ömür adı verilmektedir. Bu şekilde, FV panelin ilk kullanımında elde edilen yüksek verimlilik değerleri kadar olmasa da verim alınmaya devam edilebilmektedir. Bu iki yöntem ile panelden daha fazla yararlanılmasının mümkün olmadığı durumlarda artık panel Ömrünü Tamamlamış (ÖT) olarak ilan edilmektedir. Bu aşamaya gelen paneller fiziksel özellikleri doğrultusunda daha özel amaçlar için kullanılmaya devam edilebilmektedir (*Farklı Kullanım*). Örneğin Rao

vd. yaptıkları bir çalışmada panellerin yapı elemanı olarak kullanmasını önermektedir (Rao vd., 2023). Ancak bu aşamada uygulanması gereken asıl önemli alternatif *Geri Dönüştür* ilkesidir. Bu ilke doğrultusunda ÖT FV panellerden gerek tekrar kullanılabilir parça olarak imalat aşamalarına, gerekse ham madde oluşturacak seviyede ayrıştırılarak ham madde temini aşamasına girdi sağlanabilmektedir. Bu uygulamalar nadir elementlere bağımlılığı azaltmakta ve zehirli maddelerin doğaya karışması engellemektedir. ÖT FV paneller için en istenmeyen son ise *Katı Atık Depolama* alanlarına gönderilmesidir.



Şekil 3: FV Değer Zincirinde Döngüsel Ekonomi İlkelerinin Uygulanması

FV değer zincirinde döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasının çok sayıda yararı olacağı değerlendirilmektedir: Nadir malzemelerde kıtlık yaşanmasının engellenmesi, malzemelerin yeniden kullanımı sayesinde maliyet düşüşleri, ham madde ithalatında düşüş, sürece katılan firmaların çevre duyarlılık imajı ile rekabet avantajı sağlaması, bakım ve onarım süreçlerinin iyileşmesi sonucu artan müşteri memnuniyeti, toplama, ayrıştırma ve geri dönüşüm sektörlerinin istihdam yaratması, FV panel atıklarının insan sağlığı üzerinde yaratabileceği risklerin azalması, sera gazı emisyonlarının azalması bu avantajlar arasında sayılabilir.

7 FV Panel Geri Dönüşüm Teknolojileri

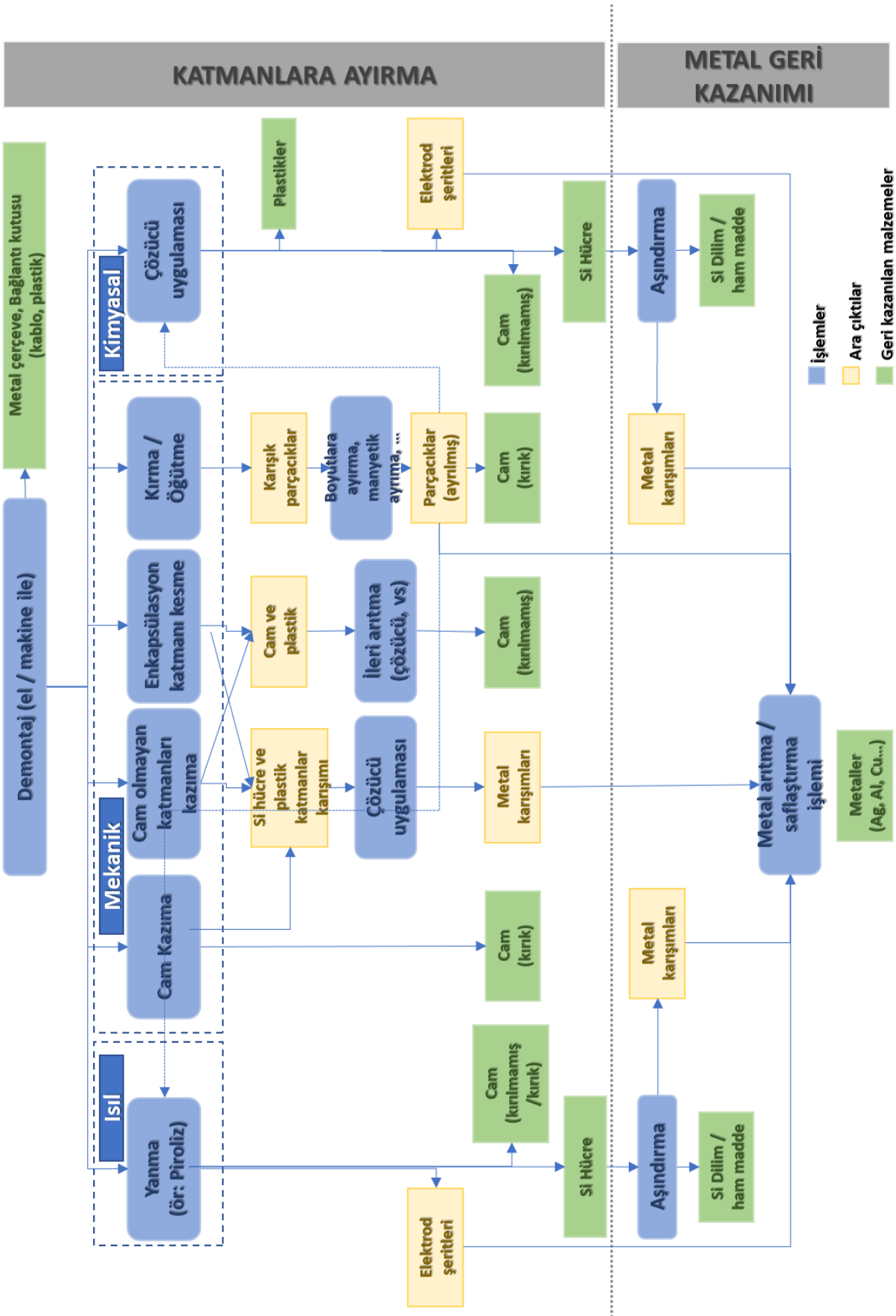
Ekonomik ömrünü tamamlayan FV panellerin hangi şekilde değerlendirileceğinin tayin edilmesinde ekonomik ve çevresel etkiler belirleyicidir. ÖT FV panellerin diğer atıklar gibi doğrudan atık depolama alanlarına gönderilmesi hem çevreye yayılabilecek zararlı maddeler açısından hem de atıkların ekonomik değerinin yitirilmesi anlamına gelmesi sebebiyle en istenmeyen seçenektir. Bu nedenle malzemelerin geri kazanılması hedeflenmektedir. Buna yönelik çok sayıda bilimsel ve teknolojik araştırma yapılmış olup değişik geri dönüşüm teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar hangisinin kullanılacağı gerek panellerin üretim tekniği gerekse hangi ölçüde geri kazanım elde edilmek istendiğine göre belirlenebilir. Bu bölümde ÖT FV paneller için önerilen belli başlı geri dönüşüm teknolojileri teknik işlemlerin ayrıntılarına girilmeden, özet olarak verilmektedir. Geri dönüşüm süreçlerinin ayrıntıları ilgili yayınlardan araştırılması gerekmektedir. Kullanılan yöntemlerin pek çoğunun patentli olduğu ve bu alanda çalışan firma ve araştırmacıların bazı teknikleri gizli tuttuğuna dikkat edilmelidir.

Fotovoltaik güneş panellerinde kullanılan teknolojilerinin özetlendiği 3.1 bölümünde açıklandığı üzere günümüzde yaygın olarak kullanılan FV panel teknolojileri k-Si ve ince film teknolojileri olup ince film teknolojilerinin küresel pazardaki payı %5 civarında, ülkemizde ise bunun çok daha altındadır. Dolayısıyla, bu bölümde genel olarak k-Si panellerin geri dönüşüm teknikleri anlatılmakta, ancak söz konusu geri dönüşüm tekniği ince filmlerle ilgiliyse bu durum ifade edilecektir.

Henüz araştırma ve geliştirme ağırlıklı ilerleyen ve ticari uygulamaları fazla yaygınlaşmamış olan ÖT FV panel geri dönüşüm alanında çok farklı geri dönüşüm yaklaşımları ve teknikleri denenmektedir. Çevresel ve ekonomik değeri yüksek bir geri dönüşüm işlemi çoğu zaman aşağıdaki tekniklerin bir ya da birden fazlasının bir arada kullanılması ile mümkün olmaktadır. Farklı yaklaşımların ve tekniklerin bir arada kullanımı sonucunda elde edilen çıktılar Resim 2 ile görsel olarak ve Şekil 4'te akış diyagramı şeklinde özetlenmiştir.



Resim 2: Bir FV Panel ve Geri Dönüştürme Sonrası Elde Edilen Malzemeler
(Frelp by Sun, 2022)

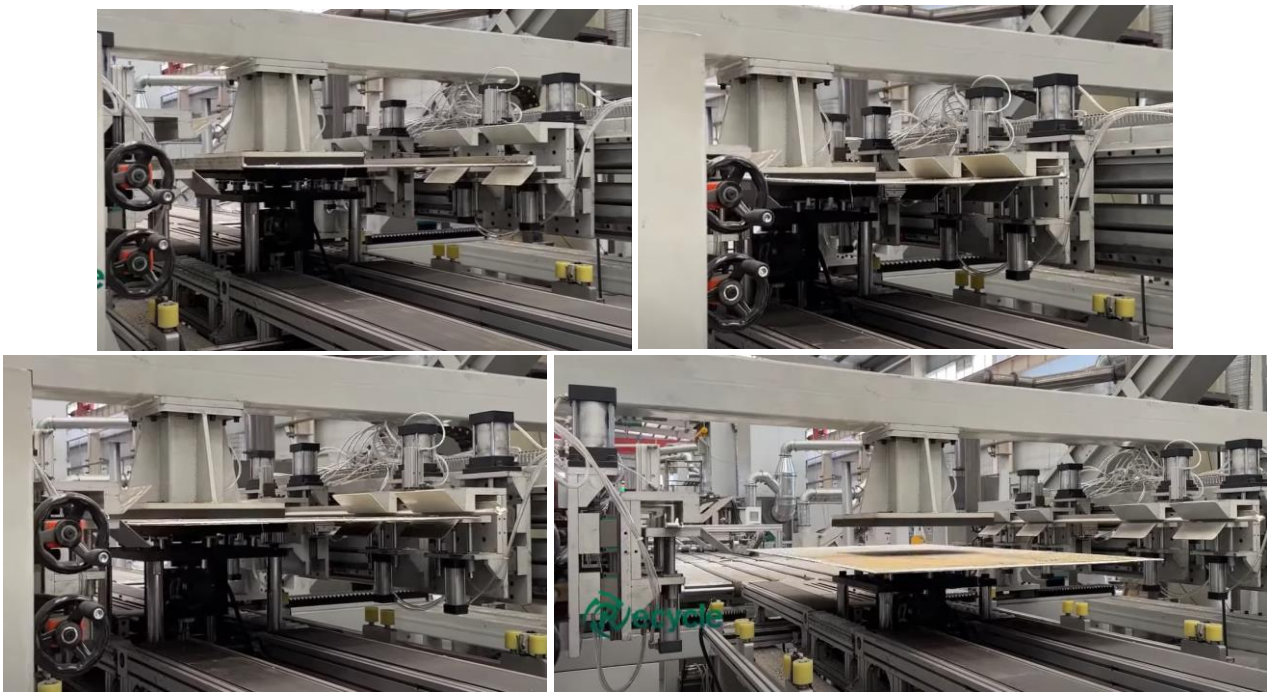


Şekil 4: k-Si FV Panellerin Geri Dönüşüm Süreç Alternatifleri
(Komoto vd., 2018)

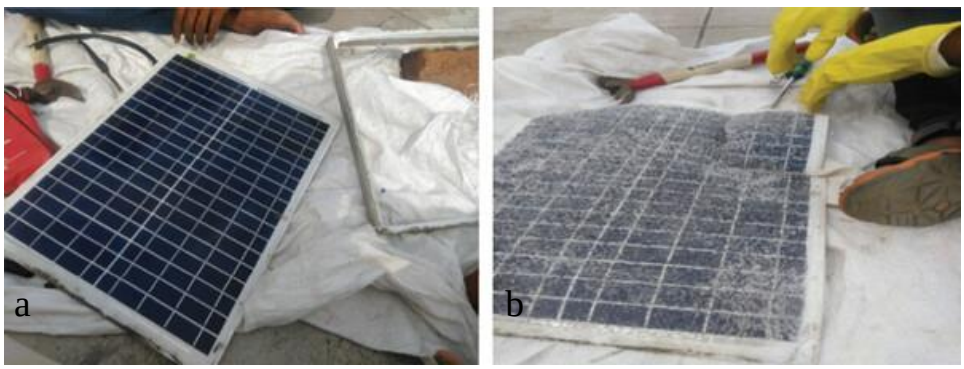
7.1 Katmanlara Ayırma Öncesi İşlemler

Güneş panellerinde dayanıklılığı artırmak, darbe ve bükülmelere karşı koruma sağlamak için paneller genellikle alüminyumdan yapılan bir çerçeve içerisine alınır. Geri dönüşüm sürecinin ilk adımı bu çerçevenin çıkarılması olup bu işlem elle ya da özel tasarlanmış mekanik aletlerle yapılabilmektedir (**Hata! Başvuru k aynağı bulunamadı.**). Alüminyum çerçeve değeri ve geri dönüştürülmesi ile önlenen çevresel etkiler nedeniyle tek başına önemli bir bileşendir (Deng vd., 2022).

Alüminyum çerçeveye benzer şekilde panelin ürettiği elektriği toplayıp dışarı aktaran bağlantı kutusu da panelin arkasından elle ya da mekanik olarak sökülür. Bağlantı kutusu ile birlikte panelin dış bağlantısını sağlayan bakır kablo da panelden ayrılmış olur. Bu işlemlerden sonra panel artık lamine edilmiş bir cam olarak kalır (Resim 3) ve sonraki adımın temel amacı bu laminasyonu ayrıştırıp bileşenlere ulaşmaktır.



Resim 3: Çerçevenin Mekanik Olarak Sökülmesi



Resim 4: a. Çerçeve ve Bağlantı Kutusu Sökülmüş FV Panel; b. Camı Kırılmış FV Panel (Jayapradha & Barik, 2023)

Çerçeve ve bağlantı kutusu çıkarılmış FV panel, tamamen sağlam olarak yani cam ve panel içindeki hücreler zarar görmemiş durumda (Resim 4-a, Resim 5), elle ya da kırıcı ekipman ile camı kırılmış ancak panelin bütünlüğü bozulmamış durumda (Resim 4-b), ya da çeşitli boyutlardaki öğütücü veya değirmenlerde

öğütülmüş parçacıklar olarak katmanlara ayırma aşamasına alınabilir. Ancak genellikle panelin camı kırıcı ile kırılarak daha sonra öğütücüye konulmaktadır.

Panelin hasarsız şekilde katman ayrılmasındaki birincil amaç k-Si hücrelerin kırılmadan kurtarılarak yeniden hücre üretimi için kullanılabilmesidir. Panellerin atık depolarına gönderilmesi ile karşılaştırıldığında, bu yöntem çok etkin bir geri dönüşüm yöntemidir, çünkü silisyum ham maddenin doğadan elde edilmesi, saflaştırılarak polisilisyum elde edilmesi, polisilisyumdan kütük (ingot) üretilmesi ve ingottan dilimler elde edilmesi süreçlerinin tüm maliyet ve çevresel etkilerini ortadan kaldırmaktadır. Buna karşılık panel büyüklükleri nedeniyle büyük ekipmanlar gerektirmesi ve yüksek enerji tüketimi söz konusudur. Ayrıca FV panellerde kullanılan silisyum dilimlerin boyutlarının zaman içerisinde sürekli büyüyor olması nedeniyle 20-25 yıl kullanıldıktan sonra ömrünü tamamlamış bir FV panelden elde edilen bir silisyum dilimi tekrar işleyecek ekipman bulunması mümkün olmama ihtimali bir hayli yüksek olacaktır.



Resim 5: Çerçeve ve Bağlantı Kutusu Sökülmüş FV Paneller
(https://www.youtube.com/watch?v=FCtEWveySsA)

Panel camı kırıldığında, panelin arka yüzüne yapışık olan arka film, paneli bir arada tutmaya devam eder. Bu durumda panel bir levha şeklinde olmayıp halı gibi bükülebilir bir durumdadır. Panel aşağıda ayrıntıları anlatılan katmanlara ayırma işlemlerine bu hâlde sokulabileceği gibi, önce daha küçük parçalara öğütülerek de işlemlere devam edilebilir. Her iki durumda da artık panelden tekrar kullanılabilir parça elde edilmesi mümkün olmayıp, geri kazanılan malzeme ancak ham madde olarak kullanılabilir niteliktedir. Panelden kurtarılan silisyum malzeme tekrar silisyum dilim üretimde kullanılabilecek saflığı yitirmiş durumda olmaktadır. Bu konuda akademik araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

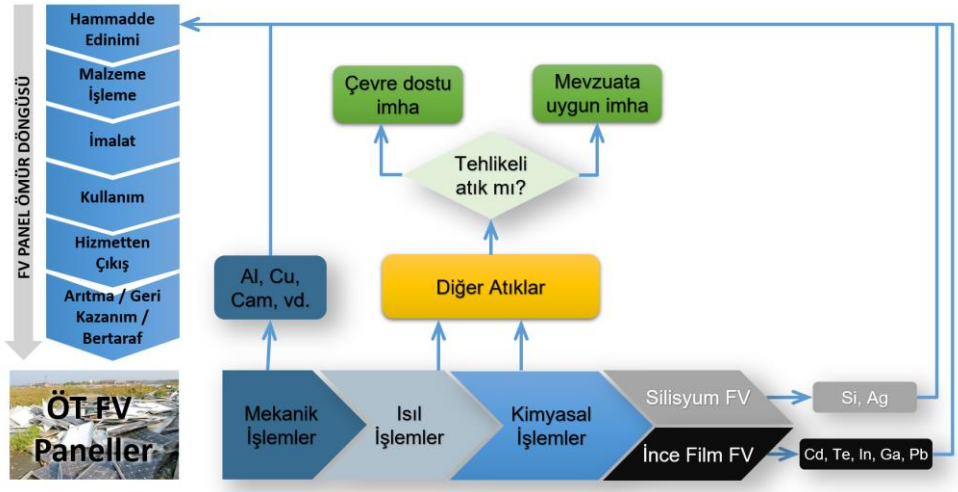
Bu noktada özellikle mekanik işlemler hakkında netleştirilmesi gereken bir konu hem katmanlara ayırma öncesi işlemlerde hem de katmanlara ayırma amacıyla mekanik geri dönüşüm yöntemleri kullanılabilmektedir. Katmanlara ayırma öncesi uygulanan mekanik işlemler, özetle panelin bütünlüğünü bozarak bir sonraki adıma daha küçük boyda ya da mukavemeti düşmüş şekilde alınmasına yöneliktir. Dolayısıyla, aşağıda anlatılan kimyasal ve ısıl katmanlara ayırma tekniklerinin öncesinde de mekanik işlemler uygulanabilmektedir. Bir başka deyişle, genellikle yöntemler birlikte kullanılabilmektedir.



Resim 6: FV Panelin Öğütülmesi ve Öğütme Sonucu Elde Edilen Malzeme
(https://www.youtube.com/shorts/WmMp5w8R_zI)

7.2 Katmanlara Ayırma Teknikleri

Panel geri dönüşüm sürecinde en önemli adımı, paneli katmanlara ayırarak malzemelerin birbirinden ayrıştırılmasıdır. Bu işlemin amacı, üretim aşamasında hücrelerin bir arada tutulması, cama iyice sabitlenerek zarar görmelerinin önlenmesi ve dış etmenlerden izole olmalarının sağlanması amacı ile yapılan laminasyonun bozulmasıdır. Katmanlara ayırma işlemi için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar 3 ana gruba ayrılır: Mekanik Ayırma, Isıl Ayırma ve Kimyasal Ayırma (Şekil 5). Her kategoride farklı yöntemler bulunmaktadır. Hangi yöntemin kullanılacağının seçimi, geri dönüşüm tesisinin kapasitesine, hangi malzemelerin geri kazanılmasının istendiğine ve elde edilmek istenen geri kazanılmış malzeme kalitesine bağlıdır. En basit anlamda sadece camın geri kazanılması amaçlanabileceği gibi, bazı ayırma teknolojileri silisyum dilimleri FV hücre üretimi için yeniden kullanılabilecek ölçüde sağlam bir şekilde geri kazanmayı sağlayabilmektedir.



Şekil 5: ÖT FV Panel Geri Dönüşüm Teknolojileri Akış Diyagramı

7.2.1 Mekanik Katmanlara Ayırma

Mekanik katmanlara ayırma, çerçeve ve bağlantı kutusu çıkarılmış güneş hücrelerinin, camı ve arka levhayı bir arada tutan, genellikle etilen-vinil asetat (EVA) termoplastik yapıştırıcı malzeme kullanılarak yapılan laminasyonu ayrıştırmak için mekanik kuvvetlerin uygulanmasını içerir.

Bu amaçla, öğütücüler, kırıcılar ve çekiçli değirmenler ve kırıcılar gibi ekipmanlar kullanılarak FV paneller daha küçük parçalara ayrılır. Endüstriyel kırıcılar, panelleri farklı bileşenlerin açığa çıkmasını sağlayarak,

bileşenlerin ayrılmasını kolaylaştıracak şekilde parçalayabilir. Daha sonra bu parçalar, öğütme, değirmende ince öğütme ve eleme gibi mekanik işlemlerden geçirilerek, malzemelerin boyut ve yoğunluğa göre sınıflandırılması sağlanır. Bu süreçte paneller giderek daha ince malzeme veren bir dizi öğütme ve eleme işleminden geçerek sonunda her bir malzemenin toz ya da granül hâlinde ayrılmasına imkân verir (Resim 7).



Resim 7: Mekanik Öğütme ve Eleme İşlemlerinden Çıkan Toz Malzeme
(cam, silisyum ve plastik)

Mekanik katmanlara ayırma işleminde öğütme, parçalama, kazıma ve kesme tekniklerinin başka temassız mekanik hasar verme teknikleri de kullanılabilir. Mekanik katmanlara ayırmada en yaygın yöntem öğütme ve parçalamadır. Öğütme amacıyla genellikle kesme gerilimli öğütücüler tercih edilmektedir (Resim 8). Bu amaçla çekiçli değirmen tipi makineler de kullanılabilse de panel içeriğinin polimer malzeme içermesi nedeniyle yeterince iyi sonuç vermemektedir. Kesme gerilimli öğütücülerin paneli aşamalı olarak daha küçük parçalara ayırması amacıyla, peş peşe 3 ila 6 öğütücüden geçirilmesi gerekir (Granata vd., 2014). Elde edilen parçaların büyüklüğü içeriğini de büyük oranda belirler. Buna göre, 1 mm'den büyük parçalar çoğunlukla cam ve polimer karışımı şeklindeyken 0,4-1 mm arasındaki parçalar çok büyük oranda cam olup doğrudan geri dönüşüme yönlendirilebilmekte, daha ince çaplı parçacıklar ise cam, Si ve metal karışımı olup başka ayrıştırma adımlarına aktarılması gerekmektedir (Yan vd., 2023). Del Pero vd. yaptıkları bir çalışmada panelleri öncelikle pres kesme makineleriyle 100x100 mm parçalara ayırmakta, ardından çekiçli öğütücü ve 6 mm gözenekli elekten geçirerek, 6 mm üstünü cam saflaştırmaya, altındaki parçaları bir sonraki öğütücü makinesine göndermektedir. İkinci öğütücüden 2 mm üzerindeki parçaları çoğunlukla plastik içerdikleri için atıktan enerji sistemlerine aktarmakta, elek altına geçen parçalardan 2-0,5 mm arasındakileri metal ayırma işlemine, 0,5-0,315 mm boyutundakileri düşük kaliteli silisyum ürün üretimine, 0,315 altındaki parçaları yüksek kaliteli silisyum üretimine yönlendirmektedir (Del Pero vd., 2019).

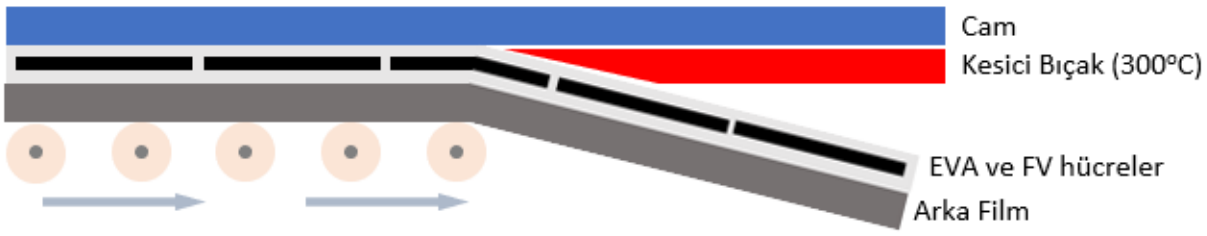
Mekanik katmanlara ayırma işleminden elde edilecek sonuçların ne ölçüde verimli olacağı, kullanılan kırma ve eleme ekipmanının türüne, besleme ve çalışma hızına, öğütücü bıçak veya dişlerin tasarımına bağlıdır. Örneğin öğütme işleminin doğru hızda yapılması, enkapsülasyon malzemesinin etkili bir şekilde parçalanarak silisyum hücrelerin, cam ve metallerin serbest kalmasını sağlayabilir. Ancak eğer bu işlemin hızı ve uygulanan güç doğru ayarlanmazsa, bu defa silisyum plakaların kırılması artabilir ve aşırı ince toz oluşumu ortaya çıkabilir. Bunu önlemek için mekanik geri dönüşüm ekipmanının parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Operatörün, o anda işlenmekte olan panelin özelliklerine göre bu ayarı düzenlemesi gerekebilir.



Resim 8: İki Rotorlu Kesme Gerilimli Mekanik Öğütücü

FV panel öğütüldükten sonra elde edilen karışım, cam, silisyum, metaller (bakır, gümüş, alüminyum gibi) ve enkapsülasyon malzemesi kalıntıları içerir. Bu karışımdan daha yüksek saflıkta ve geri dönüştürülebilir malzeme kazanımı sağlamak için bileşenlerine ayrılması gerekir. Ayırma amacıyla kullanılan teknikler eleme, yoğunluk ayırma, manyetik ayırma ve hava sınıflandırması gibi mekanik yöntemlerdir. Eleme işlemi, daha büyük cam ve metal parçalarını daha küçük silisyum ve enkapsülasyon malzemesi kalıntılarından ayırır. Yoğunluk ayırma, su bazlı yüzdürme tablaları kullanılarak, daha ağır silisyum partiküllerini daha hafif enkapsülasyon malzemelerinden ayırmayı sağlar. Benzer bir ayırma tekniği de su yerine basınçlı hava üflenerek bileşenlerin ayrılmasıdır. Manyetik ayırma ise demirli bileşenleri çıkarırken, anaforlu akım (foucault akımı) ayırıcılar alüminyum gibi demir dışı metallerin geri kazanılmasında etkilidir.

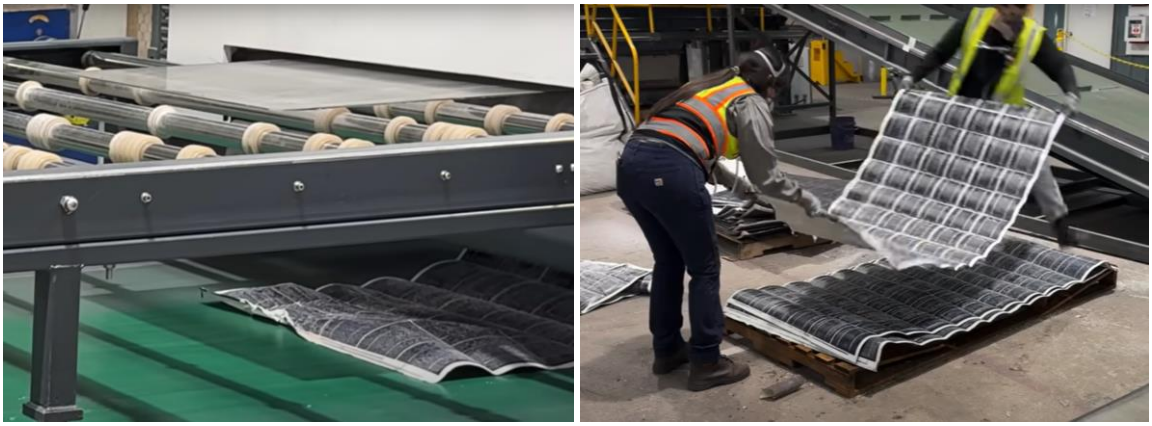
Mekanik yöntemler arasında yer alan bir başka teknik ise panel camının ayrılması ile ilgilidir. Bütünlüğü bozulmamış panelin camı ile hücreleri içeren katman arasına geniş ağızlı keskin bıçaklar sokularak, cam hiç hasar görmeden geri kazanılabilmesine yönelik yöntemin adı "sıcak bıçak" olarak anılmaktadır. Yöntemin uygulanması için panel ebadına uygun uzunlukla kesiciler EVA malzemesini eritecek sıcaklık olan 300°C sıcaklığa ısıtılmakta, daha sonra panel camı diğer malzemelerde ayıracak şekilde yatay eksende bıçağa doğru itilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6: Panel Camının Kesici Bıçak ile Ayrılması

Bu işlem sonucunda panel camı hasarsız olarak elde edilirken, EVA sayesinde arka filme yapışık vaziyetteki FV hücreler bir katman olarak ilerleyen geri kazanma aşamalarına aktarılmaktadır (Resim 9). Avrupa'nın ÖT FV panel geri dönüşümünde öncü konumdaki kuruluşlarından PV Cycle'ın da ortak olduğu Full Recovery

End-of-Life Photovoltaic (FRELP) başlıklı Avrupa Birliği araştırma projesinde yüksek frekanslı sıcak bıçak kullanımı öngörülmüştür (Frelp by Sun, 2022).



Resim 9: (a) Camın Kesici Bıçak ile Panelden Ayrılması ve (b) Sonrasında Panelin Kalan Kısmı (https://www.youtube.com/watch?v=FCtEWveySsA)

Temassız katmanlara ayırma amacıyla kullanılan bir başka yöntem de lazer kullanımıdır. Hücrelerin lazer ışınına maruz bırakılarak sıcaklığın artması ve dolayısıyla termoplastik yapıştırıcı EVA'nın eriyerek mekanik bağı koparması şeklinde gerçekleşmektedir (Li vd., 2022). Bu yöntem FV hücreleri hasarsız geri kazanma imkânı verdiği için dikkate değerdir. Benzer şekilde optik nanoteknolojik yöntemler de cama hasar vermeden katmanlara ayırma yapabilmektedir (Palitzsch ve Loser, 2017).

Isı kullanımının tersine, dondurucu soğuk (kriyojenik) ortam altında zımparalı kayışla taşlama yaparak aşındırma suretiyle de mekanik katmanlara ayırma yapılabilmektedir.

Mekanik katmanlara ayırma işlemlerinin en büyük avantajı, kimyasal ön işlem gerektirmeden, farklı nitelikte ve yapılarda FV panel türlerini işleyebilmesidir. Bu sayede karışık kaynaklardan gelen FV atık akışlarının birlikte işlenmesine imkân sağlayan bir çözüm sunmaktadır. Geri kazanılan cam, genellikle doğrudan veya minimal işleme tabi tutularak yeni cam ürünlerin üretiminde yeniden kullanılabilirken, ayrılan silisyum, yeni güneş hücrelerinde veya diğer silisyum bazlı uygulamalarda kullanılmak üzere rafine edilebilir. Mekanik katmanlara ayırma yöntemleri, ısıl yöntemlerle karşılaştırıldığında, fırın işlemi içermediği için daha düşük enerji tüketimine yol açmaktadır (Del Pero vd., 2019). Kimyasal katmanlara ayırma yöntemleri ile karşılaştırıldığında da çevreye ve insanlara olumsuz etkisi olabilecek kimyasal sıvılar ve gazlar kullanılmasına gerektirmemektedir.

Bununla birlikte, mekanik katmanlara ayırma en büyük zorluklarından biri, geri kazanılan malzemelerin saflığı ve kalitesinin düşük olmasıdır. Mekanik stres, silisyum plakaların kırılmasına ve kontaminasyonuna yol açarak, yüksek saflık gerektiren uygulamalarda yeniden kullanılmalarını zorlaştırabilir. Ayrıca, işlem sırasında enkapsülasyon malzemeleri ince yapışkan kalıntılara dönüşebilir ve geri kazanılan cam ve silisyum partiküllerine yapışarak, bu malzemelerin ileri işlenmesini zorlaştırır ve genel geri kazanım verimliliğini düşürür. Bu yaklaşımın bir diğer olumsuz yönü de özellikle camın toz hâline gelmesi nedeniyle işçilere verebileceği zarardır (Chowdhury vd., 2020).

Mekanik katmanlara ayırma işlemine ilişkin yenilikler, ekipman tasarımını ve işlem koşullarını optimize etmeye odaklanmaktadır. Bu yenilikler arasında, kıymetli malzemenin enkapsülasyon malzemesi kalıntılarından daha etkili bir şekilde ayrılmasını sağlamak için yüksek basınçlı öğütme gibi gelişmiş öğütme teknolojileri araştırılmaktadır. Ayrıca, su kullanımını ve çevresel etkileri en aza indiren kuru mekanik işleme teknikleri, geri dönüşüm sürecinin sürdürülebilirliğini artırmak için araştırmalara konu olmaktadır.

Mekanik katmanlara ayırma, FV panel geri dönüşümünde yalnızca doğrudan geri dönüşüm uygulamaları için değil, aynı zamanda ısıl veya kimyasal yöntemlerle daha ileri işleme için hazırlık aşaması olarak da hizmet eder. Panel katmanları fiziksel olarak ayrıldıktan sonra, silisyum, saflığını artırmak için termal veya kimyasal aşındırma gibi ek işlemlerden geçebilir ve yeni FV hücrelerinde yeniden kullanılabilir hâle getirilebilir. Bu çok aşamalı yaklaşım, kıymetli malzemelerin maksimum geri kazanımını sağlarken atıkları en aza indirerek daha kapsamlı bir geri dönüşüm yolunu mümkün kılar.

Sonuç olarak, mekanik katmanlara ayırma, ÖT FV panellerin geri dönüşümünde önemli bir teknoloji olup verimlilik, uygulanabilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik arasında bir denge sunması açısından diğer yaklaşımlara kıyasla daha ön plana çıkmaktadır. Mekanik katmanlara ayırma yöntemleri geri kazanılabilecek malzemelerin saflığını yitirmesine neden olmakla birlikte, ekipman tasarımına ve süreç optimizasyonuna yönelik ilerlemelerin bu yaklaşımın etkinliğini artırması beklenmektedir.

7.2.2 Isıl Katmanlara Ayırma

FV panel katmanlarının ısıl işlemler ile ayrılmasında izlenen temel yaklaşım, EVA malzemesinin polimer bağlarını kontrollü ortamlarda ısı uygulayarak parçalamaktır. Polimer malzemenin çözülmesi sağlandıktan imalat aşamasında kullanılan malzeme bileşenler olarak elde edilebilmektedir. Isıl katmanlara ayırma işlemi için en yaygın olarak kullanılan yöntem pirolizdir. Piroliz, bir ısıl ayrıştırma işlemidir ve kullanım ömrünün tamamlamış FV panellerin de arasında yer aldığı tüm elektronik atıklardan değerli malzemeleri geri kazanmak için yaygın olarak kullanılır.

Piroliz işlemi bazı uygulamalarda öncelikle mekanik olarak öğütülerek ufalanmış FV panel parçacıkları kullanılmakta, dolayısıyla elde edilen parçalar da yeniden imalatta ham madde olarak kullanılmak üzere kazanılmaktadır. Kimi uygulamalar ise paneli bütün olarak işleme alarak, cam ve FV hücreler hasar görmeden olarak geri dönüşüm sağlanmaktadır. Elbette bu uygulamalar daha büyük fırınlar ve daha fazla enerji gerektirmektedir. Buna karşılık, ufalanmış panel atığından elde edilen geri dönüştürülebilir malzemenin tekrar kullanılabilir cam veya silisyum dilim durumuna getirilmesinin de maliyeti olduğu açıktır.

Piroliz işleminde, EVA polimer malzemeleri tipik olarak 300°C ila 900°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda ayrıştırılır. İşlem, gazların, sıvı hidrokarbonların ve karbon ve kül gibi katı kalıntıların üretilmesiyle sonuçlanır. Piroliz işlemi malzemenin yaklaşık 550-600°C ısıtılması sonucu organik yapıdaki polimer malzemenin önce sıvılaşıp sonra gaz fazına geçmesi şeklinde gerçekleşmektedir. İşlem oksijensiz ortamda yapılabildiği gibi açık ortam koşulunda da uygulanabilmektedir. FV panel atıklarına piroliz işlemi uygulanmasında uygulama sıcaklığı ve uygulama süresi olarak iki önemli parametre belirleyicidir. EVA'nın çözünmeye başlaması yaklaşık 350°C seviyesinde olup malzeme 550°C sıcaklığa ulaşıldığında tamamen çözünme gerçekleşmektedir. Yayımlanmış olan çalışmalarda en temel farklılık piroliz işlemi süresince FV panelin hangi sıcaklıkta ne kadar bekletildiğini belirleyen reçetede ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, ısıl katman ayırma işleminin başarısı büyük oranda ısıtma profiline bağlı olup literatürde bu konuda araştırmalar yayımlanmaya devam etmektedir. Bu alanda yapılan yayınların özeti Tablo 14'de sunulmaktadır. Piroliz işleminde asetik asit propan, propen, etan, büten, hekzen-1 ve büten-1 gibi gazlar açığa çıkmakta olup bunlar genellikle işlemin yapıldığı fırınlara ısı üretmek için yakılarak geri besleme sağlanır. Ancak bu gazların içeriğinde krom ve kurşun gibi çevresel kirliliğe sebep olabilecek elementler olabileceği için tekrar kullanılmadan önce filtrelenmeleri önem taşımaktadır.

Isıl katmanlara ayırma işleminin en büyük dezavantajı enerji yoğun bir süreç olması ve dolayısıyla diğer katmanlara ayırma yöntemlerine göre daha pahalı olmasıdır. Ancak piroliz işleminin yüksek geri kazanım ve yeniden kullanılabilirlik oranları, geleneksel bertaraf yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha az çevresel etkiye neden olur. FV paneli bir bütün olarak piroliz işlemine sokulduğunda güneş camı ve güneş hücreleri

tamamen geri kazanılarak kolaylıkla yeniden kullanılabilmesi mümkün olsa da polimer malzemenin gazlaşması sırasında arka film ve cam arasında oluşabilecek gaz baloncukları çok ince malzemeden yapılan FV hücreleri kırabilmesi nedeniyle piroliz reçetesi çok önemlidir. Piroliz sonrası bütün olarak kurtarılan hücrelerin tekrar kullanılması amaçlanıyorsa, üzerindeki alüminyum ve gümüş gibi metalleri temizlemek için kimyasal aşındırma işlemine tabi tutulması gerekir.

Tablo 14: Yayımlanmış Piroliz Uygulamaları (Yan vd. 2023)

Referans	FV Panel tipi	Koşullar	Sonuç
Bohlve ve Anisimov (1997)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Gaz: azot Süre: 60dk T: 520°C	Tam ayırma
Tammaro vd. (2015)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Gaz: hava Süre:30dk T:600°C	Tam ayırma
Dias vd. (2016a)	Si	Girdi: Ufalanmış parçalar Gaz: azot Süre:30dk T: 600°C	Tam ayırma
Pagnanelli vd. (2019)	Si İnce Film	Girdi: Ufalanmış parçalar Süre: 60dk T: 650°C	Cama yapışık metal
Kang vd. (2012)	Si	Girdi: EVA ve FV hücreler Gaz: Ar Süre: 60dk T: 600°C	Tam ayırma
Xu vd. (2021)	Si	Girdi: gaz çıkış kanallı örnekler Gaz: hava Süre:120dk T: 500°C	Tam ayırma, Hasarsız FV hücre
Pagnanelli vd. (2017)	Si İnce Film	Girdi: Ufalanmış malzeme Gaz: hava Süre:60dk T: 650°C	Tam ayırma
Wang, Hsiao, ve Du (2012)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Süre: 30dk T: 350°C (arka film ayırma) Süre: 120dk T: 400°C (EVA ve arka film çıkarma)	Tam ayırma
Park vd. (2015)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Süre: 30dk T:480°C	Tam ayırma, Hasarsız FV hücre
Dias vd. (2016b)	Si	Girdi: Ufalanmış malzeme Gaz: azot T: 500°C	Tam ayırma
Jung vd. (2016)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme T: 480°C	Tam ayırma, Hasarsız FV hücre
Granata vd. (2014)	Si İnce Film	Girdi: Ufalanmış malzeme Süre: 60dk T: 650°C	Tam ayırma
Bogust ve Smith (2020)	Si	Girdi: Ufalanmış malzeme Süre: 60dk T: 600°C	Tam ayırma

7.2.3 Kimyasal Katmanlara Ayırma

FV panellerin geri dönüşümünde kullanılan yöntemlerden biri de kimyasal katmanlara ayırmadır. Bu yöntemde çerçeve ve bağlantı kutusu çıkarılmış paneller ya öğütücüden geçirilerek ufalanmış hâlde ya da bir bütün olarak kimyasal çözücüler içerisinde belirli sürelerde bekletilerek katmanlar birbirinden ayrılır. Kimyasal ayırma yönteminde temel yaklaşım organik polimer EVA malzemesinin çözücü ile eritilmesidir. Bu amaçla kullanılan kimyasal çözücüler genellikle trikloroetilen, diklorometan, diklorobenzen, aseton, benzen, tolüen ve siklohekzan gibi malzemelerdir. Katmanlara ayrılmak istenen paneller, kullanılan çözücünün türüne göre belli sürelerde çözücü içerisinde bekletilmesi gerekir. Tepkime sıcaklığının

artırılması, hatta bazı uygulamalarda ses ötesi dalgalar kullanılması çözünme sürecinin daha etkili olmasını dolayısıyla süreyi azaltmaktadır. Ancak sıcaklığın çözücü maddenin uçmasına sebep olmayacak sıcaklığı da geçmemesi önemlidir. Farklı kimyasal katmanlara ayırma çalışmaları Tablo 15'de özetlenmiştir.

Kimyasal katmanlara ayırma sürecinde kullanılan çözücüler, ayırma işleminin etkinliği ve süreç verimliliği açısından dikkatle belirlenmelidir. 80°C sıcaklıktaki trikloroetilenin 10 gün süreyle uygulanması hücrelerin hasarsız kazanılmasına imkân vermektedir (Doi vd., 2001). Benzer şekilde hekzan kullanımı da hücrelerin hasarsız elde edilmesine imkân verse de çok yanıcı ve zehirli olması nedeniyle uygulamada riskler barındırır. Tolüen çeşitli çalışmalarda en uygun malzeme olarak öne çıkmaktadır (Dias vd., 2021; Lovato vd., 2021). İşlem öncesinde panelin parçalanarak daha küçük parçalara ayrılması, mikrodalga desteği de verildiğinde çözücünün EVA içerisine geçişmesini kolaylaştırdığı için işlem süresini önemli ölçüde kısaltarak 1-2 saat mertebesinde indirebilmektedir (Pang vd., 2021; Kim & Lee, 2012; Xu vd., 2019). "Süperkritik CO_2 ekstraktör" kullanımı da yine etkili katmanlara ayırma yöntemlerinden biri olup tolüen ile birlikte kullanıldığında yine bir saatte sonuç vermektedir (Lovato vd., 2021).

FV panellerin kimyasal yöntemlerle katmanlara ayrılması literatürde çok erken zamanlardan beri önerilen bir yöntem olmakla birlikte birtakım olumsuz sonuçları vardır. Bu dezavantajların başında süreç sonrasında gaz ve sıvı olarak ortaya çıkan atıkların sebep olacağı çevresel kirliliktir. Diğer bir olumsuz yön, işlemin genellikle uzun zaman alması dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda yüksek miktarlarda FV atığın işlenmesini zor hâle getirmesidir. Bu durum diğer seçeneklere göre kimyasal katmanlara ayırma işleminin maliyetini artıran bir faktördür.

FV hücrenin hasarsız geri kazanılması için kimyasal katmanlara ayırma yöntemi etkili bir seçenektir. Buna rağmen, piroliz yöntemine benzer şekilde, çözücü kullanımı FV hücrelerin kırılması ile sonuçlanabilmektedir. Bunun nedeni çözücünün EVA'yı sıvı ile şişirerek hacmini artırması, şişen EVA'nın hücreye mekanik baskı uygulayarak kırılmasına neden olmasıdır. EVA şişmesi hücre ile arka film arasında gerçekleştiğinde, arka filmin esnek olmasından dolayı sorun yaşanmaz, ancak şişen EVA hücre ile cam arasındaysa FV hücreler kırılır (Doi vd., 2001). Bu durumu önlemenin yolu çözünmenin şişmeden daha hızlı gerçekleşmesini sağlamak ya da panelin arkasına şişmeyi önleyecek mekanik baskı uygulamak olarak önerilmektedir. FV hücrenin bütün olarak geri kazanılması hedeflenmeyen uygulamalarda, panel iri parçalar öğütülerek işleme sokulduğu için bu sorun yaşanmayacaktır.

Kimyasal katmanlara ayırma işleminin en önemli avantajı, camın tekrar panel camı üretilebilecek saflıkta geri kazanılmasını sağlamasıdır (Pagnanelli vd., 2019).

Tablo 15: Yayımlanmış Çözücü Uygulamaları (Yan vd. 2023)

Referans	FV Panel tipi	Koşullar	Sonuç
Bohlve ve Anisimov (1997)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Gaz: azot Süre: 60dk T: 520°C	Tam ayırma
Tammaro vd. (2015)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Gaz: hava Süre:30dk T:600°C	Tam ayırma
Doi vd. (2001)	Si	Girdi: Ufalanmamış örnekler Çözücü: trikloroetilen Süre: 10 gün T: 80°C	Tam ayırma, Hasarsız FV hücre
Kim ve Lee (2012)	Si	Girdi: Ufalanmamış malzeme Çözücü: O-diklorobenzen Süre: 30 dk T: 70°C Ultrasonik güç: 900W	Tam ayırma, Hasarsız FV hücre
Pagnanelli vd. (2019)	Si İnce film	Girdi: ufalanmış parçacıklar Çözücü: siklohekzan	Tam ayırma

		Süre: 60 dk T: 40–60°C	
Kang vd. (2012)	Si	Girdi: Ufalanmamış örnekler Çözücü: tolüen Süre: 2 gün T:90°C	EVA'lı FV Hücreler
Xu vd. (2021)	Si	Girdi: Ufalanmamış örnekler Çözücü: tolüen gazı Süre: 4 gün T:120–210°C	EVA'da gaz çıkış kanalları oluşumu
Rubino vd. (2021)	Si	Girdi: Ufalanmış örnekler Çözücü: siklohekzan Süre: 120 dk T:70°C	EVA'lı FV Hücreler
Lovato vd., 2021	Si	Girdi: Ufalanmış örnekler Çözücü: tolüen Süre: 60 dk	EVA'lı FV Hücreler
Pang vd., 2021	Si	Girdi: Ufalanmış örnekler Çözücü: trikloroetilen Süre: 120 dk T:70°C	EVA'lı FV Hücreler

7.3 Kırılmamış FV Hücrelerden Dilim Elde Edilmesi

FV panelin katmanlara ayrılmasına yönelik işlemlerin bazıları kırma ve öğütme içermediği için süreç sonunda FV hücreler hasarsız olarak geri kazanılabilmektedir. Ancak fotovoltaik hücre ve panel teknolojileri hızla gelişen bir alan olduğu için bir panel geri dönüşüm aşamasına geldiğinde büyük olasılıkla artık eski teknolojiye sahip ve verimlilik değeri düşük olacaktır. Bu panelden elde edilecek hücrelerin olduğu gibi kullanılması verimsiz bir sonuç vereceği için hücrenin ana unsuru olan ve değerli metal olmasa da saflaştırılmış olduğu için endüstriyel anlamda değeri yüksek olan silisyum dilimin geri kazanılarak yeni teknolojiler ile hücre hâline getirilmesi yolu tercih edilecektir. Bununla birlikte, hücre verimliliklerinde gözlemlenen sürekli gelişmeye paralel olarak, hücre boyutları ve dolayısıyla hücre üretim ekipmanları sürekli değişim gösterdiği için elde edilen Si dilimin tekrar kullanımı da her zaman mümkün olmayabilir.

Si dilimlerin temizlenmesinde modül ve hücre üretim sürecinin tersi yönünde bir yol izlenmektedir. Tipik bir fotovoltaik hücre üretim süreci, kütükten elde edilmiş gri Si dilimine uygulanan çeşitli aşamaları içerir. İlk adımda, silisyum dilimi yüzeydeki kusurları gidermek için temizlenir ve pürüzsüz duruma getirilir. Ardından, dilimin ön yüzeyine bir p-n bağlantısı oluşturmak için fosfor veya bor gibi katkı maddeleri yayılır. Yüzey, ışığın daha iyi emebilmesini sağlamak amacıyla piramidal şekilde yapılandırılır. Ardından ön ve arka yüzeylerine metal kontaklar yerleştirilir. Son aşamada, yansıma önleyici (antireflektif) bir kaplama uygulanarak ışık yansıması azaltılır ve hücrenin performansı artırılır.

FV hücrelerden Si dilim elde edilmesi yukarıda tanımlanan sürecin tersi olduğu için öncelikle hücrelerin üzerindeki iletken metallerin kaldırılması gerekir. Bu amaçla uygulanan işleme özütleme (İng. Leaching) adı verilmektedir. Metallerin geri kazanımı amaçlı özütleme işlemi, metal içeren atıkların ya da cevherlerin uygun çözücülerle temas ettirilerek, metallerin çözülmesini sağlayan bir hidrometalurjik süreçtir. Bu işlem, atık FV panellerden geri kazanılan metalleri çözmek ve ayrıştırmak için yaygın olarak kullanılır. Metal iyonları, sıvı fazda çözündükten sonra, çözeltiye geçen metaller daha sonra çöktürme, sıvı ekstraksiyonu, elektrolitik kaplama, iyon değişimi ve oksidasyon/indirgeme yöntemleriyle geri kazanılır. Bu işlem sonucunda bakır, kalay, kurşun, gümüş ve alüminyum metalleri elde edilir. HNO_3 veya H_2SO_4 kullanılarak hücreleri birbirine bağlayan tellerdeki bakır, kurşun ve kalay ayrıştırılabilir. Paneller içindeki en değerli malzeme olan gümüşün geri kazanılması için de yine HNO_3 kullanılır. Çözelti içindeki Ag iyonları NaCl/HCl ile AgCl olarak çöktürülebilir ve AgCl filtrasyon yoluyla elde edilir. Gümüşün geri kazanılması için kullanılan bir başka yöntem de elektrolitik kaplamadır (İng. Electroplating). FV hücrelerde çokça kullanılan

bir başka malzeme olan alüminyumun ayrıştırılması için liç maddesi olarak NaOH veya KOH gibi alkali çözeltiler kullanılır. $Al(OH)_3$ asit çözeltisi ile çöktürülebilir ve Al_2O_3 yüksek ısıtma ile elde edilebilir.

Bütünlüğü bozulmadan geri kazanılmış FV hücrelerin metal kontakları temizlendikten sonraki adım, hücre üretimi sırasında oluşturulan mikro-nano ölçekteki katmanların ve difüze edilmiş malzemenin arıtılması gerekmektedir. Antireflektif kaplamanın (ARK) aşındırılması için HF veya H_3PO_4 içeren aşındırma macunları etkilidir. Silisyum dilim içerisine p-n bağlantısı oluşturmak amacıyla difüze edilen fosfor veya bor gibi katkı maddeleri alkalin çözeltilerle giderilebilir. Aynı anda hem metal kontakları, hem antireflektif kaplamayı, hem de p-n bağlantılarını kaldırmak amacıyla HNO_3+H_2SO_4+HF+CH_3COOH veya HNO_3+HF+CH_3COOH+Br_2 gibi karışımlar da birlikte kullanılabilir. Si hücre geri kazanım süreci de diğer işlem adımları gibi süre ve sıcaklık kontrolünün iyi yapılmasını gerektiren süreçlerdir. Uzun süreli asit uygulamaları bir süre sonra yüksek saflıktaki Si dilimin de aşınmasına neden olabilir. Ayrıca, FV hücrelere kimyasal temizleme dışında doğrudan fiziksel olarak kazıma işlemi uygulanarak da Si dilim elde edilebilmektedir. Bu işlemlerin özeti Tablo 16'da verilmektedir.

Tablo 16: Si Dilim Elde Edilmesi İçin FV Hücreye Uygulanan Yöntemler

Referans	Etken eleman	Sonuç
Kang vd. (2012)	HF + HNO3 + H2SO4 + CH3COOH	Metal/ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı
Klugmann ve Ostrowski (2010)	HF+CH3COOH+HNO3	ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı
Klugmann vd. (2010)	HNO3+HF+CH3COOH+Br2	ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı
Wang, Hsiao, and Du (2012)	HF+NaOH	ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı
Jeongeun, Jongsung, ve Nochang (2017)	Aşındırma pastası (H3PO4)	ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı
Park vd. (2015)	Mekanik kazıma	ARK/p-n bağlantısı aşındırıldı

FV panellerdeki hücrelerin bütün olarak geri kazanılması çevresel etkiler ve malzeme korunumu açısında önemli değer ifade etse de uygulanması gereken işlemlerin enerji, alan ve süre gibi yönlerden yüksek maliyeti ve elde edilen hücrelerin yeniden kullanılmasındaki zorluklar mevcut koşullarda bu yöntemi cazip kılmamaktadır.

7.4 FV Panel Geri Dönüşümü Patent Çalışmaları

FV panellerin geri dönüşümü konusunda dünyadaki gelişmelere dair önemli göstergelerden biri bu alanda kayıt altına alınan patentlerin sayısıdır. Patent koruması, bilimsel ve teknolojik Ar-Ge çalışmalarının sonucunda ticarileşme potansiyeli taşıyan buluşlar ortaya konulması durumunda bunların başkaları tarafından çalınmasını ve taklit edilmesini önleyen bir mekanizmadır. Her patentlenen buluş ticari bir başarı olmasa da patentlenen buluş sayısı bir alanda yapılan çalışmaların yoğunluğunun önemli bir göstergesidir.

Google Patents (https://patents.google.com/) sitesinde "*PV AND PANEL AND RECYCLING"* sorgu parametresi ve 01.01.2024 – 12.07.2024 tarih aralığı ile yapılan arama sonucunda, 1226 patent kaydı listelenmiştir. Bu liste üzerinden yalnızca patent başlıklarına bakılarak yapılan filtreleme sonucunda 47 patentin doğrudan ÖT FV geri dönüşümü konusu ile ilgili olduğu belirlenmiştir (Tablo 17).

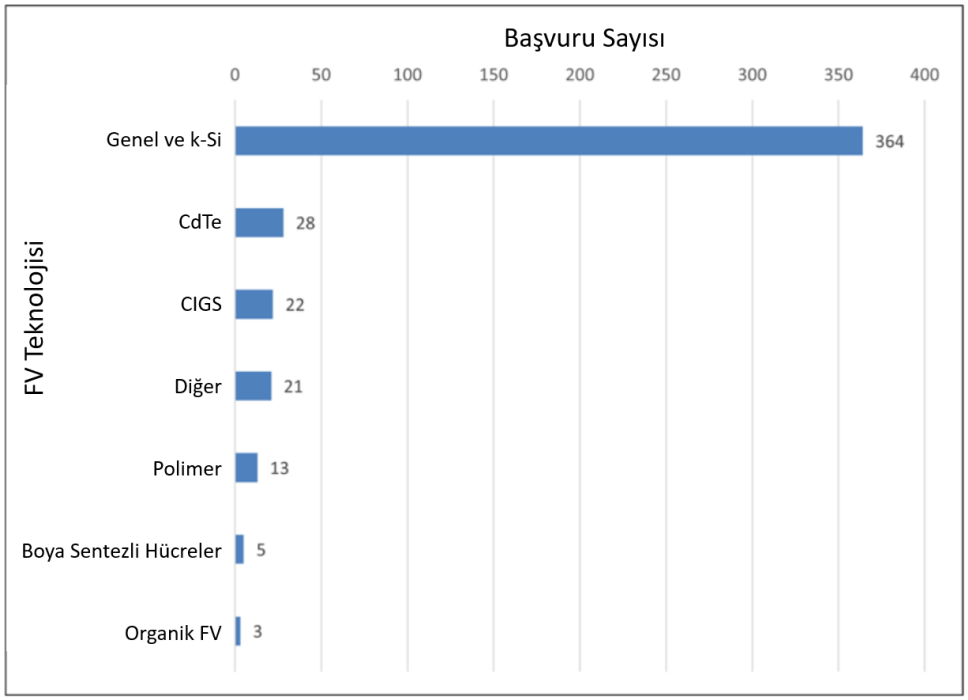
Belirlenen patentlerin bir adedi Tayvan, bir adedi Avusturalya, kalan 45 adedi ise Çin kaynaklıdır. Patentlerin bazıları panelin belli bir bileşenindeki bir maddenin geri kazanımına yönelik özel bir uygulama ile ilgiliyken (ör. CN-118165363-A Method for removing ethylene-vinyl acetate copolymer of solar panel by using N-methyl-2-pyrrolidone), bazıları ise çok daha genel nitelikte (CN-118218368-A Photovoltaic module recycling process) olabilmektedir.

Tablo 17: 2024 Yılı İlk Altı Ayında Yayımlanan FV Panel Geri Dönüşüm Patentleri

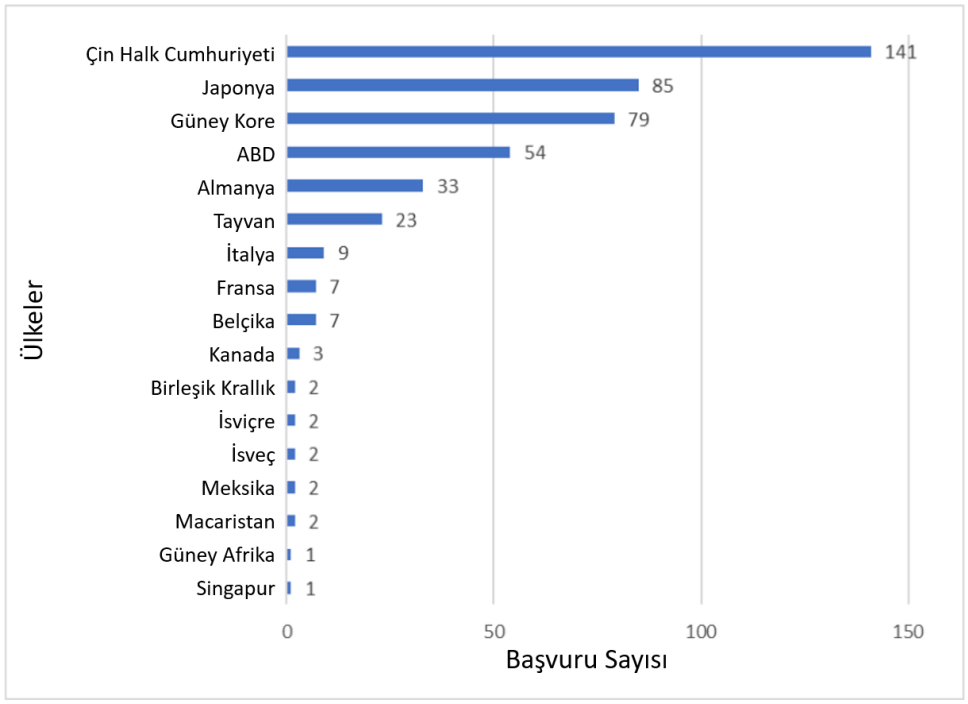
Patent Numarası	Patent Başlığı	Yayın Tarihi
CN-118218368-A	Photovoltaic module recycling process	2024-06-21
TW-M656786-U	Solar Panel Waste Treatment System	2024-06-11
CN-117943387-A	Recovery device and method for photovoltaic module	2024-04-30
CN-117920712-A	Photovoltaic board recovery unit	2024-04-26
CN-117798524-A	Photovoltaic module recycling system and recycling method based on laser separation layer	2024-04-02
CN-117943379-A	Process and method for separating different components from waste photovoltaic modules	2024-04-30
CN-118002600-A	Recovery method of solar cell backboard	2024-05-10
CN-118204344-A	Recovery method of waste photovoltaic module	2024-06-18
CN-118180121-A	Method for removing ethylene-vinyl acetate copolymer of solar panel by using organic solvent system	2024-06-14
CN-118083997-A	Process for manufacturing silicon fertilizer by recycling waste photovoltaic panels	2024-05-28
CN-118039732-A	Processing method of solar photovoltaic cell panel with high photoelectric conversion efficiency	2024-05-14
CN-118002586-A	Recovery device and recovery method for glass in photovoltaic module	2024-05-10
CN-118180106-A	Photovoltaic module glass panel recovery unit	2024-06-14
CN-118204175-A	Broken recovery line and recovery method for solar cell panel	2024-06-18
CN-118122743-A	Photovoltaic module recycling method and device	2024-06-04
AU-2024901281-A0	Rotary drum recycling of photovoltaic panels	2024-05-16
CN-117900226-A	Photovoltaic module recycling process and equipment	2024-04-19
CN-118180114-A	Retired photovoltaic module recycling equipment and process based on thermal mass conservation	2024-06-14
CN-118142923-A	Solar cell panel adhesive removing device	2024-06-07
CN-117960668-A	Solar photovoltaic module waste material recovery device	2024-05-03
CN-118165363-A	Method for removing ethylene-vinyl acetate copolymer of solar panel by using N-methyl-2-pyrrolidone	2024-06-11
CN-117861771-A	Photovoltaic module battery piece crushing and recycling equipment	2024-04-12
CN-118002467-A	Photovoltaic fragment screening system and separation method of photovoltaic module glass plate and silicon wafer	2024-05-10
CN-118109698-A	Method for recycling silver and co-producing high-silicon aluminum alloy by using waste crystalline silicon battery	2024-05-31
CN-118028603-A	Method for recovering and extracting metal from waste solar panels	2024-05-14
CN-118080529-A	Integrated assembly line for disassembling and recycling laminated piece in photovoltaic module	2024-05-28
CN-118106323-A	Stripping device for disassembling photovoltaic module and photovoltaic module disassembling equipment	2024-05-31
CN-117983642-A	Realize abandonment photovoltaic module dismounting device that silicon chip integrality was retrieved	2024-05-07
CN-117862199-A	Method for recycling aluminum and silver from waste silicon crystal solar cell	2024-04-12
CN-118028607-A	Method for recycling valuable metals in waste photovoltaic modules in closed-loop mode	2024-05-14

CN-118162452-A	Efficient sequencing batch decoupling method for EVA adhesive film of crystalline silicon photovoltaic module	2024-06-11
CN-117699742-A	Hydrofluoric acid regeneration method for photovoltaic waste acid	2024-03-15
CN-118080546-A	Method for recycling organic solar cell device	2024-05-28
CN-117995929-A	Laminating equipment and laminating method for photovoltaic module	2024-05-07
CN-117862190-A	Oil bath heating device for disassembling waste photovoltaic modules and application method thereof	2024-04-12
CN-118016384-A	Waste cable recycling equipment for photovoltaic system	2024-05-10
CN-220765465-U	Solar garbage classification collecting station	2024-04-12
CN-118109690-A	Method for recycling copper, silver, lead and tin from waste photovoltaic solder strip	2024-05-31
CN-118109699-A	Method for recycling aluminum and silver from waste crystalline silicon battery by utilizing cooperation of ultrasonic waves	2024-05-31
CN-118107093-A	Method and equipment for separating plastic backboard of waste photovoltaic module	2024-05-31
CN-117800057-A	Unpacking and recycling method for photovoltaic industry	2024-04-02
CN-117697647-A	Grinding wheel for grinding photovoltaic glass	2024-03-15
CN-118109689-A	Method for respectively recovering silver, silicon and aluminum from waste photovoltaic silicon battery piece	2024-05-31
CN-118222831-A	Method for improving mechanical properties of regenerated Cu-Sn-Pb alloy of waste photovoltaic solder strip	2024-06-21
CN-118036385-A	SPH-FEM coupling simulation method for water grinding separation retired photovoltaic module	2024-05-14
CN-118253964-A	Disassembling mechanism for photovoltaic aluminum profile	2024-06-28
CN-118198324-A	Method for preparing carbon-coated porous silicon-based lithium battery anode material from photovoltaic crystalline silicon waste	2024-06-14

Uluslararası Enerji Ajansı altında faaliyetlerini yürüten Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı (IEA-PVPS) ömrünü tamamlayan FV panellerin yönetimi konusunda düzenli olarak raporlar yayımlamaktadır. 2024 yılının Haziran ayında yayımlanan FV modül geri dönüşümü alanındaki güncel gelişmelerin özetlendiği raporda patentler ile ilgili ayrıntılı bir bölüme yer verilmiştir (Wambach vd., 2024). Araştırmacılar 1991'den Ağustos 2022'ye kadar olan dönem için dört ayrı sorgulama kaynağı kullanarak yaptıkları analiz sonucunda FV panel geri dönüşüm süreçlerini hedefleyen 456 patent tespit edildiği, bunların %80'inin silisyum bazlı modüller, hücre metaller, polimerler, cam veya cihazlar için geri dönüşüm süreçlerine yönelik olduğu raporlanmaktadır (Grafik 12). Raporda patent sayısına göre ülke sıralamasında (Grafik 13), Çin 141 patent ile ilk sırada, Japonya 85 patent ile ikinci sırada, Güney Kore 79 patent ile üçüncü sırada, ABD 54 patent ile dördüncü sırada ve Almanya 33 patent ile beşinci sırada yer aldığı belirtilmektedir. Samsung ve LG gibi küresel elektronik devleri ile iş birliği içinde çalışan Kore Enerji Araştırmaları Enstitüsünün en çok patent başvurusu yapan kuruluş olduğu, hemen arkasından geri dönüşüm ekipmanı üreten Suzhou Goldway Technologies Co. Ltd.'nin geldiği, üçüncü sırayı ABD'li CdTe modül üreticisi First Solar'ın aldığı, bunları dünyanın belli başlı büyük panel üreticilerinden Yingli'nin izlediği ortaya çıkmıştır.



Grafik 12: Geri Dönüşüm Patent Başvurularının FV Teknolojisi Bazında Dağılımı (Kaynak: IEA-PVPS, 2024)



Grafik 13: FV Panel Geri Dönüşüm Patent Sahiplerinin Ülkeler Bazında Dağılımı (Kaynak: IEA-PVPS, 2024)

8 FV Panel Geri Dönüşüm Karşılaşılan Zorluklar

ÖT FV panellerin geri dönüşümü bir yandan çevresel etkilerin kontrol altına alınarak azaltılmasını sağlayarak güneş enerji sistemlerinin ömür boyu etkilerini düşürme yönünde etki yaratmakta, diğer yandan da geri kazanılan malzemelerin değeri açısından katkı sağlamaktadır. Bu açılardan, geri dönüşüm sektörünün de panel üretim ve GES kurulum hızına paralel bir gelişim göstermesi beklenmektedir. Bu gelişim sektörde gözlenmediği gibi, GES yatırımlarında panellerin ömrünü tamamladığında ne olacağı konusu nadiren gündeme gelmektedir.

Geri dönüşüm sektörünün gelişiminin beklenen hızda gerçekleşmemesine neden olan çeşitli engeller olduğu yapılan araştırmalarda ortaya çıkmaktadır. Akademik literatürde ve endüstri analiz raporlarında ÖT FV panel yönetimi ile ilgili çok sayıda engel ve zorluklar listelenmektedir. Bu yayınlarda çalışmaların içeriğine, kapsamına ve odaklanılan ülke ya da bölgeye göre zorluk listeleri önemli değişiklikler gösterebilmektedir. Örneğin, Franco ve Groesser değer zinciri perspektifinden fotovoltaik güneş enerji sistemlerinin sistematik bir incelemesini yaparak, döngüsel ekonomi teorisinde tanımlanan döngüselliğin önündeki engelleri belirlemektedir (Franco & Groesser, 2021). Benzer şekilde Radavičius vd. de FV endüstrisi tedarik zincirini döngüsel ekonomi perspektifinden araştırmaktadır (Radavičius vd., 2021). Wang vd., Çin'deki FV atık geri dönüşümünün önündeki engelleri tartışmaktadır (Wang vd., 2023). 2024 yılında yayımlanan bir inceleme makalesinde Cheema vd. mevcut ve gelecekteki ÖT FV geri dönüşümü ile ilgili sorunları, özellikle mevcut geri dönüşüm teknolojilerine dikkat ederek, çeşitli boyutlardan ele almaktadır (Cheema vd., 2024). Hem ÖT FV panelleri hem de batarya enerji depolama sistemlerini göz önünde bulunduran Salim vd.'nin inceleme makalesi, itici güçleri, engelleri ve fırsatları detaylı bir şekilde açıklamaktadır (Salim vd., 2019). Ülkeye özgü çalışmaların eksikliğini vurgulayan Khawaja vd.'nin yayını, Ürdün'deki ÖT FV yönetim sorunlarına odaklanmaktadır (Khawaja vd., 2021). Sözü edilen yayınlar da incelendiğinde zorlukların çeşitli sınıflar altında toplandığı, ancak sınıflandırmada kullanılan zorluk kategorilerinin de farklılık gösterdiği gözlemlenmektedir.

Bu rapor için yapılan çalışmada, yukarıda listelenen makalelerde ifade edilen toplam 85 adet zorluk ve engel maddesi tek bir listede birleştirilerek yeniden sınıflandırılmasına yönelik bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında tüm zorluklar incelenerek ortak bir sınıflandırma sistematiği içinde tekrar kategorilere ayrılmıştır. Bu kategoriler Teknolojik, Çevresel, Ekonomik, Sosyal, Politika ve Piyasalar olarak belirlenmiştir. Kategorilerin belirlenmesinde kendi arasında içerik olarak benzerlik gösteren zorluklar daha sonra tek bir ifadeye dönüştürülmüştür. Bu adımlar sonrasında Tablo 18'de listelenen 6 kategoride toplam 25 engel ve zorluk belirlenmiştir. Bu listede en yüksek sayıda zorluk, Teknolojik ve Piyasalar kategorilerinde bulunmuştur. Bunu, 4 zorlukla Ekonomik kategorisi izlemektedir. Çevresel, Politika ve Sosyal kategorilerin her birinde 3 zorluk bulunmaktadır. Toplamda, 25 benzersiz zorluk listelenmiştir. "Geri dönüşüm yatırımlarının cazip olmaması" zorluğu incelenen 7 çalışmada da yer alması açısından önemlidir. Benzer şekilde, Piyasalar kategorisinde, "Geri dönüşüm altyapı ve tesislerinin eksikliği" referans makalelerin çoğunda ifade edilmiş olması açısından öne çıkmaktadır. Aynı durum, "Mevzuat ile ilgili çerçevenin eksikliği ya da yetersizliği" ve "FV atıklarının geri dönüşümü için teşvik ve sübvansiyonların eksikliği" için de geçerlidir.

ÖT FV panelleri doğru şekilde yönetmenin gerekliliği, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak, atıkları azaltmak ve değerli malzemeleri geri kazanmak için son derece önemlidir. Ancak, sorun çok yönlü olduğundan, çözümler spektrumundaki her ilgili aktör, kendi yetenek setiyle ele alabilecekleri zorlukları belirlemelidir. Birleştirilmiş zorluklar listesine dayanarak, aktörler stratejik yollarını ve eylem planlarını daha etkili bir şekilde belirleyebilirler.

Tablo 18: ÖT FV Panellerin Yönetimi Önündeki Engel ve Zorluklar

Kategori	Engel / Zorluk
Teknolojik	FV panel teknolojilerinin ve ürün tasarımlarının çeşitliliği
	Geri dönüştürülmüş malzemeden yapılan FV panellerin düşük verimi
	Düzensiz atık akışından doğan operasyonel zorluklar
	FV panel tasarım detaylarının açıklanmamasından doğan belirsizlik
	FV panel tasarımından dolayı geri dönüşümün karmaşıklığı
	Malzeme geri kazanımı için gerekli teknolojinin eksikliği
Çevresel	Atık nakliyesinden kaynaklanan kirlilik ve emisyon
	Geri dönüşüm sırasındaki kirlilik ve emisyon
	Geri dönüşüm sürecinin yüksek enerji gereksinimi
Ekonomik	Geri dönüşüm yatırımlarının cazip olmaması
	Yüksek lojistik maliyetleri
	Geri dönüşüm operasyonunun yüksek maliyeti
	Fizibilite çalışmalarında kullanılacak verilerin eksikliği
Sosyal	Geri dönüşüme/kazanıma yeterince önem verilmemesi
	Geri dönüşüm alanında yetkin/yetişmiş personel eksikliği
	Tüketicilerin dönüştürülmüş malzemeden yapılan panellere güvenmemesi
Politika	Mevzuat ile ilgili çerçevenin eksikliği ya da yetersizliği
	FV atıklarının geri dönüşümü için teşvik ve sübvansiyonların eksikliği
	Hedefler ve sorumluluklar konusunda hükümet politikalarının eksikliği
Piyasalar	Atık malzeme miktarının yetersiz ve belirsiz olması
	Endüstri değer zincirinin yetersiz olması
	Geri dönüşüm altyapı ve tesislerinin eksikliği
	İhale ve sözleşmelerde tesis sökümünün konu edilmemesi
	Piyasa aktörlerinin uzun ömürlü işletmeler olmaması
	Üreticiler ve geri dönüştürücüler arasında iletişim eksikliği

Tablo 18'de listelenen zorluklarla ilgili en önemli kısıtlama, yalnızca uluslararası akademik literatür taramasına dayalı olarak hazırlanmış olmasıdır. Daha derinlemesine bir çalışmada, sanayi, politika yapıcılar, tesis sahipleri, döngüsel ekonomi uzmanları, sivil toplum temsilcileri, belediyeler ve çevre bilimi uzmanlarından oluşan bir uzman paneli oluşturulması ve literatür taramasından derlenen zorluklar listesi bu panel tarafından gözden geçirilip iyileştirilmesi çok daha gerçekçi ve ülke koşullarına uygun olacaktır. Ayrıca bu yöntemle, zorluklara uzman bakış açısıyla ağırlıklar atanması da yapılabilir, böylece zorlukları hafifletmek için harekete geçmesi beklenen taraflar, önceliklerini daha etkili bir şekilde belirleyebilirler.

9 Çeşitli Ülkelerde ÖT FV Panel Geri Dönüşüm İşletmeleri ve Girişimleri

9.1 FV Panel Atığı Toplayan ve İşleyen Firmalar

ÖT FV panellerin ne şekilde değerlendirileceği konusu 2000'li yılların başından beri araştırmalar yürütülen bir alandır. Akademik çalışmaların yanı sıra işletmeler de bu alanda faaliyet göstermektedir. Fotovoltaik güneş enerjisi üretiminin öncü konumda olan ülkeler, buna paralel olarak geri dönüşüm çalışmalarını gündemlerine almış ve ticari işletmeler ortaya çıkmıştır. Bugün güneş enerjisi yatırımlarında liderliği elinde tutan ülkelerin FV atık toplama ağları ve işleme tesisleri de görece daha gelişmiş durumdadır. FV panel atığı işleme konusunda dünyanın çeşitli ülkelerinden örnekler Tablo 19'de verilmektedir.

Tablo 19: FV Atık İşleme Alanında Çalışan Firma ve Kuruluşlar

Ülke	Firma/Kurum	Geri Dönüştürülen Bileşen	Internet Sayfası
ABD	Cleanlites Recycling	Panel	https://cleanlites.com/our-services/solar-panel-recycling
ABD	Dynamic Lifecycle Innovations	Panel, Kablo, Bağ. Kutusu, Çerçeve	https://thinkdynamic.com/
ABD	Echo Environmental	Panel	https://echoenvironmental.com/
ABD	ECS Refining	Panel	https://www.ecsrefining.com
ABD	FabTech	Panel	https://fabtech.net/
ABD	First solar	Panel	http://www.firstsolar.com/
ABD	Green lights recycling	Panel	http://www.glrnow.com/
ABD	Interco trading	Panel, Cam, Bağ. Kutusu, Çerçeve	http://www.intercotradingco.com/
ABD	Metal & Catalyst Resources	Kimyasallar	http://www.morgenindustries.com/
ABD	Mitsubishi Electric	Panel	https://www.mitsubishielectric.com/en/sustainability/environment/ecotopics/index.html
ABD	Morgen Industries	Hücre	http://panoramicresourcespartners.com/
ABD	Recycle1234	Panel	https://recycle1234.com/
ABD	Sun's Recycling Inc.	Panel	https://www.sunsrecycling.com/
ABD	Surplus Service	Panel	https://www.surplusservice.com/
ABD	TT&E Iron & Metal Inc.	Çerçeve	https://www.ncscrapmetal.com/
ABD	We Recycle Solar	Hücre, Panel, Kimyasallar	https://werecyclesolar.com/
Almanya	Aurubis	Metal, Bakır	https://www.aurubis.com/en/products/recycling/recycling-at-aurubis
Almanya	Envaris	Panel,Kablo	http://www.envaris.de/fr/
Almanya	Frisetec	Kütük, Dilim, Hücre	https://www.fresitec.de/
Almanya	LuxChemtech	Cam, Metaller	https://lc-freiberg.de/
Almanya	Reiling Glas Recycling	Panel	https://www.rema.cloud/
Almanya	Rieger & Kraft Solar	Panel	https://solar-rieger-kraft.de/recycling/
Almanya	Rinovasol	Panel	https://www.rosi-solar.com/
Avustralya	Infoactiv	Panel	https://ecoactiv.com.au/
Avustralya	Ojas Infrastructure	Panel	https://www.ojas.com.au/
Avustralya	Pan Pacific Recycling	Panel	https://pproz.com.au/
Avustralya	PV Industries	Panel	https://www.pvindustries.com.au/

Avustralya	Reclaim PV Recycling	Panel	https://www.reclaimpv.com/
Çekya	REMA PV Systém	Panel	http://www.rinovasol.com/
Çin	Jiangsu Juxin Energy Silicon Technology	Kütük, Dilim, Hücre, Panel, Sulu Karışım	http://yangzhou090011.11467.com/
Çin	Kunshan Suda Jingwei Electronic Technology	Kütük, Dilim, Hücre, Panel, Sulu Karışım	
Çin	Suzhou Bocai E-energy	Panel	http://bocai.us764.com/
Çin	Suzhou Hedeying Metal	Şerit	http://www.xumin188.com/
Çin	Suzhou Shangyunda	Kütük,Dilim,Hücre, Panel, Sulu Karışım,Pasta	http://yachengda.com/
Çin	Suzhou Shunhui New EnergyTechnology	Dilim, Hücre, Panel	http://www.zcszhb.com/
Çin	Yuepeng New Energy	Dilim, Hücre, Panel, Sulu Karışım, Pasta	https://de.enfsolar.com/directory/service/58330/yuepeng-new-energy
Fransa	Veolia	Panel	https://www.veolia.com/
Fransa	RoSi Solar	Panel	https://www.rosi-solar.com/
Hindistan	Jumbo Solar	Hücre	https://jumbosolar.in/
İngiltere	H&H Pro	Cam, Alüminyum, Hücre, Metaller	https://www.hnhpro.co.uk/solar
İngiltere	Panoramic Resources Partners	Panel	https://pvtechno.info/
İngiltere	Recycle Solar Technologies	Panel, Cam, Kablo, Bağ. Kutusu	http://recyklaciapanelov.sk/
İngiltere	Solar2Recycle	Hücre, Panel, Kablo, Bağ. Kutusu	http://solucciona.com/
İrlanda	The Recycling Village	Panel	https://www.therecyclingvillage.ie/
İspanya	SolRecycle	Dilim, Hücre, Panel, Cam, Kablo, Bağ. Kutusu	http://www.solarsilicon.com/
İsrail	Silcontel	Kütük, Dilim, Hücre, Panel	https://silcontel-ltd.com/
İsviçre	IMMARK	Panel	http://www.immark.ch/
İsviçre	KWB Planreal AG	Panel	http://www.kwbplanreal.ch/
İsviçre	SENS Foundation	Panel	https://www.sic-processing-bautzen.de/
İtalya	EcoPV	Panel	https://www.eco-pv.it/
İtalya	Eco recycling	Panel	https://www.ecorecycling.eu/
İtalya	Experia Solution	Panel, Şerit,Cam,Kablo, Bağ. Kutusu	https://www.experia.solar/
İtalya	La Mia Energia	Panel	https://www.lamiaenergia.eu/
İtalya	Sasil	Panel	https://sasil-life.com/
İtalya	Tialpi	Panel	https://www.frelp.info/
Japonya	Eiki Shoji	Panel	https://www.eikishoji.co.jp/en/energy/recycle.php
Japonya	Hirakin	Panel	https://www.hirakin.co.jp/
Japonya	Okanishi Construction	Panel	https://kousai-k.co.jp/environmental-energy/
Japonya	PV Techno Cycle	Panel	https://www.r3-tech.biz/
Japonya	Trinity	Kütük, Dilim, Hücre, Kimyasallar	https://www.trinity-jck.com/
Slovakya	Recyklix	Panel	https://www.reiling.de/

Serbest girişime dayalı ekonomik sistemin yaygın olduğu ABD'de ÖT FV panel yönetimi alanında faaliyet gösteren firmaların sayısı da belirgin ölçüde fazladır. Bu firmaların bazıları sadece panellerin toplanması ile ilgilenirken bazıları geri kazanıma yönelik süreçler de uygulamaktadırlar. ABD'deki firmalar arasında özellikle dikkat çeken bir firma First Solar'dır. İnce film teknolojilerine sahip paneller üreten First Solar, panel içeriklerinin zehirli ve kıymetli metaller içermesi nedeniyle panellerini geri alma teminatı ile satışa sürmektedir. Ömrünü tamamlayan panellerin sökme, paketleme ve nakliye maliyetleri panel sahibi tarafından karşılanması kaydıyla, First Solar tarafından alınmaktadır. Panel geri dönüşümü programını 2005 yılında bu yana uygulamakta olan firmanın yıllık geri dönüşüm kapasitesi 2 milyon panel ölçeğindedir. Panellerin %90'dan fazlasını geri dönüştürebildiğini bildiren firma, geri dönüştürülen malzemelerle tekrar tekrar panel üretilmesi suretiyle aynı malzemenin 1200 yıl boyunca kullanılabileceğini iddia etmektedir. Diğer firmalar incelendiğinde bunların genelde ÖT FV atıkları da kapsamına almış elektrik ve elektronik atık tesisleri olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca geçmişte bu alanda faaliyet gösterdiği çeşitli kaynaklarda ifade edilmesine rağmen, sonradan hakkında bilgiye ulaşılamayan çok sayıda firma olması dikkat çekmektedir. Bir başka önemli konu da firmaların hiçbirinin yaygın hizmet veren ve köklü firmalar niteliğinde olmamasıdır. Bu verilere dayanarak, firma sayısı fazla olsa da ABD pazarının ÖT FV tesisleri konusunda güçlü bir altyapıya sahip olduğunu söylemek güçtür.

FV panel üretimi ve kullanımında öncü niteliğindeki Çin'de de panel geri dönüşümü alanında aktif firmalar bulunduğu gözlemlenmektedir. Ancak bu firmaların hizmet içerikleri ve kapsamları hakkında ayrıntılı bilgi edinmek mümkün olmamıştır. Ayrıca bu pazarda geçmişte yer aldığı anlaşılan firmaların an itibarıyla ulaşılamaması da söz konusudur.

Atık FV panellerin değerlendirilmesi konusuna önem veren ülkelerden biri de Avusturalya olup bu ülkede kurulu ve aktif olduğu gözlemlenen çok sayıda firma bulunmaktadır. Benzer şekilde, Japonya, İsrail, Kore, İngiltere, İrlanda, Hindistan gibi ülkelerde de bu alanda faaliyet gösteren firmaların bilgilerine ulaşılmıştır.

Avrupa Birliği ülkelerine bakıldığında ise, Almanya, Fransa, İtalya ve İspanya gibi ülkelerde bu alanda çalışan firmalar olduğu gözlenmektedir. Bu firmalardan bazıları teknoloji geliştirme alanında çalışırken bir diğer grup da genel elektrik ve elektronik cihaz atık işleme alanında FV panel atığı işleme alanına geçiş yapmış firmalardır. Avrupa'daki ÖT FV panel atık yönetimi söz konusu olduğunda incelenmesi gereken iki önemli yapı olarak PV Cycle ve Fransa'daki uygulamalardır. Bunlara aşağıda ayrıca yer verilmektedir.

9.2 FV Panel Geri Dönüşüm Makinesi Üreticileri

FV panellerin kullanımının son yıllardaki artışına paralel olarak geri dönüşüm de önem kazanırken, bu amaçla kullanılabilecek makine ve ekipman üreten firmalar da çıkmaktadır. Yapılan araştırmalardan FV atıkları işlemeye yönelik tesislerin önemli bir kısmında tesislerin kendi geliştirdikleri cihazların kullanılmakta olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşılık mevcut tesisler, ileride ortaya çıkması beklenen atık miktarlarının yanında deneysel denilebilecek derecede düşüktür. Gelecekte ihtiyaç duyulacak çok sayıdaki FV atık işleme ve geri dönüşüm tesislerinde kullanılacak makineleri üretecek firmalar sektörde önemli oyuncular olacaktır. Kaynaklardan edinilen bilgiler ve araştırmalar sonucunda belirlenen firmalar Tablo 20'te listelenmiştir.

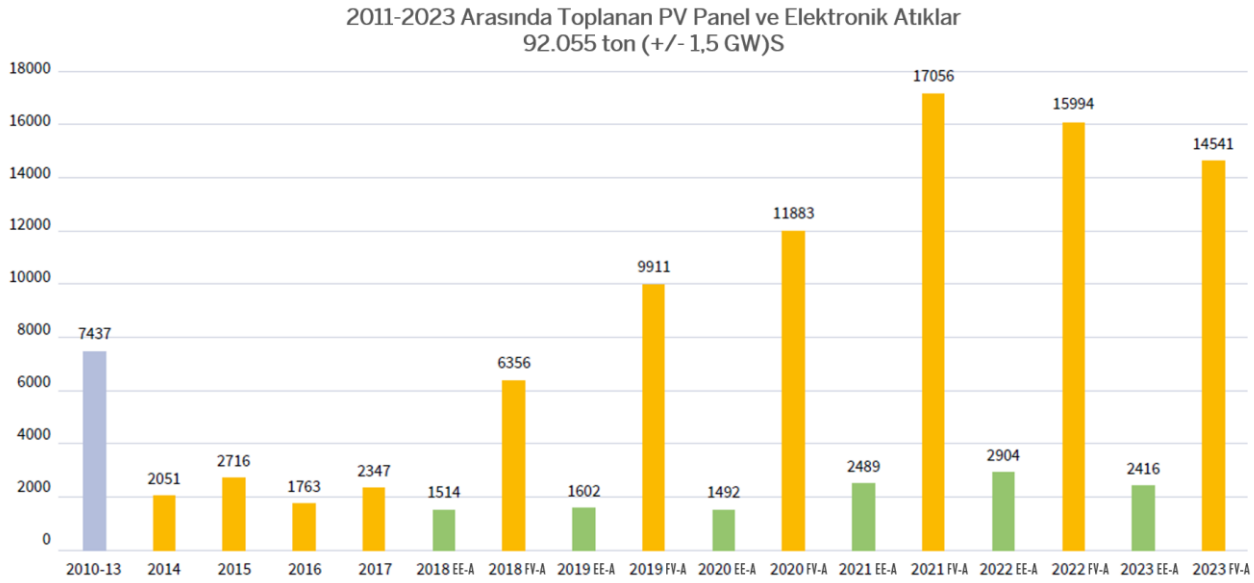
Tablo 20: FV Panel Geri Dönüşüm Makineleri Üreten Firmalar

Ülke	Firma/Kurum	Internet Sayfası
Almanya	SiC Processing	www.silcontel-ltd.com
Çin	Henan Chuangqing Mechanical Equipment	https://www.solarpanelrecyclingmachine.com/
Çin	Jereh	https://www.jereh-env.com/
Çin	Suny Group	https://www.sunygroup.cn/

Çin	Xrido	https://www.cnxrido.com/
Çin	Yezon-PV	http://yezon-pv.com/
İrlanda	Recycle IT	https://recyclesolar.co.uk/
İspanya	SolRecycle	http://www.solarsilicon.com/
İtalya	Experia Solution	https://www.experia.solar/
İtalya	La Mia Energia	https://www.metalandcatalyst.com/
Japonya	NPC Inc.	https://www.npcgroup.net/

9.3 PV Cycle Derneği

PV Cycle, merkezi Belçika'nın başkenti Brüksel'de bulunan, fotovoltaik modüllerin gönüllü geri alımı ve geri kazanımı için kurulmuş ve dernek niteliğinde bir kuruluştur. Üyelik sistemine dayalı bir dernek niteliğindeki PV Cycle'ın geçmişi, atık işleme, yaşam döngüsü sorunları ve gönüllü geri alım sistemleri üzerine ilk yayınların yayımlandığı 2003 yılına kadar uzanmaktadır. Bu konuyla ilgili birkaç çalıştayın ardından, PV Cycle Girişimi 2005 yılında başlamış ve FV endüstrisinde geri dönüşümü kurumsallaştırmayı amaçlayan bir şema oluşturmayı hedeflenmiştir. PV Cycle bundan iki yıl sonra, 5 Temmuz 2007 tarihinde kurulmuş ve her türlü kullanım ömrü sonu fotovoltaik modüllerin işlenmesi için geri dönüşüm şemaları ve programları uygulamayı amaçlanmıştır. Bu bağlamda, PV Cycle, atık yönetimi, kullanım sonrası işleme ve yeniden kullanım konularını da içeren, tamamen yeşil ve sürdürülebilir bir endüstri çapında gönüllü geri alım ve geri dönüşüm programı oluşturarak, nadir ve enerji yoğun ham maddeleri tasarruf etmeyi hedeflemektedir. PV Cycle'a üyelik ücretli olup özellikle Avrupa Birliği'nden ve artan sayıda Doğu Asya'dan üyeleri bulunmaktadır. 2023 yılı sonu itibarıyla PV Cycle tarafından toplanarak geri dönüşüme gönderilen FV atıkların birikimli miktarı yaklaşık 92 bin ton olarak bildirilmektedir (PV Cycle, 2024). Grafik 14'te PV Cycle tarafından 2011-2023 arasında toplanan atıkların miktarları grafik olarak sunulmaktadır. IRENA ve IEA PVPS'in ortak çalışmasına göre 2050 yılında ortaya çıkması beklenen FV atık miktarının 78 milyon ton olacağı dikkate alınırsa, mevcut organizasyonun ne derece başlangıç aşamasında olduğu anlaşılacaktır.



Grafik 14: PV Cycle Tarafından 2011-2023 Arasında Toplanan Atıkların Miktarı
(EE-A: Elektronik Ekipman Atığı, FV-A: Fotovoltaik Atığı)

9.4 SOREN Derneği

Fransa'da Ekolojik Dönüşüm Bakanlığının yayımladığı bir kararname ile Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (GÜS) kapsamında ÖT FV panellerin toplanması sorumluluğu münhasıran SOREN adlı derneğe verilmiştir. Atık yönetimi ile ilgili geçerli mevzuat kapsamında bu yapıya eko-organizma adı verilmektedir. Eko-organizmalar, belli bir sektörde üretim faaliyeti gösteren ve bu nedenle GÜS sorumluluğu taşıyan firmaların bir araya gelerek, hepsinin atıklarını ortak olarak yönetmesi için kurduğu bir dernek olarak tanımlanabilir. Bu doğrultuda SOREN'in kurucuları arasında EDF Renouvelables Technologies, EDF ENR PWT, ENGIE, Neoen, Systovi, Total Energies, Urbasolar, Voltec Solar gibi firmaların yanı sıra, PV CYCLE derneği ile Yenilenebilir Enerji Sendikası da bulunmaktadır. SOREN aracılığı ile toplanan FV panel atıkları, derneğin anlaşmalı olduğu geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir. SOREN'in Bakanlık tarafından FV atıkları alanında kabul edilen tek eko-organizma olması ve geri dönüşüm tesisleri ile sözleşmesinin olması, geri dönüşümü yapan tesislerin belirli bir atık akışı güvencesine kavuşmasını sağlamakta olup FV panellerin geri dönüşümünde karşılaşılan zorluklardan biri olan "Atık malzeme miktarının yetersiz ve belirsiz olması" sorununa çözüm getirilmektedir. Ancak hem SOREN'e verilen yetki hem de SOREN'in atıkların gönderdiği firmaların sözleşmesi süresiz değildir. Bu uygulama taraflara en iyi prensiplerle ve maliyet etkin olarak çalışma baskısını getirmekte, böylece sektörün kendisini geliştirmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak bu kurgu ile Fransa, Avrupa'da FV panel atık işleme konusunda öne çıkmakta, özellikle ROSI adlı şirket atık işleme tesisleri ile dikkat çekmektedir.

10 Dünyada ve Türkiye'de Sektörel Mevzuat

İklim değişikliği taahhütleri ve küresel enerji krizinin tetiklediği fiyat dalgalanmaları gibi etmenler yakıt gerekmeden enerji üretebilen yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi ölçeklenebilir olması nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir. Nitekim Uluslararası Enerji Ajansı Net Sıfır Senaryosuna göre FV güneş enerjisinin 2050 yılında, 2020 yılındaki kurulu gücünün 20 katına ulaşarak dünya elektrik üretiminin %33'ünü karşılaması beklenmektedir.

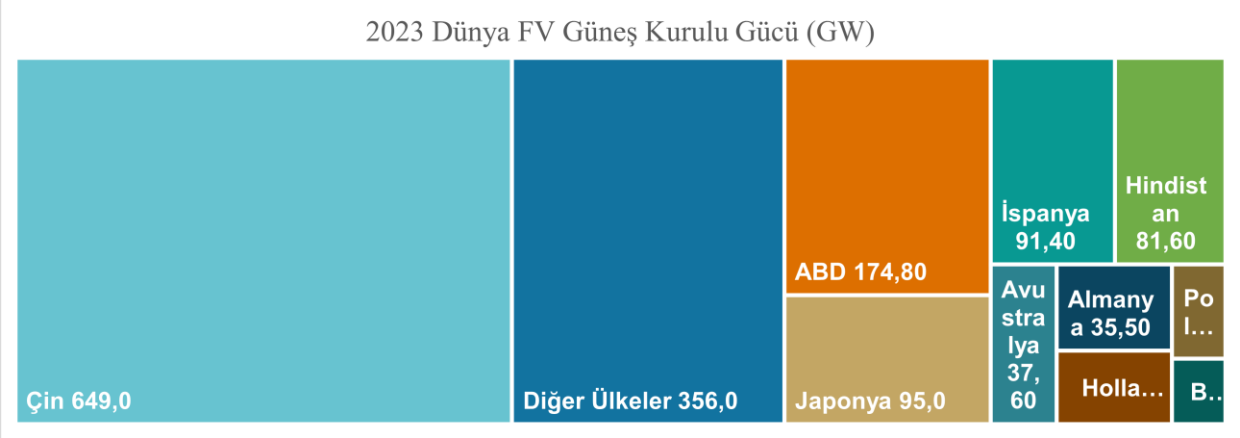
Buna karşılık, ömrünü tamamlamış güneş panellerinden kaynaklanan atıkların çevresel sürdürülebilirlik açısından nasıl yönetileceği sorusunu gündeme getirmekte ve olası çevresel sonuçlar dünya çapında giderek daha fazla gündem oluşturmaktadır. Güneş panellerinin çevreye, ekonomik ve sosyal açıdan faydalı hâle getirilmesi için çeşitli paydaşların rolleri belirlenmesi ve yükümlülüklerin tanımlanması gerekmektedir.

ÖT FV panellerin yönetimi ile ilgili küresel ölçekte herhangi bir düzenleme bulunmamaktadır. Ülke mevzuatları incelendiğinde, sadece pek az sayıda ülkede FV panellere özel düzenlemeler bulunduğunu, genel olarak FV atıkların ya genel atık yönetimi ya da elektrikli ve elektronik atıkların yönetimi ile ilgili mevzuat kapsamında değerlendirildiği görülmektedir. Çoğu ülkede, "Kirleten Öder" prensibinin belirlendiği ve GÜS mekanizmasının uygulandığı görülmektedir. Bu mekanizma üreticilere, kullanım ömrü sonunda ürünlerini toplama ve geri dönüştürme sorumluluğu yüklemektedir.

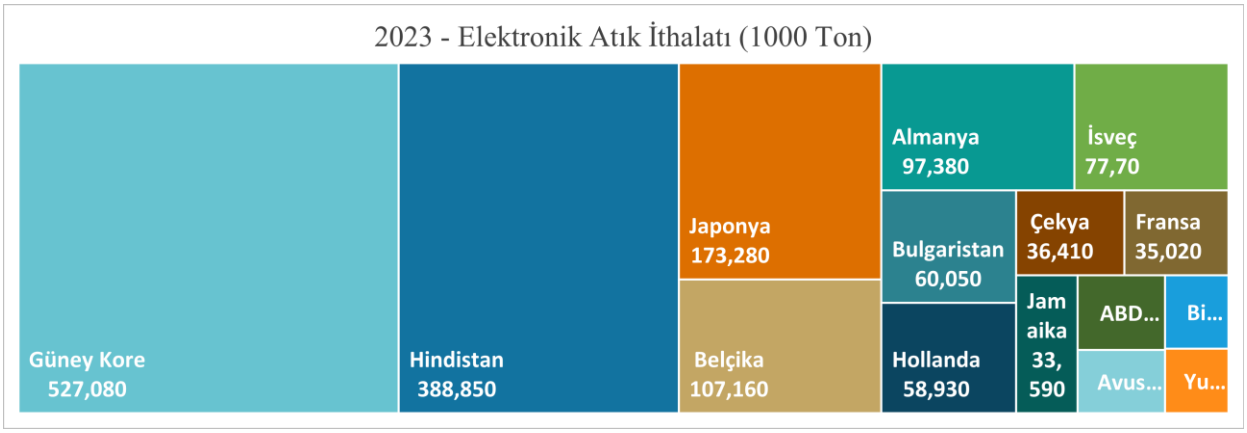
Ayrıca örneğin R2 ve e-Stewards gibi küresel gönüllü sertifikasyon programları ile ÖT FV panellerin de arasında yer aldığı elektronik atık geri dönüşüm süreçleri ile ilgili standartlar belirlenmesine yönelik girişimler de bulunmaktadır (e-Stewards, 2023; SERI (Sustainable Electronics Recycling International), 2020).

Bu bölümde incelenen ülkelerinin seçimi iki ana kritere dayanarak yapılmıştır. İlk olarak, bir ülkenin FV atık üretimi, mevcut kurulu kapasite miktarıyla doğrudan ilişkili olduğu için en yüksek kurulu kapasiteye sahip ülkeler dikkate alınmıştır. Grafik 15'te görüleceği üzere, küresel istatistiklere göre, 2023 itibarıyla kurulu kapasiteleri açısından ön sıralarda Çin, ABD, Japonya, İspanya ve Hindistan yer almaktadır (REN21, 2024). İkinci kriter ise bir ülkenin ithal ettiği elektronik atık miktarıdır. Elektronik atık ithalat değerleri yüksek olan ülkelerin elektronik atık yönetimi için gelişmiş bir endüstri değer zincirine ve dolayısıyla sağlam bir politika ve düzenleyici çerçeveye sahip olmaları beklendiği için incelemeye değer bulunmuştur. Bu ülkeler Güney Kore, Hindistan, Japonya, Almanya ve Belçika olup ithalat miktarları Grafik 16'da sunulmuştur (Trade Map, 2024). Japonya, Hindistan ve Almanya her iki listede de yer almaktadır. Belçika ve Hindistan, rapor kapsamında incelenen ülke sayısını sınırlamak amacıyla dâhil edilmemiştir. Yukarıda bahsedilen listelerde Almanya, bireysel bir ülke olarak yer almaktadır. Ancak Almanya'nın tabi olduğu mevzuat, Avrupa Komisyonu tarafından belirlenen genel düzenlemelerle uyumlu olmak durumundadır. Genel olarak, AB yönetmeliklerinde belirlenen kurallar tüm üye devletleri için bağlayıcı niteliktedir. Bu nedenle rapora, Almanya bireysel bir ülke olarak dâhil edilmesi yerine, AB genel başlığı tanımlanmış ve bu alanda dikkat çekici düzenlemeleri hayata geçirmiş üye ülkeler incelenmiştir.

Sonuç olarak, raporun bu bölümünde ABD, Çin, Japonya, Güney Kore, Avrupa Birliği ve çeşitli üye ülkeler ile Türkiye olarak belirlenmiştir.



Grafik 15: 2023 Yılında Ülkeler Bazında FV Kurulu Gücü (GW)



Grafik 16: 2023 Yılında Ülkeler Bazında Elektronik Atık İthalatı

10.1 Amerika Birleşik Devletleri

ABD güneş enerjisinde elektrik üretiminde dünyanın önde gelen ülkelerinden biridir. Özellikle son yıllarda güneş enerjisi sektörünün kaydettiği büyüme dikkat çekici ölçüdedir (Ali vd., 2023). ABD, FV teknolojilerin yalnız kullanımında değil, aynı zamanda ömrünü tamamlayan FV panellerin yönetiminde de öncü ülkeler arasında yer almaktadır. Geleneksel olarak ABD FV panel üreticilerinin teknolojik tercihleri ince film teknolojileri yönünde olmuş, bu sektör uzun zamandır çok gelişmiştir. İnce film panellerin daha fazla zehirli madde içermesi ve dolayısıyla daha yüksek sızıntı riski oluşturması nedeniyle, üreticiler ömrünü tamamlayan ürünlerini özel süreçlerle toplamaktadırlar.

Federal düzeyde FV atıkları için özel olarak geliştirilmiş herhangi bir düzenleme bulunmamaktadır. Genel atık ve tehlikeli maddelere ilişkin düzenlemeler ÖT FV paneller için de geçerlidir (Komoto vd., 2018). Tehlikeli ve tehlikesiz atıklara ilişkin düzenlemelerin tümü, fotovoltaik cihazlara açık bir atıfta bulunmayan Kaynak Koruma ve Geri Kazanım Yasası tarafından düzenlenmektedir. ÖT FV paneller tehlikeli atık listesinde yer almamakta, karakteristik tehlikeli atık olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamdaki atıklardan numuneler alınarak, düzenleyici mevzuatta belirlenen seviyelere göre zehirli olup olmadığının test edilerek uygun bertaraf yönteminin uygulanması gerekmektedir (Weckend vd., 2016).

FV enerjisinin çevre ve toplum üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, Güneş Enerjisi Sanayicileri Derneği (SEIA) üyesi firmalar, teknolojiler ve yenilikçi süreçler geliştirmek, en iyi uygulamaları yaygınlaştırmak ve ÖT FV panellerin doğru yönetimi için gerekli düzenlemeleri yapmak üzere aktif olarak iş birliği yapmaktadır (Komoto ve diğerleri, 2018). SEIA ayrıca 2016 yılında Ulusal FV Geri Dönüşüm

Programını da düzenleyerek geri dönüşüm ve yenileme sağlayıcıları ile güneş enerjisi endüstrisi aktörlerini bir araya getirmiştir (SEIA, 2024).

Eyalet düzeyinde FV atık yönetimine farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Elektronik atık yönetimi düzenlemeleri yalnızca 25 eyalette kabul edilmiştir (Urbina, 2022). Bu düzenlemeler bazı eyaletlerde katı, bazılarında ise daha zayıf kurallar empoze etmektedir. ÖT FV panel yönetimine yönelik uygun düzenlemenin eksikliği, panel geri dönüşüm oranının ABD'de yalnızca %10 seviyesinde kalmasına yol açmaktadır (Curtis vd., 2021). Hâlbuki daha iyi düzenlenmeleri olan AB ülkelerinde bu oran %95'e ulaşmaktadır. Kaliforniya, New Jersey, Kuzey Carolina, Washington ve Hawaii olmak üzere beş eyaletin, FV panel geri dönüşümüyle ilgili yasalar çıkardığı bildirilmektedir. Bu kadar az sayıdaki eyalet arasında bile farklılıklar gözlenebilmektedir. Washington, GÜS yönetmeliğini benimserken, Kaliforniya, evrensel atık olarak yeniden sınıflandırılan FV atıklarının tehlikeliliğine odaklanan ve ısı ve ısı içeren taşıma, taşıma, depolama ve geri dönüşüm süreçlerine daha katı kurallar getiren bir yasa çıkarmıştır. Kuzey Carolina'daki düzenlemeye göre, hangi kimyasal arıtma yönteminin belirlenebilmesi için ÖT FV modüllerinin Toksisite Özellikleri Süzme Prosedürü (TCLP) ile test edilmesini gerektirir. Öte yandan Rhode Island, Fotovoltaik Modül Yönetim ve Geri Alma Programı için teklif edilen bir yasa tasarısını elinde tutmaktadır. Yönetim ve geri alma programları kapsamında üreticiler, geri alma ve geri dönüşüm sürecini nasıl yöneteceklerini özetleyen bir yönetim planı oluşturmaktan ve sürdürmekten, panellerin değerli malzemeleri geri kazanmak ve çevresel etkiyi en aza indirmek için güvenli bir şekilde işlenmesinden sorumludur. 2014-2021 yılları arasında teklif edilen ancak yasalaşmayan devlet yasa tasarısı sayısının 14 olduğunu belirtmekte fayda bulunmaktadır. Bu durum eyaletlerin ÖT FV yönetimi sorununa bir düzen getirmek için çalıştıklarının açık bir göstergesidir.

Şirketler, federal ve eyalet düzeyindeki faaliyetlerin yanı sıra ÖT FV yönetimi için de harekete geçmektedir. Örneğin, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller içerebilen büyük bir CdTe ince film modülü üreticisi olan First Solar, çok verimli bir geri dönüşüm ve malzeme geri kazanım programına sahiptir (Ngagoum Ndalloka vd., 2024).

10.2 Çin Halk Cumhuriyeti

Dünya genelinde hem FV panel üretiminde hem de FV santrali kurulumlarında lider olan Çin, 2050 yılında önemli miktarda FV atığıyla karşılaşacaktır. Ülke, ÖT FV panel yönetimi için özel olarak tasarlanmış düzenlemelere sahip değildir. 2011 yılının başından beri yürürlükte olan Atık Elektrik ve Elektronik Ürünlerin Geri Kazanımı ve Bertarafının Yönetimi Yönetmeliği, bir katalogda belirtilen elektronik atıkların toplanması ve işlenmesi için düzenlemeler yapmaktadır. Ancak bu katalog FV panelleri içermemektedir (Çin Halk Cumhuriyeti Devlet Konseyi, 2011). FV atıkların bu liste dışında tutulması, otomatik olarak genel katı atık kategorisinde değerlendirilmesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Pratikte, herhangi bir yaptırım olmadığı için ya üreticinin kendisi ya da herhangi bir sertifikalı elektronik atık geri dönüşüm şirketi ÖT panellerle ilgilenebilmektedir.

Çin'de ÖT FV panel yönetimine dair teknik zorlukların çözülmesi ve uygun iş modellerinin geliştirilmesi için yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir (Sharma vd., 2019). Bu amaca ulaşmak için beş yıllık planlama döngüleri, FV geri dönüşümü ve bertarafı için yüksek teknoloji Ar-Ge programlarına atıfta bulunmaktadır. Geri dönüşüm oranları için belirli hedefler konulmamıştır. Yapılan bazı çalışmalar finansal modeller hakkında bilgi vermektedir (Miao vd., 2023; Liu vd., 2020; Zhang vd., 2022). Yu vd. (2022), Çin Fotovoltaik Sanayi Derneği'nin k-Si ve ince film paneller için FV modüllerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için iki ayrı teknik şartname hazırlama sürecinde olduğunu bildirmektedir. Temmuz 2023'te, Çin Halk Cumhuriyeti Devlet Konseyi Bilgi Ofisi'nin resmî web sitesi aynı bilgiyi yinelemiştir (China SCIO, 2023). Çin Fotovoltaik Sanayi Derneği tarafından yayımlanan Çin FV Sanayi Gelişme Yol Haritası, FV

panellerin ÖT yönetiminden bahsetmemektedir (Çin Fotovoltaik Sanayi Derneği, 2022). Song vd. (2023), Çin hükümetinin ÖT FV panel yönetiminin çevresel, teknolojik, geri dönüşüm ve bertaraf yönlerini araştırma sürecinde olduğunu bildirmekte ancak daha fazla ayrıntı veya referans vermemektedir. Benzer şekilde, Ali vd. (2023), FV panelleri içeren katı atık yönetimi ile ilgili dört standardı listelemektedir:

- İnce film fotovoltaik modül geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için genel teknik gereksinimler (GB/T 38,785–2020)
- Zararsız endüstriyel katı atık depolama ve bertarafına ilişkin kirlilik kontrol standardı (GB, 18599–2020)
- Atık elektrikli ve elektronik ekipmanın geri kazanımı için genel teknik spesifikasyonlar (GB/T 23,685–2009)
- Atık ürünlerin geri kazanımı terminolojisi (GB/T 20,861–2007).

Ayrıca taslak aşamasında olan ek spesifikasyonlar bulunmaktadır:

- 20240789-T-339 Fotovoltaik modül hurdaya ayırma değerlendirmesi için teknik gereksinimler (taslak aşamasında)
- 20241714-T-609 Fotovoltaik modül hurdaya ayırma için teknik gereksinimler (taslak aşamasında)
- DB64/T 1971—2023 2023-12-28 Kristal Silisyum Fotovoltaik Modül Geri Dönüşüm Spesifikasyonları
- 20241738-T-339 Ömrünü Tamamlamış Fotovoltaik Modüllerin Geri Dönüşümüne İlişkin Genel Spesifikasyonlar (görüş toplama aşamasında)

Urbina'ya (2022) göre, FV atık yönetimi veya genel olarak elektronik atık yönetimi için uygun yaptırımların eksikliği ve güçlü bir mevzuat uygulanmadıkça kayıt dışı geri dönüşüm faaliyetleriyle başa çıkmanın zor olduğu belirtilmektedir.

10.3 Japonya

Gelişmiş bir elektronik endüstrisine sahip olan Japonya, FV enerji üretiminde öncülerden biri olması nedeniyle, diğer ülkelere kıyasla FV atık sorunu ile erken yüzleşmiştir. Ancak, Japonya'nın ÖT FV panellerinin geri dönüşümü ve geri kazanımı için özel düzenlemeleri bulunmamaktadır (Marcuzzo vd., 2022). FV atıkları, FV panellerine özel atıf yapmayan genel atık yönetimi mevzuatı olan Atık Yönetimi ve Kamusal Temizlik Yasası kapsamına girmektedir (Komoto vd., 2018). Ülkede GÜS mekanizması uygulanmaktadır (Wang & Ye, 2024). İçişleri Bakanlığı'nın talebi üzerine, Çevre Bakanlığı ile Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı, Nisan 2016'da ekipman üreticileri, santral sahipleri, inşaat ve söküm şirketleri, atık toplama ve işleme operatörleri ve yerel yönetimlerin de dâhil olduğu sektördeki tüm aktörlere yönelik, söküm, taşıma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve bertaraf konularında genel yasal düzenlemeleri ve yönergeleri içeren bir kılavuz yayımlamıştır (Komoto vd., 2018). Kılavuz belgesinin yayımlanmasından kısa bir süre sonra, yeniden kullanılabilirliğin nasıl artırılabileceği, modül üreticilerinin ürünlerinin malzeme içeriklerini nasıl rapor edebileceği, çevresel değerlendirme konularının daha düzenli bir şekilde nasıl ele alınabileceği gibi konularda güncellenme ihtiyacı doğmuştur. Bu iyileştirme ihtiyaçları, ÖT FV yönetimi için belirlenen zorluklarla uyumludur.

Panel testi ve geri dönüşüm teknolojileri için araştırma ve geliştirme faaliyetleri de hem kamu otoriteleri hem de şirketler tarafından desteklenmektedir. Japon devleti tarafından fonlanan Akita Fotovoltaik Geri Dönüşüm Model Projesi, çöp depolama sahalarına giden fotovoltaik panel sayısını önemli ölçüde azaltmayı hedeflemektedir (Gentilini & Salt, 2020). Japon Fotovoltaik Enerji Derneği (JPEA), ÖT FV modüllerinin bertaraf edilmesine ilişkin gönüllü esasına dayanan yönergeler yayımlamıştır (Sharma vd., 2019).

Yenilenebilir Enerji Yasası'nda Nisan 2022'de yapılan bir revizyonla, 10 kilovattan az güce sahip sistemler hariç, güneş enerjisi üreticilerinin ÖT FV panellerinin yönetimi için fon ayırmalarını gerektiren bir rezerv sistemini devreye alınmıştır. Yatırılan miktar, kW başına 63 ABD dolarına eş değerdir. Güneş enerjisi santrali devre dışı bırakıldığında, üretici, ÖT FV panellerinin bertaraf edilmesi için birikmiş miktarı almaktadır (Anderson Mōri & Tomotsune, 2023; IEA PVPS, 2022).

10.4 Güney Kore

Elektronik atık ithalatında lider olmanın yanı sıra, Güney Kore aynı zamanda atık geri dönüşüm oranı açısından da önemli bir yere sahiptir (ME Güney Kore., 2023). Her iki özellik de Güney Kore'yi özel bir ilgi konusu yapmaktadır, çünkü genel olarak atıklar için iyi yapılandırılmış ve işleyen bir geri dönüşüm piyasasının varlığına işaret etmektedir.

Birkaç yıl boyunca FV atıklarını diğer ilgili atık kodları altında değerlendirdikten sonra, Çevre Bakanlığı FV modül atıklarını GÜS düzenlemesi kapsamına dâhil etmiştir (IEA PVPS, 2022). GÜS, üreticileri ürünlerinin tüm yaşam döngüsünden sorumlu tutan, özellikle geri alma, geri dönüşüm ve nihai bertaraf konusunda teşvik eden ve çevre dostu ürün tasarımını teşvik ederek atıkları azaltan bir politika yaklaşımıdır. Bu yeni düzenleme, 2022 yılı sonuna kadar toplama altyapısının kurulması ve FV panellerinin geri dönüşüm teknolojilerinin iyileştirilmesi için geçiş dönemleriyle birlikte gelmiştir. 2023 yılı itibarıyla GÜS uygulanmaya başlamıştır. Atık Kontrol Kanunu kapsamında, "güneş hücreleri ve elektronik cihazlarda kullanılan macunlar" için tanımlanan atık koduna güneş panel atıkları da eklenmiştir. Güney Kore hükümeti, özel şirketlerin ve araştırma merkezlerinin düşük maliyetli, düşük enerjili, çevre dostu ve yüksek miktarda geri kazanılmış malzeme elde eden geri dönüşüm yöntemlerini geliştirmeleri için çeşitli Ar-Ge projelerini desteklemektedir (Sharma vd., 2019).

Güneş panelleri GÜS kapsamına alınmış olmasına rağmen, Güney Kore'de ÖT FV panellerinin yönetimi için özel olarak hazırlanmış düzenlemeler veya yönergeler bulunmamaktadır (Preet & Smith, 2024). Güney Kore Ticaret, Sanayi ve Enerji Bakanlığı, ÖT FV panellerinin kayıt altına alınmasını ve raporlanmasını talep etmiştir (Mahmoudi vd., 2021). 2017 yılında bir FV geri dönüşüm merkezi inşa etme sürecinin başlatılmış olması, hükümetin destekleyici politikasının açık bir göstergesidir (Kim & Park, 2018).

10.5 Avrupa Birliği ve Üye Ülkeler

Avrupa Birliği, FV panellerin kullanım ömrü sonundaki (ÖT) yönetim sürecini, 2012/19/EU sayılı Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar (AEEE) Yönetmeliği ile düzenlemektedir (Avrupa Birliği, 2019). Yönetmelik Ek III'te yer alan "Büyük Ekipman" ve "Küçük Ekipman" kategorilerinde FV panellere açıkça atıfta bulunmaktadır. EEE kategorilerine giren ekipmanın örneklendirildiği Ek VI'da, Büyük Ekipman kategorisinde "Fotovoltaik Paneller" ve Küçük Ekipman kategorisinde "Entegre fotovoltaik panelli küçük ekipmanlar" bulunmaktadır. AEEE direktifi, GÜS ilkesine dayanmaktadır. Buna göre elektronik ekipman üreticilerinin veya ithalatçılarının, atık toplama, taşıma, işleme ve geri dönüşümünü finanse etmeleri gerekmektedir. GÜS, "kirleten öder ilkesine" doğrultusunda kirlilik veya atık üretenlerin, faaliyetlerinin çevresel etkilerini yönetme ve hafifletme ile ilgili maliyetleri üstlenmeleri gerektiği anlamına gelmektedir. Bu düzenlemeyle birlikte, tasarım ve üretimden bertaraf aşamasına kadar olan süreçte ömür sonu yönetimi dikkate alınmaktadır.

2012/19/EU Direktifi, piyasaya sürülen ürün miktarlarına göre hesaplanan toplama hedefleri belirlemektedir. Piyasaya sürülen FV panellerin miktarları, Avrupa Birliği İstatistik Ofisi (Eurostat) tarafından yayımlanan kurulu kapasite istatistik verilerinden elde edilir (Avrupa Komisyonu, 2015). Avrupa'da FV panellerin

kurulumunun hızlı genişlemesi ve nispeten uzun ömürleri, piyasaya sürülen FV miktarının hesaplanmasını karmaşık hâle getirmektedir; bu nedenle FV paneller, ait oldukları kategoriden ayrı olarak değerlendirilir. Avrupa Komisyonu, bu hesaplama için bir metodoloji önermektedir. Pazara sunulan elektrikli ve elektronik ekipmanın önceki üç yıldaki ortalama ağırlığına dayalı olarak, yıllık %65 toplama ve %85 geri kazanım ile %80 yeniden kullanım ve geri dönüşüm hedefleri belirlenmiştir (IEA PVPS, 2022). Bu oranlar, FV panellerin uzun ömrü nedeniyle gerçekçi bulunmamaktadır (Weckend vd., 2016).

2012/19/EU Direktifi, FV atıklarının nasıl toplanıp işleneceği konusunda standartlar ve teknik kılavuzlar geliştirmek konusunda Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi'ni (CENELEC) görevlendirmektedir (WEEE Forumu, 2018). EN50625 sayılı standartlar serisi altında bir dizi standart yayımlanmıştır, EN50625-1 genel işleme gereksinimlerini ele alırken, EN50625-2-4 FV paneller için toplama, lojistik ve işleme gereksinimlerini kapsamaktadır (Komoto vd., 2018).

AB'de ÖT FV panel yönetimi konusunda önemli girişimlerden biri PV Cycle'dır. PV Cycle 2007 yılında AB tarafından kurulmuştur. PV Cycle kendini "Kâr amacı gütmeyen üye tabanlı bir kuruluş olarak, PV CYCLE, dünya genelinde şirketler ve atık sahipleri için hem kolektif hem de özel atık yönetimi ve yasal uyum hizmetleri sunmaktadır" şeklinde tanımlamaktadır. Birliğin Çinli üreticiler de dâhil olmak üzere dünya genelinde üyeleri bulunmaktadır. Atık yönetim çözümlerinin yanı sıra PV Cycle, yasal uyum çözümleri de sunmaktadır.

FV atıklar yönetimi konusu Avrupa Birliği'nin geniş kapsamlı araştırma ve yenilikçilik programlarının da gündeminde olan bir konudur. Bugüne kadar yürütülen 7. Çerçeve Programı, Ufuk 2020 ve Ufuk Avrupa programlarında fotovoltaik endüstrisinin sürdürülebilir ekonomi içerisindeki yerinin güçlendirilmesine yönelik çok sayıda proje desteklenmiştir. Bunlara örnek olarak TRUST-PV, PHOTORAMA, RESiLEX, ICARUS, CIRCUSOL, CABRISS, PhotoLife, ReSiELP, APOLLO, RETRIEVE, EVERPV, QUASAR, ReProSolar ve CE-RISE projeleri verilebilir (Horizon Result Booster, 2024).

Üye devletlerin, 2012/19/EU direktifine uyumlu ulusal düzenlemelerini yayımlamaları beklenmektedir. Bu nedenle, üye devletler FV paneller için geri alma ve geri dönüşüm sistemleri hakkında ulusal yasalarını geliştirerek uygulamaya koymaktadır (IEA PVPS, 2022).

Almanya'daki bu konuda hâlen üçüncü sürümü uygulamada olan "Elektrogesetz" veya "ElektroG" adlı düzenleme geçerlidir. Bu düzenleme işten işe ve işten tüketiciye işlem farklılığı getirmektedir. İşletmeden tüketiciye (B2C) sunulan FV paneller, belediye atık toplama noktaları aracılığıyla toplanır ve ardından üreticilere veya perakendecilere teslim edilir. İşletmeden işletmeye (B2B) FV modüller, doğrudan kullanıcı şirketten ek toplama ücreti karşılığında toplanır. Almanya'nın belirlemiş olduğu minimum geri kazanım ve geri dönüşüm oranları sırasıyla %85 ve %80'dir.

Fransa'da geri kazanım ve geri dönüşüm oranları da Almanya'nın belirlediği değerlerle aynı miktardadır. 2014 yılında çıkarılan Décret n° 2014-928 sayılı Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman (AEEE) Kanunu FV panel atıklarını da içermektedir. Fransa'daki düzenlemenin ana avantajı, mevzuat ekindeki listelerde ÖT FV paneller için münhasıran tanımlanmış bir atık kategorisinin bulunmasıdır. Bu sayede raporlama ve istatistik oluşturma kolaylaşmakta, toplanan verilerin güvenilirliği artmakta ve sadece güneş paneli atıklarına ilişkin net veriler ortaya çıkmaktadır. Fransa'da FV atıkların yönetilmesi konusunda tekel yetkilerine sahip olan kuruluş SOREN'dir. SOREN'in ortaklık yapısında EDF, Total Energies, Engie gibi kamu ortaklı ve özel şirketlerin yanı sıra PV Cycle da bulunmaktadır. SOREN bu yetkisi çerçevesinde ve belirli teknik şartnameler doğrultusunda alt yüklenici niteliğinde geri dönüşüm tesisleri belirlemektedir. Bu kuruluşlardan biri olan ROSI Fransa'nın Grenoble şehri yakınlarında geri dönüşüm hizmetleri sunmaktadır.

İtalya, FV panellerin 10 kilovattan daha az nominal güce sahip bir güneş enerjisi santralinde kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak evsel ve profesyonel olarak iki kategoriye ayrıldığı 49/2014 sayılı Kanun Hükmünde Kararname'yi yayımlamıştır. Evsel FV atıkları ya ulusal bir toplama merkezine ya da doğrudan kurulum yapan firmaya veya distribütöre gönderilmektedir. Profesyonel FV atıkları ise FV atık işleme alanında özelleşmiş bir tesise, genel amaçlı bir işleme tesisine veya ulusal bir toplama noktasına verilebilmektedir. İtalya'da uygulanmakta olan fiyat garantili enerji satışı şeklindeki yenilenebilir enerji teşvik mekanizmalarından yararlanmış olan santraller için teşvik döneminin son yıllarında, fiyat garantili enerji satışından elde edilen gelirlerin bir kısmı İtalya Enerji Hizmetleri Yöneticisi adlı kuruluşa aktarılmakta ve santral devre dışı bırakıldığında biriken meblağ tesis sahibine iade edilmektedir. Yapılan kesintinin miktarı Evsel FV paneller için panel başına 12 EUR, profesyonel paneller için ise 10 EUR tutarındadır.

10.6 Türkiye'de FV Atık Yönetimi

10.6.1 Mevcut Durum

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'nın hazırladığı ve Türkiye Büyük Millet Meclisi Genel Kurulunun 31.10.2023 tarihinde onayladığı On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028) belgesinde belirlenen hedef ve politikalar arasında yer alan 517 sayılı politika ve alt maddeleri, FV atık geri kazanımı konusunda en üst düzeyde ulusal yaklaşımı ortaya koymaktadır (*ON İKİNCİ KALKINMA PLANI (2024-2028)*, 2023):

> *"517. Enerji teknolojilerinde kullanılan ham maddelerin arz güvenliğinin artırılması ve söz konusu ham maddelerin çevreye olumsuz etkilerinin asgari düzeye indirilebilmesi amacıyla çalışmalar yürütülecektir."*
>
> *"517.1. Kullanım ömrü tamamlanan güneş paneli ve batarya gibi ekipmanların çevreye olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi ve döngüsel ekonomiye geçişin sağlanması amacıyla geri dönüşüm tesisleri yaygınlaştırılacaktır."*
>
> *"517.2. Enerji teknolojilerinde kullanılan ham maddelerin geri dönüşümüne ilişkin kapsamlı düzenlemeler yapılacak, imalatçı firmalar ve tüketiciler nezdinde farkındalık ve ödül mekanizmaları oluşturulacaktır."*

Türkiye, FV atıklarının yönetimi için özel düzenlemeleri olmayan ve kullanım ömrü sonundaki (ÖT) FV panellerin yönetimi için atık yönetimi mevzuatını kullanan ülkeler arasındadır. Atık yönetimi süreçleri, Atık Yönetimi Yönetmeliği, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik ile Atık Ön İşlem ve Geri Kazanım Tesislerinin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik tarafından düzenlenmektedir. Bu düzenlemeler, Türkiye'de atık yönetimi ve işleme kriterlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamakta, atıkların çevresel etkilerini minimize etmeyi ve kaynakları korumayı amaçlamaktadır.

2 Nisan 2015 tarihinde 29314 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) atıkların oluşumundan bertaraf edilmesine kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetiminin sağlanmasını, atık oluşumunun azaltılmasını, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı gibi yollarla doğal kaynak kullanımının azaltılmasını amaçlamaktadır. AYY kapsamında atık bertaraf ve geri kazanımı faaliyeti sürdüren gerçek ve tüzel kişilerin Bakanlıktan lisans alma yükümlülüğü bulunmaktadır. Yönetmelik, Ek-4 atık listesinde verilen atıkları kapsar ve GÜS çerçevesinde yönetimi sağlanan elektrikli ve elektronik eşya, ambalaj, araç, pil ve akümülatör ürünlerini de içerir. Ek-4'te tanımlanan atıklar altı haneli atık kodları ile tanımlanmakta ve bu kodlar atıkların yönetiminde kullanılmaktadır. Bu listede tehlikeli atıklar * işareti ile belirtilir ve bunlar için belirli kodlama ve işlem prosedürleri uygulanmaktadır. AYY kapsamında ÖT FV

panelleri “16 02 14: 16 02 09 ila 16 02 13 haricinde atılan ekipmanlar” kategorisine girmektedir. Bu kod tanımlarından anlaşılacağı üzere, AYY FV panellerine açık bir atıfta bulunmamaktadır.

Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik (AEEEY), atık elektrikli ve elektronik eşyaların döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği ilkeleri doğrultusunda yönetilmesini amaçlamaktadır. AEEE’lerin ayrı toplanmasına ve bertaraf edilecek AEEE miktarının azaltılması için yeniden kullanıma hazırlama, geri dönüşüm, geri kazanım yöntem ve hedeflerinin belirlenmesi AEEEY kapsamında ele alınmaktadır. Yönetmelik, elektrikli ve elektronik eşya kategorilerini Ek-2/A ile listelemekte ve Ek-2/B ile örneklendirmektedir. Fotovoltaik (FV) paneller, Ek-2/B listesinin “4. Büyük ekipmanlar (en az bir dış boyutu 50 cm’den büyük)” maddesi altına eklenerek, 1 Ocak 2024 tarihinden itibaren AEEEY kapsamına alınmış bulunmaktadır. AEEEY kapsamında 2025 yılı için %40, 2025 yılından itibaren her yıl %5 oranında artırılarak 2030 yılı da dâhil olmak üzere %65, 2030 yılı sonrasında, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yeni toplama hedefleri belirlenmediği müddetçe, %65 oranında toplama hedefi belirlenmiştir. Yeniden kullanıma hazırlama, geri dönüşüm ve geri kazanım hedefleri ise, 2025 yılından itibaren %85 geri kazanım ve %80 yeniden kullanıma hazırlama veya geri dönüşüm olarak benimsenmiştir. AEEEY kapsamında AEEE işleme yapan tesislerin Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığından çevre izni ve lisans belgesi almaları gerekmektedir. AEEE işleme tesislerinin lisanslarını EK-2/A’da yer alan EEE kategorileri özelinde alması zorunlu olup 2024 yılı haziran ayı itibarı ile ÖT FV panel atıklarına yönelik bir lisans bulunmamakta olduğu bilgisi edinilmiştir. Bu tesislerin karşılaması gereken şartlar AEEEY’nin 13. Maddesinde tanımlanmıştır. Buna göre tesislerin “TS EN 13615 İşyerleri – Atık elektrikli ve elektronik eşya işleme tesisleri için kurallar” başlıklı standardın şartlarını sağlaması gerekmektedir. Söz konusu tesiste ayrıca yeniden kullanıma hazırlama işleme yapılması durumunda «Atık elektrikli ve elektronik donanımların yeniden kullanıma hazırlanması ile ilgili gereklilikler» başlıklı TS EN 50614 Standardında verilen şartların sağlanması zorunludur.

Atık Ön İşlem ve Geri Kazanım Tesislerinin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik, atıkların işlenmesi amacıyla faaliyet gösteren tesislerin teknik kriterlerini ve asgari şartlarını belirlemektedir. Yönetmelik, tehlikeli ve tehlikesiz atıkları işleyen geri kazanım tesisleri ile atıkları işleyen ve faaliyet konusu ile idari ve teknik kriterleri başka bir mevzuatta düzenlenmeyen tesisleri kapsamaktadır. Tesislerin sağlaması gereken genel şartlar arasında, tesislerin etrafının güvenliğini sağlayacak şekilde kalıcı olarak çevrilmesi, işleme faaliyetinin gerçekleştiği alanların ve atık ile temas durumunda olan alanların tabanının sızdırmaz olması, sızıntıların toplanabilmesi için tabanda uygun eğimlerin verilmesi, kapasitesine uygun kantar, kamera ve veri kayıt sisteminin bulunması ve metal atık kabul eden tesislerin radyasyon ölçüm cihazı bulundurması gerekmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi ile Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yenilenebilir Enerji ve Yeni Teknolojiler Dairesi tarafından Türkiye’nin FV atık öngörüsünün belirlenmesine yönelik çalışmaların başlatıldığı ve ortaya çıkacak potansiyel FV atıkların geri dönüşümü ile sağlanacak ekonomik ve çevresel faydaya yönelik bir rapor hazırlanması çalışmaları devam ettiği bilgisi alınmıştır.

Türkiye’deki gerek güneş enerjisi gerekse geri dönüşüm sektörlerini temsil eden derneklerin, ÖT FV panellerinin yönetimini konusunda bugüne kadar önemli bir ilerleme kaydettiğine dair bilgiye rastlanmamıştır.

10.6.2 Akademi ve Ar-Ge Çalışmaları

Fotovoltaik teknolojiler Türkiye üniversitelerindeki ve araştırma kurumlarındaki akademisyenlerin ve lisansüstü öğrencilerinin üzerinde çalışarak çok sayıda yayın ve eser ürettikleri bir alandır. Bu çalışmalar kapsamında ÖT FV panellerin geri dönüşümüne odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır.

Güneş enerjisi teknolojileri konusunda bilimsel ve teknolojik araştırmalar yapan kurumların başında ODTÜ-GÜNAM Güneş Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi gelmektedir. ODTÜ-GÜNAM güneş enerjisinin her dalı ile ilgili konuda hem temel bilimler hem mühendislik hem de sosyal bilimler açısından araştırmalar yapan bir merkezdir. 2009 yılında ODTÜ bünyesinde kurulan GÜNAM, 2021 yılından itibaren 6550 Sayılı Araştırma Altyapılarının Desteklenmesi Hakkında Kanun çerçevesinde yeterlilik alarak Türkiye'nin ilk ve tek güneş enerjisi temalı araştırma altyapısı olmuştur. ODTÜ-GÜNAM'da yapılan çalışmalar başta ODTÜ olmak üzere ülkemizin pek çok üniversitesi ile ortak yürütülmektedir. ÖT FV panellerin geri dönüşümü başlığı ODTÜ-GÜNAM tarafından da çalışılan bir konudur. ODTÜ-GÜNAM araştırmacılarından Asmin Aşkın'ın 2023 yılında tamamlamış olduğu yüksek lisans tezi Türkiye'de güneş panellerin geri dönüşümüne sürdürülebilirlik perspektifinden bakmakta ve FV panel geri dönüşümünün Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve döngüsel ekonomi ilkeleri ile ilişkilerini irdelemektedir (Aşkın, 2022). Aynı araştırmacının ODTÜ'den öğretim üyesi Prof. Dr. Bülent Gültekin Akınoğlu ve TÜBİTAK'tan Doç. Dr. Şiir Kılkış ile birlikte yayımladıkları bir makalede de FV panel geri dönüşümünü kolaylaştıran faktörler ve önündeki engeller ile bunlardan hareketle politika önerileri tartışılmaktadır (Aşkın vd., 2023). Ayrıca ODTÜ-GÜNAM Gelişen Fotovoltaik Teknolojiler Birimi Koordinatörü ve ODTÜ Kimya Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Emrullah Görkem Günbaş fotovoltaik panellerin geri dönüşümü konusunda çalışmalar yapmaktadır. Bu kapsamda ODTÜ'de Muhammed Doğuşcan Dönmez'in "Perovskit güneş hücrelerinin tamamen geri dönüşümü için yeni bir metot" başlıklı yüksek lisans tezini yönetmiş, ancak bu çalışma henüz yayımlanmamıştır. Avrupa Birliği Ufuk Avrupa programı kapsamında desteklenen ve FV panellerin geri dönüşümü konusu ile ilgili Fotovoltaik Modüllerin Geri Kazanımı ve Geri Dönüşümüne Yönelik Proaktif Bir Yaklaşım (kısa adı APOLLO) başlıklı projenin konsorsiyumunda Türkiye'den ODTÜ-GÜNAM da yer almaktadır.

Türkiye'de güneş enerjisi alanında köklü geçmişe sahip önemli araştırma merkezlerinden biri de Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'dür. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından, güneş, biyokütle, rüzgâr ve jeotermal gibi enerji kaynakları ile ilgili uygulamaya yönelik lisansüstü öğrenim veren ve araştırma çalışmalarında bulunan Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü (EÜ–GEE), 1978 yılında kurulmuştur. Bu alanda kurulmuş olan ülkemizdeki ilk ve tek enstitüdür. Enstitüde ısıl güneş sistemleri, fotovoltaik, yeni nesil fotovoltaik, güneş mimarisi, biyokütle enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, enerji verimliliği ve yönetimi, güneş ışınımlı fotokimya ve optoelektronik konularına yönelik araştırmalar ve lisansüstü tezler yürütülmektedir. Merkezin geniş çalışma alanları arasında FV panellerin geri dönüşümü konusu da yer almaktadır. Merkez araştırmacılarından Aslı Birtürk ve Prof. Dr. Melih Soner Çeliktaş'ın yaptıkları bir çalışmada ÖT FV panel geri dönüşümü konusu sürdürülebilirlik açısından incelenmiş, FV panelleri oluşturan malzemelerin üreticiler tarafından açık olarak yayımlanmasının ve çevresel düzenlemelerin bu verilere göre gözden geçirilmesi gerekliliği ifade edilmiştir (Birtürk & Çeliktaş, 2024). Aynı yazarların yaptıkları bir diğer çalışma ise FV atıkların miktarı ile ilgili olarak geleceğe dönük bir projeksiyon yapılarak, çevresel atık potansiyelinin 2050 yılında 1 milyon 706 bin 159 tona ulaşacağı sonucuna ulaşılmıştır (Birtürk & Çeliktaş, 2023). Yine aynı yazarlar ile İzmir Demokrasi Üniversitesinden Doç. Dr. Tuğba Keskin'in birlikte yaptıkları bir çalışmada çeşitli fotovoltaik teknolojileri özet olarak anlatılmakta, güneş enerjisinin çevresel etkileri tartışılmakta ve bu tür çalışmalarda YDA'nın önemi vurgulanmaktadır (Birtürk vd., 2023). Prof. Dr. Melih Soner Çeliktaş'ın 2023 yılında TÜBİTAK desteğiyle "Kristal Silisyum Fotovoltaik Panellerin (PV) Geri Dönüşümü ve Yaşam Döngüsü Analizi" başlıklı projesinde FV panellerin geri dönüşümü ve gelecekte

oluşacak atık tehlikesinin önlenmesine yönelik çalışmalar yapılmasının amaçlandığı bildirilmektedir (Ege Ajans, 2023).

TR71 Bölgesi yüksek öğretim kurumlarından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yapılan bir çalışmada, Elif Kaplanoğlu ile hâlen Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi'nde görev yapmakta olan Doç. Dr. Çağdaş Gönen FV panel geri dönüşümünü çevresel ve ekonomik perspektiften değerlendirmişlerdir (Gönen & Kaplanoğlu, 2019). Çalışma sonucunda FV panellerden metal geri kazanım oranlarının %94 seviyesine ulaştığı, metallerin geri dönüşümünden elde edilebilecek ekonomik değerin 35 milyon ABD Doları seviyesine ulaşabileceği ve camı yeniden üretmek yerine geri kazanarak 43 milyon ton CO_2 emisyonunun önlenebileceği ortaya çıkmıştır.

Necmettin Erbakan Üniversitesi ve Gaziantep Üniversitesi araştırmacılarından Sultan Büşra Artaş, Emrullah Kocaman, Hasan Hüseyin Bilgiç, Hakan Tutumlu, Hüseyin Yağlı ve Recep Yumrutaş 2023 yılında yayımladıkları bir çalışmada Konya Karapınar'da 1 GW kurulu gücündeki Kalyon GES santralı vaka analizi olarak almış ve santral ömrünü tamamladığında panellerden elde edilebilecek malzeme miktarlarına ilişkin öngörüler ortaya koymuşlardır (Artaş vd., 2023).

Yüksek Öğretim Kurulu Türkiye'de yapılan lisansüstü tez çalışmalarını Ulusal Tez Merkezi internet sitesinde yayımlamaktadır. Bu sitede yapılan araştırmalarda "fotovoltaik", "photovoltaic", "FV", "PV", "güneş", "solar", "geri dönüşüm" ve "recycling" anahtar kelimelerinin kombinasyonları ile araştırmalar yapılarak, FV panellerin geri dönüşümü ile ilgili tez çalışmaları taranmıştır. 2023 yılında Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'ndan Doç. Dr. Abdullah Demir'in danışmanlığını ve Uşak Üniversitesi'nden Doç. Dr. Canan Kandilli'nin eş danışmanlığını yaptığı "Silisyum esaslı güneş panellerinin geri dönüşümü ve tekrar kullanımının ekonomik ve çevresel etkilerinin incelenmesi" yüksek lisans tez çalışmasında İbrahim Tokgöz tarafından çevresel etkiler yaşam döngüsü değerlendirmesi ile analiz edilmiş, akabinde tekno-ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak ekonomik etkiler hesaplanmıştır. FV atıkların geri dönüştürülmesi sonucunda elde edilen malzemelerin inşaat sektöründe değerlendirilmesi imkânlarının değerlendirildiği bir yüksek lisans tezi Murat Hüseyin Ünsal tarafından Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda 2019 yılında tamamlanmıştır. Danışmanlığını Doç. Dr. Zeki Ünal Yümün'ün yaptığı çalışma sonucunda beton harcı malzemesine FV panellerden elde edilen kırık camın %15 oranında karıştırılması sonucunda dayanımının %3,3 artış gösterdiği, %20 oranında karıştırıldığında ise su emme kapasitesinin en düşük seviyede olduğu bildirilmiştir.

10.6.3 Türkiye İçin Politika Önerileri

Uluslararası Enerji Ajansının (UEA) tanımına göre enerji güvenliği, enerji kaynaklarının katlanılabilir maliyet ile kesintisiz olarak erişilebilir olması durumudur. Kısa vade enerji güvenliği, enerji sisteminin arz-talep dengesindeki değişikliklere ani yanıt verebilme kabiliyeti ile ilişkilendirilirken, uzun dönem enerji güvenliğinin ekonomik gelişmeler ve çevresel ihtiyaçlara uyumlu biçimde enerji arzını sağlayacak enerji yatırımlarının doğru zamanlama ile yapılması sayesinde mümkün olduğu ifade edilmiştir. Bu bağlamda mevcut tedarik zincirlerinin, uzmanlıkların ve destekleyici endüstrilerin de tüm bu süreçlerde yapılan değişim ve dönüşümler değerlendirilerek beraberinde geliştirilmesi ve devletlerin piyasadaki sorunları dikkate alan ve strateji belirleyen bir konumda geçişe liderlik etmesi önerilmektedir.

Nitekim net sıfır hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kapasitelerini artırmayı hedefleyen AB ve ABD strateji ve politika belgelerinde, FV değer zincirinin yerlileştirilmesine, ihtiyaç duyulan nitelikli istihdamın yetiştirilmesine, farklı uygulamaların geliştirilmesi ve kolaylaştırılmasına ve belli sürdürülebilirlik standartlarının oluşturulmasına ayrı ayrı önem atfedilmektedir. FV imalat değer zincirinin tüm

basamaklarında %75'i ve kimi aşamalarında da %95'i aşan seviyede Çin hâkimiyeti de enerji geçiş sürecinde FV güneşe dayalı teknolojik yatırımları çok yönlü ele almayı gerektirmektedir.

Son 10 yılda seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti en fazla düşen enerji teknolojisi olan FV güneş enerjisinin ilerleyen süreçte gelişmekte olan teknolojilere dayalı olarak bu eğilimini sürdürmesi ve net sıfır hedefleri doğrultusunda elektrik veya ısı amaçlı kullanımına müsaade eden farklı uygulamaların artması beklenmektedir. Ulusal Enerji Planı'nda belirlenen hedeflerin gerçekleşmesi ile 2035 yılına kadar kümülatif kurulu FV gücünü 5 katından fazla artırarak elektrik üretiminin %16,5'ini güneşten sağlayacak olan ülkemizin, yeterli imalat değer ve tedarik zinciri kapasitesi ile enerji ekipmanına bağlı oluşacak dış ticaret açığını ve arz riskini en aza indirmesi; değer zincirinin farklı aşamalarında uluslararası standartlara uyumlu imalat yetkinliği ve nitelikli iş gücü istihdamı ile ilerleyen teknolojik gelişmeleri takip edebilen ve dünya ile rekabet edebilen sürdürülebilir bir güneş enerjisi sektörü yaratması için belirli hedef ve politikalara ihtiyacı vardır.

Bu doğrultuda, öncelikle değer ve tedarik zinciri aşamalarına yapılacak yatırımları kolaylaştıran düzenlemeler ve teşvik eden proje destekleri ile yüksek ilk yatırım maliyeti olan ham madde imalatına sağlanan doğrudan destekler önem kazanacaktır. Diğer yandan, teorik limitine yaklaşmakta olan ve mevcut yaygın tasarımlarla belli verim değerlerinin üstüne pratik olarak da çıkılması giderek zorlaşan kristal silisyum teknolojilisine alternatif yeni gelişen FV teknolojilerinde belli bilgi seviyesine ulaşmak ve sonrasında bunların hızla ticarileşmesi için alternatif malzemelere, tasarımlara ve tekniklere dayanan Ar-Ge, pilot imalat ve uygulama desteklerinin sağlanması faydalı olacaktır. Yerlileştirme süreci dışında ihracat potansiyelini de değerlendirebilmek, teknolojik yetkinlik ve endüstriyel yeterliliğe ek olarak yeni geliştirilen ürünlerin, üretim süreçlerin ve iş gücünün AB ve ABD'nin güneş enerjisi endüstrisine yönelik standartlarına uyumlu olmasını sağlayacak düzenlemeler, teşvik edici destekler ve eylemlerin hayata geçirilmesi ile mümkün olacaktır. Son olarak, santrallerin donanım, yazılım ve iş gücü niteliği bağlamında geliştirilmesine ve iyileştirilmesine yönelik destek ve programlar oluşturulması ile çift kullanım amaçlı entegre uygulamalarının sağlayacağı avantajlardan faydalanmak için gerekli Ar-Ge ve analiz çalışmalarının ve kolaylaştırıcı düzenlemelerin yapılması, hedeflenen kurulumların daha hızlı, verimli ve etkin şekilde gerçekleştirilmesini ve değerlendirilmesini sağlayacaktır.

11 ÖT FV Panel Geri Dönüşüm Tesisi Fizibilitesi

ÖT FV panel geri dönüşüm tesisinin fizibilitesi, sürdürülebilir operasyonları sağlamak için ekonomik uygulanabilirlik, çevresel etki ve teknolojik gereksinimler gibi çeşitli faktörlerin değerlendirilmesini içerir. Bu değerlendirme, tesisin enerji verimliliği ve atık yönetimi süreçlerinin optimize edilmesi gibi alanlarda potansiyel iyileştirmeleri belirlemeye yardımcı olacaktır. ÖT FV panellerin geri dönüşümüne yönelik bir tesis kurulurken bu faktörlerin hepsinin bir arada dikkate alınması zorunlu olduğu için her biri hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir.

11.1 Geri Dönüşüm Tesisi Öncül Kararlar

Öncül karar, bir iş veya proje için alınması gereken temel ve kritik kararları ifade eder. Bu kararlar, genellikle sonraki adımların ve stratejilerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Öncül kararlar, işin yönünü, hedeflerini ve temel stratejilerini şekillendirir. ÖT FV panel geri dönüşümü ile ilgili bir işletmenin iş modeli ayrıntılı olarak tanımlanmadan önce işletmenin kurgusu ve faaliyet alanları ile ilgili çok temel bazı kararların alınması ve varsayımların yapılması gerekmektedir.

Geri Dönüştürülecek FV Teknolojisi Seçimi

İş modelinin ayrıntılarını belirlemeden önce, geri dönüşüm işinin odaklanacağı fotovoltaik panel türleri üzerine kritik bir karar verilmesi gerekmektedir. En yaygın ve teknolojik olarak olgun olan k-Si paneller için mevcut olan geri dönüşüm süreçleri nispeten daha gelişmiş durumdadır. Buna karşılık, CdTe, CIGS ve amorf silisyum gibi teknolojileri içeren ince film paneller, çeşitli malzeme bileşimleri nedeniyle farklı bir zorluk barındırmakta ve genellikle daha karmaşık, özel geri dönüşüm yöntemleri gerektirmektedir. Gelişmekte olan bir teknoloji olan perovskit güneş panellerinde ise, geri dönüşüm süreçleri bir yana, daha seri üretim teknolojileri bile geliştirme aşamasında olup pazara çıkışlarının zaman alacağı anlaşılmaktadır. FV teknolojisi seçimi kararına tesisin verimli çalışması için kritik bir faktör olan FV atık akış miktarı açısından da bakılmalıdır. Hem dünyada hem de Türkiye'de çok büyük oranda (%92) k-Si panellerin kullanılması, diğer FV panel türlerindeki atık akışının çok daha az olacağı sonucunu doğurmaktadır. Türkiye'de GES'lerin ilk yaygınlaşmaya başladığı 2010'lu yıllarda k-Si teknolojileri pazarı ele geçirmiş olduğu için ince film paneller ülkemizde çok az kullanıma girmiştir. Bütün bu nedenlerle, işletmenin ilk etapta sadece k-Si türü FV panellerin geri dönüşümüne odaklanması isabetli bir yaklaşım olacaktır. İnce film ve perovskit paneller alanında çok belirgin teknolojik buluşlar ortaya çıkar, fizibilite olarak cazibeleri artar ve kullanım alanları genişlerse, pazar paylarında artış olabilir. Bu gibi bir durumda, işletme zaten k-Si için kuruluşunu tamamlamış ve belirli bir olgunluğa ulaşmış durumda olacağı için bu teknolojilere yönelik yatırımları da gündeme alınabilir.

Geri Dönüşüm Teknolojisi ve Malzeme Geri Kazanımı

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, FV panel geri dönüşüm tesisi için alınması gereken kritik kararların başında hangi yöntemle ve hangi çıktılar hedeflenerek geri dönüşüm yapılacağı gelmektedir. Örneğin, silisyum dilimlerin hasarsız olarak elde edilmesi teknik olarak mümkündür. Bu sayede hem kıymetli malzemeler yeniden kullanılarak döngüsel ekonomiye kazandırılmakta, hem de ham maddeden silisyum dilim üretilmesini azalttığı için çevresel ayak izine olumlu katkı sağlanmaktadır. Ama ömrünü tamamlamış bir panelden elde edilen hücrelerden hasarsız silisyum elde edilmesi için büyük tesisler, uzun süreli prosesler ve yüksek enerji tüketimi ihtiyaç duyulmaktadır. Üstelik bu dilimlerin eskimiş teknolojileri üretilmiş olmaları geri dönüşümün yapıldığı zamanda artık tekrar kullanılmalarını zorlaştırdığı için ürünlerin pazarda yer bulması da zor olacaktır. Benzer bir durum panel camları için de geçerlidir. Ayrıca bu tür yüksek geri kazanım hedefleyen teknikler çoğunlukla henüz deneysel çalışmalar kapsamında uygulanmakta olup kullanılan ekipman da ilgili araştırma ekipleri tarafından tasarlanarak üretilmekte, bu işi gören makineler ve ekipman

henüz ticarileşmediği için piyasadan doğrudan temini kolay görünmemektedir. Bütün bu faktörler değerlendirilerek, bu iş modelinde kurulacak tesisin ilk aşamada kimyasal ve termal tekniklerle parçaları hasarsız geri kazanmayı hedeflemeden, sadece mekanik ayrıştırma, kırma, parçalama, ufalama ve eleme adımlarından oluşan bir iş modeli benimsemesi daha uygun görülmektedir.

Eğer iş modeli kimyasal ve termal teknikleri de içerecek şekilde belirlenecek olursa, bu amaca uygun ekipman tedarikçilerinden ilk yatırım maliyetleri ve işletme koşulları ayrıntılı olarak alınarak iş modelinin ilgili bölümlerine eklenmelidir. Özellikle kimyasal katmanlara ayırma yönteminde işletmenin dikkate değer bir kimyasal çözücü ihtiyacı olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca işlem süreleri uzayacağı için seçilen teknolojiye göre tesisin verim değerlerinin de güncellenmesi önem taşıyacaktır.

Geri dönüşüm tekniğinin mekanik ufalama olarak belirlenmesinin doğal sonucu olarak, elde edilecek malzemelerin tamamı toz şeklinde olacaktır. Bu tür bir geri dönüşüm yaklaşımı, ekonomik değeri yüksek olmayan ama hacimli geri kazanım yapılması sonucu doğurmaktadır. Bir başka deyişle, daha kolay ayrıştırılabilen cam, alüminyum ve bakır gibi bileşenlere odaklanmak anlamına gelmektedir. Bu malzemeler miktar olarak fazla olsa da nispeten düşük ekonomik değer üretmektedirler.

Mekanik ayrıştırmanın çıktısı olarak elde edilecek toz hâlindeki malzeme cam tozu, metal tozu, silisyum tozu ve plastik tozu şeklinde olacaktır. Burada tercih edilen ayrıştırma yaklaşımının çok sade ve basit olduğu, çıktılarının saflık derecesinin düşük olduğuna dikkat edilmelidir.

Uygulanan teknik gereği, panel bileşenleri arasında en kıymetli malzeme olan gümüş büyük oranda silisyum tozu içerisinde yer alacaktır. Dolayısıyla işletmenin bu silisyum tozunu kimyasal saflaştırma kabiliyetine sahip bir tesise satması gerekecektir. Benzer durum, metal tozu için de geçerlidir. Panel içerisindeki kalay, bakır gibi her türlü metal birbirine karışık durumda olacak, bu tozun da uygun tesiste ayrıştırılması gerekecektir. Düşük saflıktaki malzemelerin gerekli ekipman temin edilerek ayrıştırma işlemlerinin işletme bünyesinde yapılması mümkün olsa da her bir panel içerisinde cam ve alüminyum malzeme oranlarının ne kadar düşük olduğu dikkate alındığında (bakınız Tablo 8) ilk etapta bu yatırımın yapılması ekonomik olarak uygun olmayacağı değerlendirilmektedir.

Mekanik kırma, ufalama ve eleme işlemleri sonucunda elde edilen cam tozu, içinde silisyum dilim, EVA ve arka film parçaları da içerdiği için tekrar FV panel camı olarak ya da başka yüksek kaliteli cam üretimi için kullanılabilecek derecedeki saflığını yitirmektedir. Düşük saflıktaki bu malzeme ancak köpük cam veya cam yünü gibi izolasyon malzemelerinin üretilmesi için uygundur. Kırık cam ayrıca aşındırma malzemesi, yol yapımında kullanılan alt malzeme veya yüksek performanslı beton katkısı olarak da kullanılabilmektedir. Aynı malzeme diğer atık kanallarından da gelmektedir. Dolayısıyla, bu malzeme pazar değeri olarak büyük bir anlam ifade etmeyeceğine dikkat edilmelidir. Buna karşılık, panel camının kırılmadan geri kazanılması için uygulanacak sıcak bıçak, piroliz ve kimyasal katmanlara ayırma yöntemleri henüz ya deneysel ya da gizli ticari seviyede olup bunların piyasa değeri ve yeniden kullanılabilirliği konusunda da elde yeterince veri bulunmamaktadır. Düz camın piyasa değeri düşünüldüğünde elde edilecek gelir çok belirgin olmayacaktır. Panel camının bir bütün olarak çıkarılmasına yönelik işlemlerinde kullanılacak makinelerin boyutları büyük olacak, dolayısıyla geniş alan gerektirecek ve yüksek enerji tüketecek olması da maliyetlere artış yönünde katkı sağlayacaktır. Bu nedenlerle, mekanik ayrıştırma sonucu cam tozu elde etmek tercih edilir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Tüm sektörler gibi cam endüstrisinin de karbon ayak izi hassasiyetinin artacağı yakın gelecekte, FV atık miktarının, dolayısıyla geri kazanılan malzeme miktarının da artması ile birlikte, sıfırdan cam üretilmesi yerine bu camların yeniden kullanılması daha çok anlam ifade edecektir. Bu durumda işletme bu teknolojileri de bünyesine katabilecektir.

Camdan sonra FV panellerde kütlesel olarak ikinci sırada gelen malzeme alüminyum çerçevedir. Hücre içi katmanlarda ve hücreler arasına oluşturulan metal bağlantılarda da alüminyum bulunsa da bunlar ağırlık olarak çok düşük olduğu için burada asıl incelenen panel çerçeveleridir. Alüminyum alaşımlar, hafiflik, korozyon direnci ve yüksek mekanik dayanım sebepleriyle en çok tercih edilen çerçeve malzemesidir. Alüminyum çerçeve ister elle ister uygun bir makine ile basit bir mekanik işlem sonucu panelden ayrılabilmektedir. Panelin yaklaşık %16'sını oluşturan alüminyum çerçeve, ekonomik değer olarak panel ağırlığının %67'sini oluşturan camdan çok daha fazla değere karşılık gelmektedir. Kolaylıkla geri kazanılması ve piyasa değeri açısından yalnızca alüminyum çerçevenin çıkarılması iyi bir seçenek gibi dursa da içinde çok daha fazla değeri olan gümüş, silisyum ve bakır içeren panelin daha fazla ayrıştırılması hem ekonomik hem de çevresel açıdan bir gerekliliktir. Türkiye'de diğer elektronik ve elektrikli eşyalar için de benzer teknik yaygın olup atık toplayan geri dönüşüm firmaları kolay ayrıştırılan metal, plastik ve cam gibi malzemeleri çıkardıklarını, özellikle altın ve gümüş içeren elektronik devre ve kartları genellikle Almanya ya da Hollanda gibi gelişmiş ülkelere gönderdiklerini ifade etmektedirler.

İşletmenin Ölçeği ve Kapasite

İşletmenin ölçeği, güneş paneli geri dönüşüm tesisinin ilk yatırım planlamalarını etkileyecek bir diğer önemli ön karar olarak ortaya çıkmaktadır. Tesisin başlangıçtaki ve uzun vadeli işleme kapasitesine karar vermek, iş modelinin temelini oluşturacaktır. İşletme ölçeği için çeşitli alternatifler bulunmaktadır. Örneğin, sadece süreçleri doğrulamak ve öğrenmek amacıyla küçük ölçekli bir pilot tesisle başlanabileceği gibi FV atık akışından kısmî pay almayı hedefleyen orta ölçekli bir tesisle ya da pazar payının tamamını tek başına elinde tutan büyük ölçekli bir ulusal hatta uluslararası tesisle başlanması seçenekleri vardır. Tesisin ölçeğine ilişkin bu karar, işletmenin ihtiyaç duyacağı finansal kaynakları, ulaşabileceği pazar talebini, lojistik yeteneklerini ve gelecekteki büyüme potansiyelini doğrudan etkileyecektir. İşletme ölçeğini belirlerken, mevcut finansman kaynaklarını, hedef pazardaki kullanılmış panel miktarını, panel toplama ve işleme kabiliyetini ve tesisin ölçeklenebilirliğini dikkate almak önemlidir.

Başlangıçta küçük ölçekli bir pilot tesisle başlayarak süreçleri ve teknolojiyi test etmek, operasyonel verimliliği artırmak ve riskleri minimize etmek için iyi bir yaklaşım olacağı değerlendirilmektedir. IRENA ve IEA PVPS tarafından hazırlanan bir analiz raporuna göre Türkiye'nin 2030 yılındaki FV atık miktarları normal kayıp senaryosuna göre 1.500 ton, erken kayıp senaryosuna göre ise 11.000 ton olarak tahmin edilmiştir (Weckend vd., 2016). Tesisin yatırım kararının alınması, finansman sağlanması, ekipman temini, kurulum, işletmeye alma gibi süreçlerin süre alacağı dikkate alınırsa, 2026-2027 yıllarında işletmeye girecek bir tesisin yıllık 5.000 ton civarında bir FV akışı sağlaması mümkün görünmektedir. Bu durumda, tesis planlamasının yıllık 5.000 ton kapasiteyi işleyecek ekipman baz alınarak yapılması uygun olacaktır. Ortalama panel ağırlığının 20 kg, ortalama panel gücünün de 400 vat olduğu varsayılırsa, bu kapasite 250,000 panele ve 100 MW kurulu güce karşılık gelmektedir.

Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinin başarısı, malzeme geri kazanımı ve çıktı konusunda alınan kararlara da bağlı olacaktır. Yalnızca hangi malzemelerin geri kazanılacağını değil, aynı zamanda bu malzemelerin nasıl işlendiğini ve potansiyel alıcılara ne şekilde sunulduğunu da belirlemeye yol gösterecektir.

İşletmenin Yapısı

FV panel geri dönüşüm işinin tek başına ve sadece bu alanda faaliyet gösteren bir işletme mi olacağı, yoksa halihazırda geri dönüşüm sektöründe faaliyet göstermekte olan bir işletmenin bünyesinde yeni bir faaliyet alanı olarak mı başlatılacağı alınması gereken bir karardır. Örneğin, Fransa'nın bu alandaki ROSI firması sadece bu alana odaklanmış bir teknoloji firmasıdır ve ortaklık yapısında enerji sektöründen, güneş enerjisi sanayisinden ve geri dönüşüm sektöründen firmaların ortak kurdukları bir işletmedir.

FV panel geri dönüşümü işi günümüzde yeni gelişmekle birlikte gelecekte önemli bir iş kolu olacaktır. Temel olarak bakıldığında bu iş alanı güneş enerjisi sektörü ile yakından ilişkili olsa da esasen temelde bir geri dönüşüm faaliyetidir. Dolayısıyla bu tür bir işletmeyi hayata geçirecek olan girişimcilerin geri dönüşüm

sektöründen gelmesi ve bu alanda güçlü ilişkileri ve sektörel bilgiyi beraberinde getirmesi işletme açısından en önemli maddi olmayan varlık olacaktır. Öte yandan, ilerleyen bölümlerde görüleceği üzere, FV panel geri dönüşüm işletmesinin temel faaliyeti panellerin geri dönüştürülmesi olmakla birlikte, işletmenin yerine getirmesi gereken pek çok temel faaliyet olacaktır. Örneğin işletmenin her şirkette bulunması gereken idari ofisinden güvenlik ve temizlik ihtiyacına kadar geniş bir makine, ekipman, yazılım, personel ve benzeri kaynaklara sahip olması gerekecektir. Ayrıca işletmenin avantajlı bir konumda arazi ve işletme gereksinimlerine uygun nitelikte binaya sahip olması gerekir. Daha da önemlisi, genel olarak geri dönüşüm süreçlerinde bilgili mühendis ve teknisyen kadrosuna ve teknik bilgi birikimine, doğrudan panel dönüşümüne özgü olmayan ve her endüstriyel tesiste bulunması gereken vinç, forklift, temel avadanlık, bakım onarım için gerekli olacak diğer teçhizat ve makinelere, geri dönüşüm sektörü içerisinde güçlü tedarik zinciri ilişkilerine, yasal uyum gereklilikleri doğrultusunda çeşitli lisans izinlere ihtiyaç vardır. Bütün bu kaynaklar, doğrudan panel geri dönüşümü ile ilgili yatırımlara kıyasla azımsanmayacak düzeye çıkacak yatırım ve işletme maliyetleri doğuracak, üstelik bunların hiçbiri gelir getirici nitelikte olmayacaktır. Zaten gelir açısından gelişmekte olan bir pazarda faaliyet gösterecek işletmenin bir de bu maliyetleri kendi başına karşılaması kolay olmayacaktır.

Yukarıda sayılmış olan gerekçelerle, FV panel geri dönüşüm işinin bağımsız ve tüm kaynakları kendisi yöneten bir işletme olmaktansa, mevcut bir geri dönüşüm işletmesi çatısı altında kurulması finansal sürdürülebilirlik açısında çok daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Buna rağmen, raporun bu bölümünde bu alandaki bir işletmenin iş modelini eksiksiz olarak ortaya koymak amacı güdüldüğü için FV panel geri dönüşüm işinin diğer tüm yan faaliyetlerle birlikte bağımsız bir işletme tarafından yürütüldüğü varsayımı benimsenmektedir.

11.2 FV Panel Geri Dönüşümü İş Modeli

ÖT FV panellerden elde edilen malzeme genel olarak hurda niteliğinde olduğu için bunların en yüksek verim elde edilecek şekilde planlanması ve ekonomik değerlerinin iyi takip edilmesi bir zorunluluktur. Panellerden geri kazanılan malzemelerden elde edilen ekonomik değerin, yapılacak yatırımı karşılayarak sürdürülebilir iş hâline getirecek ölçüde olmasını sağlamak için çok dikkatli bir iş modeli kurulması gerekmektedir. Bu nedenle olabildiğince net ve her faktörü dikkate alan, uçtan uca bir iş modeli tasarlanmalıdır.

Bu bölümde örnek bir ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesi için bir iş modeli örneği ortaya konulmaktadır (Şekil 7). İş modelin 11.1'de ayrıntılı olarak açıklanmış olan öncül kararlar doğrultusunda oluşturulmuştur. Örnek iş modeli gerçek hayatta bire bir uygulanacak ayrıntıda tasarlanmamış olup girişimcinin iş modelinden hareketle ayrıntılı bir iş planı dokümanı hazırlaması gerekmektedir. Önerilen iş modelini gerçek bir işletmeye aktarılması sırasında dikkate alınması gereken noktalar yeri geldikçe ifade edilmekte, girişimcinin burada verilenlerden başka seçenekleri benimsemesi durumunda izlemesi gereken yollar da gösterilmektedir.

İş modeli hazırlanması için yeni kurulmakta olan pek çok işletmenin kullandığı "İş Modeli Kanvası" yöntemi etkili bir araçtır. İş modeli kanvası, bir işletmenin girdi temininden başlayarak, satışa uygun ürünlerinin ekonomik değere dönüşmesine kadar tüm aşamalarda uygulaması gereken tüm faaliyet alanlarını, ilişkileri, kaynakları ve maliyet öngörüsünü sistematik bir şekilde ele almayı sağlayan bir şablon sunmaktadır. Model iş ortaklıklarını, kritik aktiviteleri, gerekli kaynakları, maliyet yapısını, değer önerisini, müşteri ilişkilerini, müşterilere erişimi sağlayan kanalları, hedef pazar segmentlerini ve gelir akışını özetleyen yapıdadır.

Temel Ortaklar

- Güneş Paneli Üreticileri
- Güneş Enerjisi Çiftliği İşletmecileri
- Geri Dönüşüm Ekipman Tedarikçileri
- Atık Yönetim Şirketleri
- Geri Dönüşüm Şirketleri
- Sigorta Şirketleri
- Lojistik Şirketleri
- Hükümet ve Düzenleyici Kurumlar
- Ar-Ge Kurumları, Üniversiteler
- Sektör Dernekleri

Temel Faaliyetler

- Panel Söküm
- Panel Toplama ve Taşıma
- Malzeme Geri Kazanımı
- Malzeme Arıtma/Yükseltme
- Atık Yönetimi ve Bertaraf
- Kalite Kontrol ve Test
- Araştırma ve Geliştirme
- Müşteri ve Tedarikçi Yönetimi
- Yasal Uyum ve Raporlama

Temel Kaynaklar

- Tesis ve Ekipmanlar
- Lisans ve İzinler
- Fikri Mülkiyet
- Lojistik ve Taşıma Araçları
- Eğitimli Personel ve İş Gücü
- Finansal Kaynaklar ve Yatırım
- Bilgi Teknolojisi ve Yönetim Sistemleri
- Araştırma ve Geliştirme Kaynakları

Değer Önerisi

- Değerli Malzemelerin Geri Kazanımı
- Ekonomik Fırsatlar
- Yasal Uyum
- Teşvikler
- Çevresel Sürdürülebilirlik
- Enerji Tasarrufu
- Marka İmajı ve Sosyal Sorumluluk
- Müşteri Güveni ve Sadakati

Müşteri İlişkileri

- Uzun Vadeli Tedarik Anlaşmaları
- İhale Bazlı Işbirlikleri
- Teknik Destek
- Teknolojiler Hakkında Bilgilendirme
- Geri Kazanılmış Malzemeler Hakkında Bilgilendirme
- Ar-ge Ve Yenilikçilik Projeleri
- Sivil Toplum Faaliyetleri

Kanallar

- Doğrudan Satış Ekipleri
- Endüstri Fuarları ve Konferanslar
- İş Ortaklıkları
- Çevre ve Enerji Fuarları
- Eğitim ve Bilgilendirme Seminerleri
- Online Platformlar ve Web Sitesi
- Sosyal Medya Kanalları

Müşteri Segmentleri

- Güneş Paneli Üreticileri
- GES Sahibi Şirketler
- GES Kurulum Şirketleri
- Elektronik Üreticileri
- İnşaat Sektörü
- Cam Üreticileri
- Metal İşleme ve Üretim Şirketleri
- Otomotiv Sektörü
- Plastik Üreticileri
- Ambalaj Sektörü
- Ar-Ge Kurumları
- Çevre Dostu Ürünler Üreten Şirketler

Maliyet Yapısı

- Başlangıç Yatırımı Maliyetleri: Arazi, Bina, Ekipman, Lisans ve İzinler, Fikri Mülkiyetler, İlk Kuruluş Maliyetleri
- İşletme Maliyetleri: ÖT Panel Tedarik Maliyeti, Personel, Enerji, Su, Kimyasal, B/O, Lojistik, İdari Ofis, Ar-Ge, Kurumsal İletişim ve Etkinlikler

Gelir Kaynakları

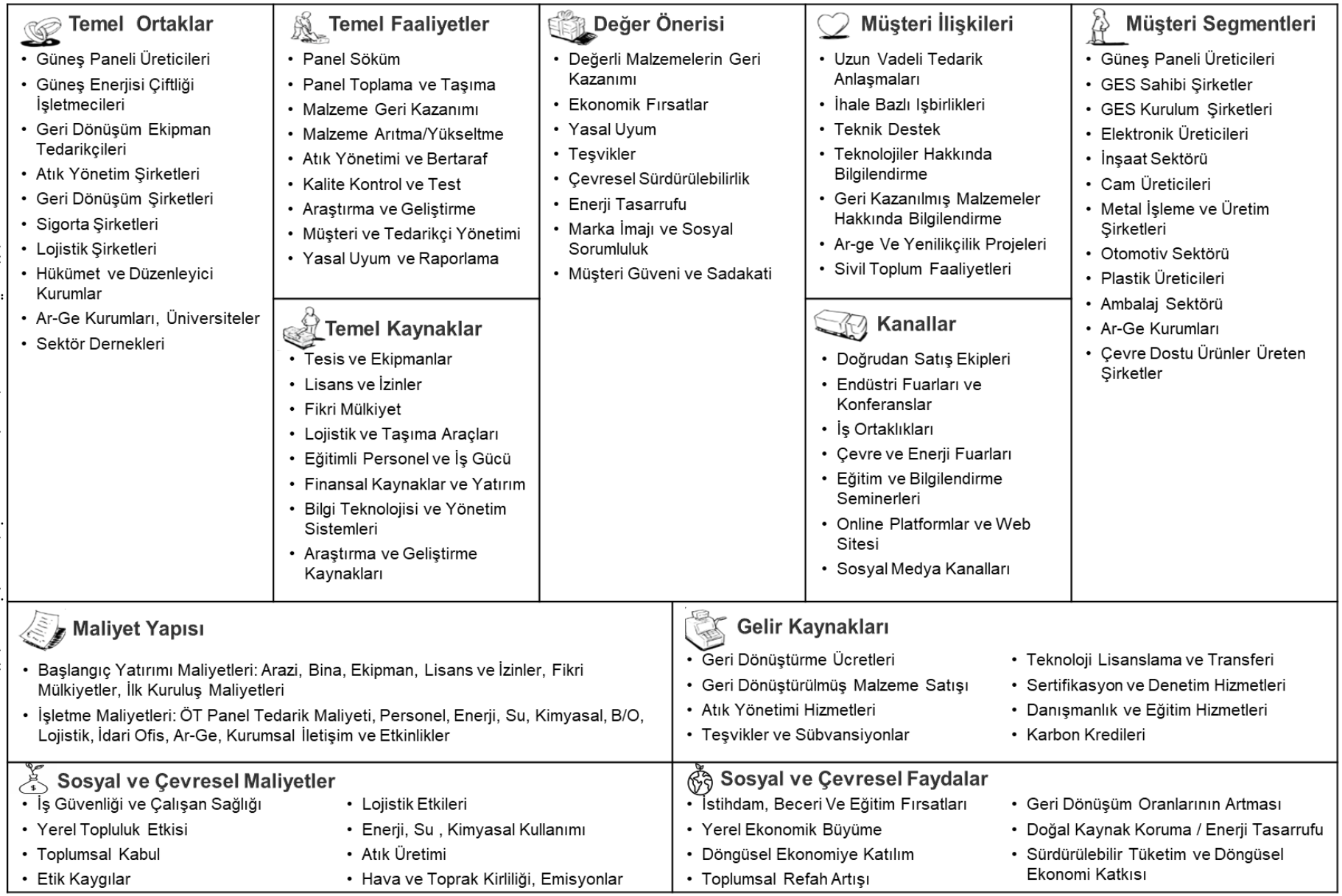
- Geri Dönüştürme Ücretleri
- Geri Dönüştürülmüş Malzeme Satışı
- Atık Yönetimi Hizmetleri
- Teşvikler ve Sübvansiyonlar
- Teknoloji Lisanslama ve Transferi
- Sertifikasyon ve Denetim Hizmetleri
- Danışmanlık ve Eğitim Hizmetleri
- Karbon Kredileri

Sosyal ve Çevresel Maliyetler

- İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı
- Yerel Topluluk Etkisi
- Toplumsal Kabul
- Etik Kaygılar
- Lojistik Etkileri
- Enerji, Su , Kimyasal Kullanımı
- Atık Üretimi
- Hava ve Toprak Kirliliği, Emisyonlar

Sosyal ve Çevresel Faydalar

- İstihdam, Beceri Ve Eğitim Fırsatları
- Yerel Ekonomik Büyüme
- Döngüsel Ekonomiye Katılım
- Toplumsal Refah Artışı
- Geri Dönüşüm Oranlarının Artması
- Doğal Kaynak Koruma / Enerji Tasarrufu
- Sürdürülebilir Tüketim ve Döngüsel Ekonomi Katkısı



Şekil 7: ÖT FV Panel Geri Dönüşüm İşletmesi İş Modeli

11.2.1 Değer Önerisi

İş modeli kanvasının orta bölümünde yer alsa da işletmeyi en iyi tanımlayan bölümü Değer Önerisi başlıklı kısımdır. Değer önerisi, bir şirketin sunduğu ürün veya hizmetlerden müşterilerin sağladığı faydaları ve bu faydaların neden rakiplerinden daha üstün olduğunu açıklayan kısa ve net bir ifadedir.

FV panellerin geri dönüşümü ile ilgili bir işletmenin değer önerilerinin başında ekonomik açıdan değerli malzemelerin geri kazanımı gelmektedir. Panellerde bulunan değerli metallerin ve diğer malzemelerin geri kazanılarak yeniden kullanılması doğal kaynakların ve işlenerek yüksek saflığa ulaşmış malzemelerin verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Geri dönüşüm sektörü, yeni iş fırsatları ve büyüme potansiyeli sunduğu için ekonomik değer fırsatı da ön plandadır.

Ülkemizde henüz FV panel geri dönüşümü konusu özelinde düzenlemeler bulunmasa da EEE atık yönetimi için belirlenmiş genel çerçeve taraflara somut yasal yükümlülükler getirdiği için bu şartlara uyum sağlanması da müşteriler için değer ifade eden bir hizmet niteliğindedir. Benzer şekilde eğer FV panellerin geri dönüşümü birtakım teşviklerle destekleniyorsa, bu fırsat da teşvikten yararlananlar için bir değer önerisi niteliğindedir.

ÖT FV panellerin katı atık olarak doğaya terk edilmesinin çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Geri kazanım tesisi katı atık depolamaya giden atık miktarını önemli ölçüde azaltarak çevresel sürdürülebilirlik açısından da değer ifade edecektir. Özellikle FV panel üretiminde kullanılan silisyum gibi malzemelerin yüksek saflıkta olması gerektiği ve doğadan elde edilen ham maddelerin yüksek saflığa getirilmesi yüksek enerji tüketimi, dolayısıyla karbon emisyonu olan süreçler gerektirdiği için geri dönüşüm yapılması, yeni malzemelerin üretiminde tüketilecek enerji enerjinin tasarrufu edilmesini sağlamaktadır. Çevresel fayda ve maliyetlerin finansal karşılığını bulmak ayrıntılı analizler gerektirmektedir. Örneğin, katı atık depolama faaliyetinin birim maliyetleri esas alarak, önlenen atık miktarı üzerinden bir maddi kazanç hesabı yapılması mümkündür. Benzer şekilde, FV panel karbon ayak izi değerleri ile uluslararası karbon piyasalarındaki karbon fiyatları esas alınarak kazanılan değer hesaplanabilir. Ancak bu tür çevresel maliyetlerin işletme ölçeğinde bir gelire dönüşmesi ancak devletlerin önlenen çevresel maliyetleri geri dönüşüm işletmelerine teşvikler şeklinde yansıtması ile mümkün olabilir. Bu tür düzenlemelerin olmadığı ülkelerde işletmenin bu değer önerisinin finansal karşılığına erişmesi oldukça güçtür.

Çevre dostu uygulamalar, şirketlerin marka imajının güçlenmesi ve sosyal sorumluluk bilinci mesajını pekiştirmesi sebebiyle ilgili firma açısından değer yaratılması imkânı doğurmaktadır. Bunun bir sonucu olarak bilhassa çevreye duyarlı müşteriler, ürünlerini geri dönüştürmeye özen gösteren şirketlere daha fazla güven duyup bağlılık geliştirecek, böylece firmalar için çok değerli olan müşteri güveni ve sadakati de gelişecektir.

11.2.2 Temel Faaliyetler

ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesinin müşterilerine ve topluma sunmayı vadettiği değerleri yaratması için bazı temel faaliyetler yürütmesi gerekecektir. ÖT FV panel atıklarını geri dönüştüren bir tesisin en temel faaliyeti, artık kullanılamayacak hale gelen FV panellerden ekonomik değeri olan malzemeler elde etmektir. Ancak faaliyetlerin detayına inilecek olursa, tesisin yerine getirmesi gereken işlevler panel toplama ve taşıma, panel söküm ve ayrıştırma, malzeme geri kazanımı, atık yönetimi ve bertaraf, kalite kontrol ve test, araştırma ve geliştirme, müşteri ve tedarikçi yönetimi ve yasal uyum ve raporlama olarak sıralanabilir. Aşağıda ayrıntıları verilen faaliyetlerin bir kısmı işletmenin kendisi yerine ortaklar aracılığı ile icra edilebilir. Durum böyle dahi olsa, işlev ağacının bütünlüğünün sağlanması ve göz ardı edilmemesi açısından firmanın faaliyet alanları içerisinde gösterilmesi doğru olacaktır. Örneğin, panel toplama ve taşıma faaliyeti dış paydaşlar tarafından gerçekleştirilse bile firmanın bunu temel faaliyetler arasında görmeye devam etmesi, hatta bu faaliyeti küçük ölçekte kendisi de yapabiliyor olması gerekmektedir.

Panel Toplama ve Taşıma

Bu faaliyet, işletmenin geri dönüşüm sürecinin başlangıç noktasıdır. Güneş enerjisi santrallerinden, kurulum şirketlerinden, konutlardan ve diğer kaynaklardan ömrünü tamamlamış FV panellerinin toplanması ve tesise nakledilmesi bu faaliyeti oluşturur. Panel toplama stratejileri geliştirilirken, etkin lojistik planlaması, güvenli taşıma yöntemleri ve yasal düzenlemelere uygunluk ön planda tutulmalıdır. İşletme, bu faaliyeti yetkili firmalar aracılığıyla yapsa dahi, kendi toplama ve taşıma yeteneğine sahip olması, esneklik ve güvenilirlik açısından büyük avantaj sağlayacaktır.

Panel Söküm ve Ayrıştırma

Tesisin en kritik aşamalarından biri olan bu bölümde, toplanan panellerin güvenli bir şekilde sökülmesi ve farklı bileşenlerine (cam, alüminyum, silisyum, plastik vb.) ayrılması gerçekleştirilir. Bu işlem, özel ekipmanlar ve teknik bilgi gerektirir. Sökme ve ayrıştırma süreçleri optimize edilerek, verimli malzeme geri kazanımı hedeflenir ve geri dönüşüme uygun olmayan atıklar ayrılır. Bu adımda, atıkların yönetimi ve bertarafı için gereken süreçler de entegre bir şekilde planlanmalıdır.

Malzeme Geri Kazanımı

Ayrıştırılan bileşenlerden ekonomik değeri olan ham maddelerin geri kazanıldığı aşamadır. Bu süreçte, kimyasal, mekanik ve termal yöntemler kullanılarak, silisyum, gümüş, bakır, alüminyum ve cam gibi malzemelerin yüksek verimlilikle geri kazanılması hedeflenir. Her bir malzeme için özel geri kazanım süreçleri geliştirilerek, geri kazanım oranları maksimize edilir ve elde edilen malzemelerin kalitesi güvence altına alınır.

Atık Yönetimi ve Bertaraf

Geri dönüşüm sürecinde ortaya çıkan ve geri kazanılamayan atıkların çevreye zarar vermeden yönetilmesi ve bertaraf edilmesi bu faaliyetin konusudur. Atıkların uygun şekilde depolanması, işlenmesi ve yasal düzenlemelere uygun olarak bertaraf edilmesi gerekmektedir. Atık yönetimi stratejileri geliştirilirken, sıfır atık hedefi ve geri dönüşümün desteklenmesi prensipleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Kalite Kontrol ve Test

Geri kazanılan malzemelerin kalitesini ve güvenilirliğini garanti altına almak için düzenli kalite kontrol ve testler yapılmalıdır. Bu testler, malzemelerin içeriğini, saflığını, fiziksel ve kimyasal özelliklerini değerlendirir. Kalite kontrol süreçleri, müşteri memnuniyetini sağlamak ve geri kazanılan malzemelerin pazarlanabilirliğini artırmak için hayati öneme sahiptir.

Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge)

Geri dönüşüm süreçlerini sürekli olarak iyileştirmek, yeni teknolojiler geliştirmek ve malzeme geri kazanım oranlarını artırmak için Ar-Ge çalışmaları yürütülmelidir. Ar-Ge faaliyetleri, işletmenin rekabet gücünü artırır, maliyetleri düşürür ve çevresel etkilerini azaltır. Bu faaliyetler kapsamında üniversiteler, araştırma kurumları ve teknoloji şirketleriyle iş birlikleri kurulabilir.

Müşteri ve Tedarikçi Yönetimi

Tedarik zincirinin etkin yönetilmesi ve müşteri ilişkilerinin güçlendirilmesi, işletmenin başarısı için kritik öneme sahiptir. Güvenilir tedarikçilerle çalışmak, düzenli ham madde akışını sağlar; müşteri beklentilerini karşılamak, müşteri memnuniyetini ve sadakatini artırır. İyi bir müşteri ve tedarikçi yönetimi, uzun vadeli iş ilişkilerinin kurulmasını ve sürdürülmesini sağlar.

Yasal Uyum ve Raporlama

İşletmenin tüm faaliyetlerinin yasal düzenlemelere uygun olarak yürütülmesi ve gerekli raporların zamanında ve doğru bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Çevresel düzenlemeler, atık yönetimi yasaları, iş sağlığı ve güvenliği standartları gibi konularda yasal uyum sağlanmalı ve ilgili raporlar düzenli olarak sunulmalıdır.

11.2.3 Temel Ortaklar

ÖT FV panel geri dönüşüm tesisinin iş modelinde temel ortaklıklar işletmenin hangi dış paydaşlarla etkileşim içinde olacağını ve hayatını sürdürmesi için bunlarla kurması gereken ilişkileri tanımlar.

Tesisin geri dönüştürülecek panellere erişmesi kritik olduğu için özellikle elektronik atık toplama ve taşıma lisansına sahip işletmelerle kalıcı iş ortaklıkları kurması gerekmektedir. Tesisin kârlılık yakalayabilmesi için sürekli ve nitelikli FV atık akışını sağlaması zorunludur. FV atıkların toplanması ve tesise getirilmesi faaliyeti kurulacak işletmenin kritik aktivitelerinden biri olabileceği gibi, işletme bu işi alanında uzman ve geniş ağa sahip iş ortakları aracılığıyla da yürütebilir. Atık temini başlı başına bir iş kolu olup EEE atıklarının toplanması konusunda uzmanlaşmış, lisanslı işletmeler yurt genelinde atık akışlarını yakından takip etmekte ve atıkları alarak ilk ayrıştırmadan geçirerek daha sonra uygun geri dönüşüm tesislerini belirleyerek ayrıştırılmış atıkları bunlara iletmektedir. Özellikle büyük miktarda atığı olan belediyeler gibi kurumlar ve bankalar gibi kuruluşlar ekonomik ömrünü tamamlamış atıklarını genellikle ihale ile bu firmalara satmaktadır. Bu tür kanallardan FV atık da zaman içinde gelecektir. FV geri dönüşüm işletmesi büyük santralların atıklarını almak için yine bu işletmeleri aracı olarak kullanabileceği gibi doğrudan ihaleye de girebilir.

Geri dönüşüm ekipman ve teknoloji sağlayıcı firmalar da işletmenin sürekli ilişki içinde olması gereken iş ortaklarıdır. Bir diğer iş ortağı grubu mevcut panel üreticileridir. Panel üreticileri ham üretim sürecinde hem de garanti taahhütleri çerçevesinde önemli bir FV atık kaynağı teşkil edecektir. Ayrıca panel üretim teknikleri ve kullanılan malzemeler hakkında teknolojik bilgilerin üreticilerden edinilmesi tesisin faaliyetlerini kolaylaştıracaktır.

11.2.4 Temel Kaynaklar

Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinin temel kaynakları, sadece operasyonel süreçlerin sorunsuz işlemesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadeli başarı, sürdürülebilirlik ve sektörde rekabet avantajı elde etmek için de kritik bir rol oynar.

Arazi ve Binalar

FV panel geri dönüşüm işletmesinin gereksinim duyacağı kaynakların başında, fiziksel varlıklar yer alır. Geri dönüşüm sürecinin kalbi olan bu varlıklar, işleme tesislerinin ve depolama alanlarının bulunduğu arazi ve üzerindeki uygun tasarlanmış binalarda, geri dönüşüm makinelerinden ve tesis içinde ve dışında nakliye işini görecek taşıma araçlarından oluşur. Tesislerin konumu, büyüklüğü ve teknolojik donanımı, geri dönüşüm verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. İlk etapta kurulacak işletmenin sadece mekanik geri dönüşüm yapılacak olup buna uygun ekipman hattının yaklaşık olarak 25 metre uzunluğunda ve 7 metre genişliğindedir. Ekipmanın işletilmesi, bakım onarım yapılması ve malzeme taşıma gereksinimleri düşünülerek hattın iki yanında 5'er metre pay bırakılması gerekir. Dolayısıyla ana geri dönüşüm faaliyetinin yerine getirilmesi için en az 600 m^2 kapalı alana ve 6 metre tavan yüksekliği sahip bir iş yerine ihtiyaç olacaktır. İşletmenin kimyasal veya termik işlemler de uygulaması tercih edilecek olursa alan gereksinimi kullanılacak ekipmanın büyüklüğünü alacak ölçüde artırılmalıdır. Mekanik ayrıştırma konsepti üzerine kurulu olsa dahi ileride kimyasal ve ısıl prosesler de yapabileceği öngörülerek tesis alanının büyük tutulması yararlı olacaktır. Ayrıca bu işletmenin sürekli Ar-Ge faaliyeti olacağı düşünülerek Ar-Ge alanları, panellerin çeşitli testlerinin yapılacağı test cihazları için alanlar, idarî ofis binaları, çalışanlar için sosyal tesisler ve henüz işlenmemiş paneller ile satışı gerçekleşmemiş malzeme çıktıları için depolama alanları da gerektiği göz

önünde tutulmalıdır. Bütün bunlar düşünülerek, tesisin en az 2.400 m^2 kapalı alanı bulunması gerekmektedir. Çeşitli geri dönüşüm tekniklerini birlikte kullanan ve yıllık FV panel geri dönüştürme kapasitesi 3.000 ila 5.000 ton arasında olduğu tahmin edilen ROSI firmasının tek bir tesisinin toplam kapalı alanı 14.500 m^2 olup firmanın idari binası ayrı bir kampüste, Ar-Ge ofisi ise Grenoble Alpes Üniversitesinin teknoloji geliştirme bölgesindedir.

Geri Dönüşüm Ekipmanı

İşlemlerin bir kısmı insan eliyle yapılabilse de FV panel geri dönüşüm süreçlerinin birçoğu tamamen makineleşmiş iş süreçleridir. Zaten sayısı milyonlarla ifade edilebilecek potansiyel atık panel sayısı düşünülecek olursa, bu durum kaçınılmazdır. Önerilen tesisisin geri dönüşüm konsepti mekanik ayrıştırma ve toz boyutuna getirme olarak belirlendiği için ilk etapta tesisin bu konsepte uygun makineler ile donatılması gerekecektir. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, mekanik geri dönüşüm bir dizi parçalama, kırma, ufalama ve eleme işlemlerinden oluşan bir süreçtir.

Önerilen ÖT FV panel geri dönüşüm tesisi ekipman listesi, farklı aşamalardaki işlemleri kapsayan karmaşık bir geri dönüşüm sisteminden oluşmaktadır. Sistem, parçalama, kırma, ayırma, eleme ve toplama işlemleri yapan bir dizi makinelerle donatılmıştır. Bu şekilde azami büyüklüğü 2,4 x 1,4 m olan FV panellerden başlayarak daha ince malzemelere doğru ilerleyen çok aşamalı bir süreç izlenmesi öngörülmektedir. Sistemde, özellikle titreşimli elekler, manyetik ayırma, anafor akımı ayırma, hava ayırma ve elektrostatik ayırma gibi çeşitli teknikler kullanılarak malzeme ayrılmaktadır. Bu da cam, metaller ve silisyum gibi değerli malzemelerin geri kazanılmasını sağlamaktadır. Makineler peş peşe yerleştirilmekte, malzeme akışı konveyör bantları sağlanmaktadır. Önerilen ekipman listesi temel olarak 5 farklı kırma/ufalama ünitesi, bunların her birini izleyen 3 elek, elek altı kalan malzemeyi niteliğine göre ayıran 4 adet ayırıcı, elek üstü malzemeyi bir sonraki aşamaya aktaran bant ve vida konveyörlerde oluşur. Her kırma/ufalama istasyonunda silisyum tozunu elde etmek için birer tane olmak üzere toplam 4 siklon ayırıcı ve toz toplayıcı ünitesi bulunmaktadır. Sistem yüksek derecede otomasyonla çalışması gerektiği için kontrol kabini de içermekte olup bu sayede verimliliğin ve verimin artırılması hedeflenmektedir. Aşağıdaki listede işlevlerine göre makine listesi verilmektedir.

- Parçalama ve Kırma: 2 adet çift şaftlı parçalayıcı, 1 adet dikey çekiçli kırıcı, 1 adet bıçaklı kırıcı ve 1 adet turbo değirmeni boyut küçültme işlevlerini yerine getirmektedir.
- Ayırma Teknikleri: Farklı nitelikteki malzemelerin ayrılması için ayırma tekniklerinin bir kombinasyonunu kullanması öngörülmektedir. Sistem malzemeleri boyutuna göre ayırmak için 3 adet titreşimli elek, demir içeren malzemeleri ayırmak için 1 adet manyetik ayırıcı, demir içermeyen metalleri çıkarmak için 1 adet anafor (eddy) akımı ayırıcı, malzemeleri ağırlıklarına göre ayırmak için 1 adet hava ayırıcı, ve malzemeleri elektriksel iletkenliğe göre ayırarak plastik ile metal parçaları birbirinden ayırmak için 1 adet elektrostatik ayırıcı içermektedir.
- Taşıma: Sistemde 5 adet konveyör bandı ve 2 adet vida konveyör bulunmaktadır.
- Silisyum Geri Kazanımı: Sistemde sürecin en sonunda 4'er adet siklon ayırıcı ve toz toplayıcı bulunmakta olup bu cihazlar FV panel geri dönüşüm sürecinin en değerli çıktılarından biri olan silisyum tozunu yakalamayı sağlamaktadır.
- Soğutma Sistemi: Özellikle parçalama ve kırma işlemleri sırasında makineler yüksek enerji harcaması sonucu yükselecek sıcaklıklarının düşürülmesi için su bazlı soğutma makinesi sistem kapsamında alınmalıdır.
- Kontrol Sistemi: Tüm cihazlar arasındaki koordinasyonu sağlayarak tüm süreci tam otomatik hâle getiren kontrol kabini sistemi yönetmek için gereklidir.

Bu bölümde verilen makine konfigürasyonu öncül kararlara uygun olarak imalat yapabilecek olup FV panel geri dönüşümü amaçlı tesis kurgu seçeneklerinden sadece birine örnek oluşturmaktadır. Bu konfigürasyondaki bileşenler kendi içinde değiştirilebileceği gibi tamamen farklı makinelerden oluşan bir

süreç de kurulabilir. FV panel geri dönüşüm işletmeleri henüz çok az sayıda ve kapasitede olduğu için tesislerin kurgusu hakkında sektör genelinde kabul edilmiş bir en iyi uygulama modeli henüz oturmamıştır. Bu nedenle, girişimcilerin makine tedarikçileri ile derinlemesine bir teknik iletişim kurarak, tesis konfigürasyonunun kendi öncül kararlarına göre almaları, değişik ekipman üreticilerinin yenilikçi çözümlerini değerlendirmeye açık olmaları, rekabetçilik açısından önemlidir.

Diğer Makine, Teçhizat ve Ekipman

Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinin temel kaynakları arasında bina, arazi, geri dönüşüm makineleri gibi temel unsurların yanı sıra, operasyonel verimliliği ve güvenliği artıracak çeşitli makine ve teçhizatın da bulundurulması gerekmektedir.

Öncelikle, malzeme taşıma ve depolama ekipmanı bu kapsamda büyük önem taşır; forkliftler, palet taşıyıcılar, konteynerler, vinçler ve farklı tipteki konveyör sistemleri, gelen panellerin ve geri dönüştürülmüş malzemelerin tesis içerisinde düzenli ve verimli bir şekilde taşınmasını ve depolanmasını sağlar.

Ardından, ölçüm ve analiz ekipmanı da gereklidir; tartım sistemleri, spektrometreler, kimyasal analiz cihazları ve kalite kontrol ekipmanı, malzemelerin doğru bir şekilde ölçülmesini, kalitesinin analiz edilmesini ve standartlara uygunluğunun sağlanmasını garanti eder.

İşletmenin güvenli ve çevreye duyarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için güvenlik ve çevre kontrol ekipmanı da olmazsa olmazlardandır; yangın söndürme sistemleri, toz kontrol sistemleri, havalandırma sistemleri, atık su arıtma sistemleri, kişisel koruyucu ekipmanlar ve gaz algılama sistemleri bu kategoriye girer.

Ek olarak, bakım ve onarım ekipmanı, kaynak makineleri, el aletleri, test cihazları ve yağlama ekipmanı gibi unsurlar, tesis ekipmanının düzenli bakımının yapılmasına ve arızaların hızlı bir şekilde giderilmesine yardımcı olur.

İşletmenin idari ve yönetim süreçleri için ise, ofis ve idari ekipmanlar, bilgisayarlar, yazıcılar, ofis mobilyaları, iletişim sistemleri gibi unsurları kapsar.

Son olarak, aydınlatma sistemleri, jeneratörler, havalandırma, soğutma ve ısıtma sistemleri gibi diğer ekipmanlar da tesisin genel işleyişini destekler. Bu ek makine ve teçhizatın seçimi, tesisin büyüklüğüne, işleyeceği panel miktarına, seçilen teknolojilere, bütçeye ve yasal düzenlemelere göre dikkatlice yapılmalıdır.

Lisans ve İzinler

Güneş paneli geri dönüşüm işletmeleri için lisanslar ve izinler, yasal uyumluluğu, operasyonel sürekliliği ve çevresel sorumluluğu sağlamanın temelini oluşturur. Bu resmî belgeler, işletmenin yasal çerçevede faaliyet göstermesini, ilgili düzenlemelere uymasını ve paydaşlar nezdinde güvenilirliğini artırmasını sağlar. Lisans ve izinlerin önemi, sadece yasal zorunlulukları yerine getirmekle kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği desteklemek ve işletme itibarını güçlendirmekten kaynaklanır. Bu belgelerin eksikliği, operasyonların durdurulmasına, para cezalarına ve hatta yasal sorunlara yol açabilir. Aynı zamanda, finansman kaynaklarına erişimi de zorlaştırabilir. Bu nedenle, gerekli lisans ve izinlerin elde edilmesi, işletme faaliyetlerine başlamadan önce dikkatlice planlanmalı ve süreç düzenli olarak takip edilmelidir. Bu lisans ve izinlerin zamanında alınması ve güncel tutulması, işletmenin uzun vadeli başarısı ve sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir.

Genel olarak, güneş paneli geri dönüşüm işletmeleri için gerekebilecek lisans ve izinler atık yönetimi, emisyon kontrolü ve su kullanımı gibi çevre lisansları, atıkların toplanması ve taşınması için gerekli atık

taşıma izinleri, iş sağlığı ve güvenliği izinleri, tehlikeli madde işleme izinleri ve yerel belediyeden alınması gereken izinler olarak sayılabilir. Tesisin faaliyet göstereceği alan seçimi bu izinler açısından önemlidir. Faaliyetleri organize sanayi bölgelerinde yürütmek bu açıdan yararlı olacaktır.

Fikri Mülkiyet

İşletmeler için en değerli ikinci kaynak işletmenin benzersizliğini ve rekabet gücünü koruyan fikrî mülkiyet varlığıdır. Patentli geri dönüşüm teknolojileri, özel yazılımlar, geliştirilmiş süreçler ve iş sırları gibi unsurlar, işletmenin değerini artırır ve taklit edilmesini zorlaştırır. Kurulacak bir işletme ilk etapta sadece standart ekipman ile tek bir geri dönüşüm konsepti ile işe başlasa da zaman içinde yeni yatırımlarla proses çeşitliliği ve kapasitesi artırmalıdır. Ancak sürdürülebilir büyüme için daha kritik olan bir unsur firmanın sürekli Ar-Ge çalışmaları yaparak atık akışında karşılaşılabilecek değişik FV teknolojilerini de geri dönüştürebilir hale gelebilmesinin sağlanmasıdır. Ar-Ge çalışmaları ayrıca geri dönüşüm verimliliğini, kapasitesini ve malzeme geri kazanım oranlarını artırma fırsatları da sunabilir. Dünyadaki benzer tesislerin geri dönüşüm proseslerini ve kullandıkları ekipmanları çok özenle gizli tutma gayretleri de bu varlıkların Ar-Ge faaliyetleri sonunda elde edilen münhasır fikri mülkiyetlere dayanmasından ileri gelmektedir. Bölüm 7.4'te verilen patent listesi bunun bir göstergesidir. Bu nedenle, tesisin güçlü bir Ar-Ge altyapısı ve kadrosu kurması ve bu faaliyetleri alanında uzman araştırma altyapıları ve üniversiteler ile koordineli olarak yürütmelidir.

İnsan Kaynağı

İşletmelerin en değerli varlıklarından biri olan insan kaynakları ise, uzman mühendislerden kimyagerlere, teknisyenlerden lojistik personeline ve yönetim kadrosuna kadar geniş bir uzmanlık alanını kapsar. Kalifiye ve deneyimli personelin varlığı, operasyonların verimli yürütülmesi, teknik sorunların çözülmesi ve müşteri ilişkilerinin sürdürülmesinde büyük rol oynar.

Finansal Kaynaklar

İşletmenin faaliyetlerini başlatabilmesi, devam ettirebilmesi ve büyüme hedeflerine ulaşabilmesi için gerekli olan finansal kaynaklar da hayati öneme sahiptir. FV panel geri dönüşüm işletmesi için ilk yatırım sermayesi dikkatle hesaplanmalıdır. Bu aşamada işletme kredileri ve devlet teşviklerinden faydalanılması yararlı olacaktır. İşletmenin faaliyet konusu sanayinin yeşil dönüşümü ile doğrudan ilgili olduğu için özellikle bu alandaki kredi ve hibeler dikkatle incelenmelidir. Ayrıca yeşil dönüşüm destekleyen yatırımcı fonları da önem arz eder. Fakat bütün bu kaynaklardan önce işletme girişimcisinin öz sermaye katkısını kendi kaynakları ile sağlaması gerekir. Finansal kaynakların etkin yönetimi, finansal sürdürülebilirlik ve büyüme potansiyeli için kritiktir.

Diğer Kaynaklar

İşletmenin başarıya ulaşmasında ağ, yani iş birlikleri ve ilişkiler de kritik öneme sahiptir. İşletmenin yakın temasta olması gereken bu ağ, ticaret ve sanayi odaları, mühendis odaları, güneş enerjisi ile ilgili sektör dernekleri ve platformları, atık yönetimi ve geri dönüşüm dernekleri ve platformları, çevre kuruluşları ve sivil toplum örgütleri, araştırma kurumları ve üniversiteler, tedarikçi ve müşteri ağlarından oluşan çok geniş bir yelpazeyi kapsaması yararlı olacaktır. Güçlü bir ağ, kaynaklara erişimi kolaylaştırır, iş birliği fırsatları yaratır ve işletmenin sektördeki konumunu güçlendirir.

İşletmeyi teknolojik olarak geliştirecek ve ileriye taşıyacak araştırma ve geliştirme altyapısı ve personeline mutlaka yatırım yapılmalıdır. Bu alanda yetkinliği olan merkezler ve üniversitelerin ilgili bölümleri ile iş birlikleri kurularak Ar-Ge yatırımlarının ve maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılması, akademide geliştirilen yeni teknolojilerin süratle transfer edilmesi tesise sadece iç pazarda değil, global ölçekte büyük fırsatlar yaratabilir.

Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinde bilgi teknolojisi ve yönetim sistemleri, verimliliği artırmak, faaliyetleri optimize etmek ve karar alma süreçlerini desteklemek için hayati bir rol oynar. Bu kapsamda, stok takibi, malzeme yönetimi, müşteri ilişkileri yönetimi, finansal işlemler, raporlama ve tesis operasyonlarının takibi için yazılımlar ve sistemler kullanılması yerinde olacaktır. Ayrıca, veri analizi ve güvenlik önlemleri için bilgi teknolojisi temelli bir altyapı da gereklidir.

11.2.5 Müşteri Segmentleri

Müşteri segmentleri, özellikleri veya ihtiyaçları açısından kendi aralarında benzeşen ve diğerlerinden ayrışan müşterilerin oluşturduğu farklı gruplardır. Bu gruplar, bir işletmenin ürün ve hizmetlerini nasıl şekillendirdiğini ve iletişim stratejilerini nasıl belirlediğini önemli ölçüde etkiler. Segmentasyon, pazarlama stratejilerini özelleştirerek müşteri memnuniyetinin ve satış verimliliğinin artmasını sağladığı için önemlidir. ÖT FV panel geri dönüşüm iş modeli için müşteri segmentlerinin başında FV panel üreticileri vardır. Üreticiler GÜS kapsamında ömrünü tamamlayan panelleri geri topladıklarından bunlardan kurtulmak isteyecekleri için geri dönüşüm tesisinin hizmetlerinden faydalanmaları gerekecektir. Benzer şekilde GES sahibi firmalar ya da bunlara teknik ve işletme desteği veren müşavirlik firmaları da ya işletme süresinde tek tek ya da GES'in ömrünü tamamlaması durumunda topluca panel atığı ile yüz yüze gelecek ve bu panellerden kurtulmak isteyeceklerdir. Geri dönüşüm tesisinin panel üreticileri ve GES sahipleri ile olan ilişkisinde kimin para ödeyen taraf olacağı yanıtı kolay olmayan bir sorudur. İlk bakışta bu firmalar envanterde taşımak zorunda oldukları için maliyet oluşturan ama verim elde edilmeyen malzemeden kurtulmak için para ödemeye razı olmaları beklenebilir. Ama elektronik atık sektöründe, elinde atık olan ve bunu daha fazla envanterde tutmak istemeyen firmaların ya da kurumların biriken atıkları ihale ile en fazla bedel teklif eden firmaya satmaları şeklinde bir uygulama yaygınlık kazanmıştır. Bu nedenle, bu müşteri segmentleri bir yandan tedarikçi konumuna gelmektedir. Zaten dünyanın çeşitli ülkelerinde ÖT FV panel geri dönüşüm sektörünün ayağa kalkmasını ve canlanmasını teşvik eden düzenlemeler, atık sahibinin geri dönüşüm maliyet yükünü üstlenmesini sağlamaya yönelik kurgulanmakta ve geri dönüşüm tesisine nakit akışı olmasını garanti altına almaktadır.

FV panel üreticileri ve GES sahipleri dışında, önemli bir müşteri segmenti de geri kazanılan malzemenin satılabileceği firmalardır. Bu iş modelinde önerilen ÖT panel geri dönüşüm tesisinin satılabilir çıktısı ufalanarak toz hâline getirilmiş cam, silisyum, metaller, plastikler olduğu varsayımı üzerinde durulmaktadır. Kırılmamış cam ve kırılmamış hücre geri kazanılması öngörülmemektedir. Toz hâlindeki geri kazanılmış malzemenin bunları tekrar kullanılabilir niteliğe getirme yeteneğine sahip işletmelerde değerlendirilmesi gerekir. Örneğin, panellerde çıkarılan düşük saflıktaki silisyum tozu, saflık düzeyini yükselterek tekrar kullanabilecek elektronik üreticileri veya silisyum dilim üreticisi firmalara satılabilir. Benzer şekilde panelden elde edilecek çeşitli toz metaller metal işleyen şirketlere, toz kırık cam malzeme yeniden cam yapabilecek cam üreticilerine ya da izolasyon malzemesi üreten inşaat sektörü firmalarına satılabilir. Bunların dışında otomotiv sektörü, ambalaj sektörü ve plastik üreticileri de panellerden elde edilen geri kazanılmış malzemenin müşterisi olabilecek sektörlerdir. Özellikle ürünlerini geri kazanılmış malzemelerden üretildiğini vurgulayarak marka imajını güçlendirmek isteyen firmalar özel bir dikkati hak etmektedir. Ayrıca, geri dönüşümden elde edilen malzeme ile ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapmak isteyen kurum ve kuruluşların da bir müşteri segmenti olarak düşünülmesi gerekmektedir.

11.2.6 Kanallar

İş modeli kanvasındaki Kanallar, ürün veya hizmetlerin müşteri segmentlerine nasıl ulaştırılacağını belirlemeye yarar. İlk bakışta pazarlama kanalları gibi algılansa da bu liste, müşteriyle etkileşim kurma yollarını ve satış stratejilerini de kapsayan geniş bir başlıktır. Yanıtladığı sorular arasında müşterilere nasıl ulaşılacağı, onlarla nasıl iletişim kurulacağı, ürün veya hizmetlerin hangi yollarla sunulacağı ve hangi dağıtım kanallarının en etkili olacağı bulunmaktadır. Bu sorular, müşteri memnuniyetini artırmak ve satışları optimize

etmek için isabetli kararlar alınmasında etkendir. Ayrıca temel ortaklara erişim de bu kanallar etkili olacaktır. Çeşitli kanalların stratejik kullanımı, işletmenin müşteri tabanını genişletmesine ve uzun vadeli başarıya ulaşmasına katkı sağlar.

Doğrudan satış ekipleri, özellikle büyük ölçekli güneş paneli kurulum şirketleri ve atık yönetimi firmaları ile kişisel ilişkiler kurarak, özel ihtiyaçlara göre çözümler sunar. Endüstri fuarları ve konferanslar ise, sektör profesyonelleriyle bir araya gelerek, işletmenin görünürlüğünü artırır ve yeni iş bağlantıları kurma fırsatı sunar. İş ortaklıkları, özellikle panel tedarikçileri ve kurulum firmalarıyla yapılan anlaşmalar, sürekli bir FV atık akışını temin etmeye yöneliktir. Çevre ve enerji fuarları gibi özel etkinlikler, müşterilere ve temel ortaklara ulaşmak için etkili bir platform oluşturur. Eğitim ve bilgilendirme seminerleri, geri dönüşüm süreçleri hakkında farkındalık yaratırken, potansiyel müşterilerin işletmeye olan güvenini artırır ve temel ortakların bilgilenerek daha etkin iş birlikleri geliştirilmesini sağlamaktadır. Çevrim içi platformlar ve web sitesi, hizmetler hakkında kolayca bilgi edinilmesini sağlar ve etkili bir iletişim aracı olarak işlev görür. Son olarak, sosyal medya kanalları, geniş kitlelere ulaşarak markanın bilinirliğini, toplumsal kabul ve desteği artırmak için günümüzden en etkili yöntemdir. Ayrıca etkileşimli sosyal medya kanalları müşteri etkileşimini de güçlendirmektedir.

Her bir müşteri segmentinin iletişim ve katılım alışkanlıkları dikkate alınarak, ilgili segmentin beklenti, tercih ve davranışlarına uygun etkileşim kurulması ve mesajlar verilmesi önemlidir. Ayrıca müşteri segmentlerinin zaman içindeki evrimi dikkate alınarak kanallar da sıklıkla gözden geçirilmelidir.

11.2.7 Müşteri İlişkileri

Müşteri ilişkileri, işletmenin müşteri segmentleri ile nasıl etkileşim kuracağını ve bu ilişkileri nasıl yöneteceğini tanımlamaya yarar. Müşteri ilişkileri, müşteri memnuniyetini artırmak ve uzun vadeli sadakat oluşturmak için kritik öneme sahip olduğu için stratejik olarak ele alınmalıdır. FV atık geri dönüşüm tesisinin sürdürülebilirliğini sağlamak için en can alıcı konu düzenli ve sürekli FV atık akışı sağlanmasıdır. Bu nedenle tesisin kurulduğu ilk zamanlarda FV atığı sağlanacak FV panel üreticisi, büyük ölçekli GES sahipleri ve kurulum firmaları gibi işletmelerle uzun vadeli ve sürekli ilişkiler kurulması büyük önem taşımaktadır.

Benzer şekilde süreç sonrası elde edilecek geri kazanılmış malzemelerin satışında da sıkıntı yaşanmaması gerektiği için bu malzemeleri alacak işletmelerle de düzenli ve uzun vadeli ilişkiler kurulmalıdır. Görece küçük kurulu güce sahip GES sahipleri ile ilişkiler uzun vadeli olamayacağı için tekil işlem bazında olacaktır. Başta kamu kurumları, belediyeler ve büyük işletmeler olmak üzere, yüklü miktardaki FV atıkların satışa sunulduğu ihaleler de tesisin hedefinde olması gerektiği için birlikte bu ihalelere teklif sunulabilecek atık toplama ve işleme lisansına sahip firmalarla iş birliklerine açık olunması gereklidir.

Paydaşların geri dönüşüm süreçleri ve malzemelerin kalitesi ve niteliği hakkında bilgi sahibi olmaları iş fırsatlarını artıracağı için sürekli teknolojik bilgilendirmeler ve ihtiyaç oldukça teknik destek sağlanması bir diğer ilişki türüdür. Ayrıca mevcut teknolojilerin iyileştirilmesi ve yeni teknolojiler geliştirilmesi için Ar-Ge kurum ve kuruluşları ile yenilikçilik odaklı çalışmalar yürütülmelidir. Müşteri ilişkilerinin eksiksiz olması için bütün sayılan etkileşimlere paralel olarak sivil toplum faaliyetlerine katılım sağlanması işletmeye büyük katkı sağlayacaktır.

11.2.8 Maliyet Yapısı

Değer önerisi başlığı altında da belirtildiği gibi, güneş paneli geri dönüşümü FV atıklara çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşımla çözüm sunarken, aynı zamanda ekonomik değer de yaratır. Ancak bütün bu işlemlerin maliyeti olması kaçınılmazdır. Bu maliyetler, tesisin kurulum aşamasından işletme sürecine kadar uzanan geniş bir yelpazede değerlendirilmelidir.

ÖT FV panellerin geri dönüşümü yapacak bir tesisin, özel bir işletme olması, dolayısıyla finansal olarak sürdürülebilirliğini sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, işletmenin giderleri ve gelirleri dikkatle belirlenmelidir. Bir işletmenin maliyet yapısı başlıklı yapısı belirlenirken genel yaklaşım maliyetleri ilk yatırım ve işletme maliyetleri olarak ayırmaktır. Aşağıdaki alt bölümlerde her bir maliyet grubu için ayrıntılar ortaya konulmaktadır.

Başlangıç Yatırımı Maliyetleri

FV panel geri dönüşüm işletmesinin temelini oluşturan kurulum maliyetleri, tesisin hayata geçirilmesi için yapılan ilk ve genellikle en büyük yatırımları kapsar. Bu maliyetler, arazinin temininden, binaların inşaatına, özel ekipmanın satın alınmasından, yasal izinlerin alınmasına kadar geniş bir yelpazede harcamaları içerir. Bu harcamaların doğru planlanması ve yönetilmesi, işletmenin uzun vadeli mali performansı ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahip olup işletmenin finansal planlamasının doğru yapılmasını sağlayacak ve kuruluş aşamasında karşılaşılacak olası finansal riskleri azaltacaktır. Kurulum maliyetlerinin iyi gerçekçi olarak belirlenmesi, optimize edilmesi ve etkin yönetimi, işletmenin uzun vadede karlılığına ve sürdürülebilirliğine büyük katkı sağlayacağı için özen gösterilmesi gereken bir konudur.

Arazi ve Bina Maliyetleri: FV panel geri dönüşüm işletmesinin en temel gereksinimi işlerin yürütüleceği tesistir. Arazi ve bina maliyetleri, tesisin konumuna, büyüklüğüne ve yapım kalitesine göre değişkenlik gösterir. İşletme kendine ait bir bina faaliyet gösterecekse, Temel Kaynaklar bölümünde belirtilen niteliklere uygun bir arazi temini ve uygun bir bina inşa edilmesi hesaba katılmalıdır.

Geri Dönüşüm Makine ve Ekipman Maliyetleri: İş modeli sunulan işletmenin asıl faaliyeti FV panel geri dönüşümü olduğu için bu işlemleri yapacak makine parkı diğer önemli ilk yatırım kalemidir. Geri dönüşüm makine ve ekipman maliyetleri, seçilen geri dönüşüm teknolojilerine, otomasyon seviyesine ve tesisin işlem kapasitesine bağlı olarak değişir. Parçalama, kırma, ayırma, kimyasal işlem ve taşıma gibi süreçlerde kullanılan makinelerin maliyeti yaklaşık 400 ila 500 bin ABD Doları aralığında olması öngörülmektedir. Geri Dönüşüm Ekipmanı dışında Diğer Makine, Teçhizat ve Ekipman alt başlığında tanımlanan ekipmanın maliyeti ana yatırım maliyetinin yaklaşık olarak %25 ila %30'u oranında olacağı varsayılabilir. Planlama yapılırken, gümrük, nakliye, sigorta ve kurulum işlemlerinin nasıl yapılacağı da planlanarak, gerekiyorsa bunlar için yapılacak harcamalar da maliyetlere dâhil edilmelidir.

Fikri Mülkiyetler: FV panel geri dönüşümü yapılırken patent ile korunmakta olan teknikler kullanılacaksa bunlara ait fikrî mülkiyet hak maliyetlerinin ilk yatırım kapsamında değerlendirilmesi gerekecektir. Ayrıca, başta bilgi teknolojisi ve yönetim yazılımları olmak üzere, tüm lisansların ve diğer fikrî mülkiyet haklarının satın alınması veya kiralanması önemlidir.

Lisans ve İzinler: Lisans ve izin maliyetleri, tesisin yasal ve çevresel düzenlemelere uygun olarak faaliyet gösterebilmesi için gereken resmî belgelerin alınması için yapılan harcamaları kapsamaktadır. Bu konu ile ilgili olarak T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile faaliyet gösterilen bölgenin yerel yönetiminin ilgili mevzuatı ve uygulamaları dikkate alınmalıdır. Eğer tesisin tasarımı, planlanması, teknik çizimlerinin hazırlanması, proje yönetim danışmanlığı ve diğer uzmanlık hizmetleri için dış hizmet alımı yapılacaksa, proje ve mühendislik maliyetleri dâhil edilmelidir.

İlk Kuruluş Maliyetleri: İşletmenin ilk açılışı aşamasında, ilk kuruluşlar ilgili birtakım giderler ortaya çıkacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Yüklü sayıda personel işe alım, eğitim harcamaları, kurumsal kimlik geliştirme, pazarlama materyallerinin hazırlanması, resmî yükümlüklerden kaynaklanan muhasebe defter ve mühürleri, iş sağlığı ve güvenliği gibi başlangıç aşamasında yapılan harcamalara örnek oluşturmaktadır.

İşletme Maliyetleri

Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinin operasyonel maliyetleri, tesisin günlük faaliyetlerini sürdürebilmesi için yapılan sürekli harcamaları kapsar ve işletmenin maliyet yapısının önemli bir parçasını oluşturur. Bu maliyetler, tesisin verimli ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için dikkatlice yönetilmeli ve optimize edilmelidir.

ÖT FV Panel Tedarik Maliyeti: İşletmenin işleyeceği girdi ÖT FV paneller olup gelir getirici malzemeler üretmenin temel koşulu sürekli FV atık akışıdır. Konuya FV atık sahipleri açısından bakıldığında ise, ellerinde hurda değeri olan ama envanterden çıkarılması gereken bir ekipman mevcuttur. FV atık sahipleri, diğer EEE için olduğu gibi, bu atıkları en uygun maliyetle devretmek isteyecektir. Hatta mevcut uygulamada EEE için genellikle ihaleler yapılmaktadır. Bu süreçte, panelden geri kazanılacak malzemenin piyasa değeri dikkate alınarak, hurda FV panele değer biçilmelidir. İlk kurulum aşamasında, hele ki bu konuda bir ulusal piyasa da oluşmamışken bu iş zor olsa da girişimcinin EEE atık pazarındaki fiyatlardan ve akademik çalışmalar ile raporlarda ifade alan FV panel atık bedellerini dikkate alarak bir rakam belirlemesi mümkündür. Bu sayede işletmenin kapasite hedefi olan yıllık 5.000 ton atık için bu maliyet öngörüsü bir gider kalemi olarak hesaplamaya katılmalıdır.

Personel Maliyetleri: Personel maliyetleri, operasyonel maliyetler içinde önemli bir yer tutar; çalışanların maaşları, ücretleri, sosyal güvenlik ödemeleri ve diğer personel giderleri, bu maliyetin büyük bir kısmını oluşturur. Çalışanlar arasından şüphesiz en önemli grup teknik personeldir. İşletmenin temel faaliyet alanı olan geri dönüşüm konusunda bilgi sahibi çevre, makine, kimya ve elektrik ve benzeri dallardan mühendislere, teknisyenlere, mavi yakalı personele ve lojistik işleri yerine getirecek lisanslı sürücülere ihtiyacı olacaktır. Üzerinde önemli durulduğu üzere bu işletmenin yeni teknolojilere uyum sağlaması ve yeni geri dönüşüm teknolojileri geliştirilmesi için sürekli Ar-Ge yapması gerektiği için nitelikli Ar-Ge personeli çalıştırması da bir zorunluluktur. Ayrıca, satış ve pazarlama, muhasebe ve finans, insan kaynakları, satın alma, kalite kontrol ve yasal uyum, sekretarya, temizlik ve tesis güvenliği işlerini yerine getirecek yeterli sayıda personele ihtiyaç vardır. Bunların yanı sıra işletmede genel idareyi sağlayacak ve yasal sorumlulukları üstlenecek müdür ve benzeri üst düzey yöneticiye de gereksinim olacaktır. Önerilen ölçekteki bir işletmenin ihtiyaçlarını asgari ölçüde karşılamak için 2 deneyimli mühendis, 1 deneyimli teknisyen, 3 işçi, 2 idarî personel, 1 iş geliştirme uzmanı, 1 yönetici, 1 temizlik personeli ve 2 tesis güvenlik personeli istihdam etmesi gerekecektir.

Enerji ve Su: Enerji maliyetleri, geri dönüşüm süreçlerinin enerji yoğun olması nedeniyle dikkat edilmesi gereken bir gider kalemidir; tesisin elektrik, doğal gaz, yakıt ve diğer enerji ihtiyaçları için yapılan harcamalar, operasyonel maliyetlerin önemli bir bölümünü teşkil eder. Önerilen geri dönüşüm makineleri elektrik ile çalışacak olup kurulu gücü yaklaşık 500 kW düzeyinde olacağı öngörülmektedir. İşletmenin yıllık çalışma saati 2.000 saat olarak varsayılırsa, yıllık 1 milyon kilovat-saat sadece geri dönüşüm ekipmanı tüketecektir. Mekanik geri dönüşüm kırma ve ufalama makinelerinin su soğutma sistemi saatte 15 m^3 10^oC sıcaklığında su gerektirmektedir. İstenen sıcaklıkta su üretmenin enerji maliyeti ile su gereksinimi de maliyette dikkate alınmalıdır. Bütün bunlara tesisin diğer enerji gereksinimlerinin maliyetleri de eklenmelidir.

Sarf Malzemeleri: Mekanik ayrıştırma kullanılacağı için ekipmanın bakım ve onarımı için gerekli filtreler, yağlar ve diğer sarf malzemelerine yapılacak harcamaları dikkate almak gerekir. Bakım ve onarım maliyetleri, tesis ekipmanlarının düzenli bakımı, onarımı, yedek parça temini ve olası arızaların giderilmesi için yapılan harcamaları içerir ve yıllık maliyeti yaklaşık olarak ilk yatırım maliyetinin %3'ü olarak kabul edilmesi uygun olacaktır.

Lojistik ve Taşıma Maliyetleri: Lojistik ve taşıma maliyetleri, geri dönüşüm sürecinden kaynaklanan atıkların toplanması, gerekiyorsa tesis dışında ön işlemden geçirilmesi taşınması, depolanması ve bertaraf edilmesi

için yapılan harcamaları kapsar ve bu maliyetlerin yasal düzenlemelere uygun ve çevre dostu bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. FV atıklar çok değişik mesafelerden gelebileceği için maliyet yapısı içinde kestirilmesi en zor unsurlardan biridir. Tesisin konumunun GES kurulumlarının çok yapıldığı illere olan mesafesinin ortalaması alınarak bir tahmin yapılabilir, hatta illerin mesafesi ile ilde kurulu GES kapasitesinin ağırlıklı ortalaması alınarak daha hassas bir değer de elde edilebilir. Tesis kapasitesinin 5.000 ton olduğu varsayımına göre ortalama mesafe üzerinden yıllık toplam FV panel nakliye maliyeti çıkabilir. GES tesisinden panellerin sökülmesi, GES sahibi firma ile yapılacak anlaşma kapsamında ücretlendirilmesi gereken bir hizmet olup iş modeline girmesine gerek yoktur. Depolama maliyeti arazi ve bina maliyeti kapsamında düşünülebilir.

Kalite Kontrol: Operasyonel maliyetler arasında kalite kontrol maliyetlerine de yer verilmelidir. Geri kazanılan malzemelerin kalite kontrolü, testleri, laboratuvar giderleri ve sertifikasyon işlemleri için yapılan harcamalar, müşteri memnuniyetini sağlamak ve pazarlama gücünü artırmak için önemlidir.

Ar-Ge: Ar-Ge faaliyetleri de firmanın kaynak ayırması gereken bir maliyet kalemidir. Buradaki maliyetlerin ulusal ve uluslararası Ar-Ge destek mekanizmaları ile desteklenmesi firma için önemli bir maliyet düşürücü yaklaşım olacaktır. Ayrıca, Ar-Ge alet ve ekipmanına yatırım yapmak yerine yereldeki üniversiteler ile iş birlikleri kurulmalı, ulusal ölçekte de yetkin Ar-Ge kuruluşlarının araştırma altyapılarından ve hizmetlerinden yararlanılmalıdır.

Kurumsal İletişim ve Etkinlik Maliyetleri: Kurumsal iletişim maliyetleri, geri kazanılan malzemelerin pazarda değer bulması, müşteri tabanının genişletilmesi, marka bilinirliğinin artırılması ve çeşitli ortaklarla olan ilişkilerin sürdürülmesi için yapılan harcamaları kapsar. Bu maliyetler, işletmenin sürdürülebilirliği ve karlılığı için önemli bir yatırım niteliğindedir. Yeni gelişmekte olan bir sektörde öncü işletme konumuna sahip olunacağı için pazarlama ve tanıtım maliyetleri enerji sektörü içinde ve genel kamuoyu önünde FV panellerin geri dönüşümünün önemini ve gerekliliğini tanıtmak amacıyla yapılmalıdır. Reklam kampanyaları, broşürler, web sitesi geliştirme, sosyal medya yönetimi gibi çeşitli araçlar marka bilinirliğinin artırmak için kullanılmalıdır. Ayrıca, fuar ve etkinliklere katılım maliyetleri de satış ve pazarlama bütçesinin bir parçasıdır.

Bu bölümde açıklanan maliyetlerin eksiksiz olmadığı, detaylara inildikçe başka maliyetlerin de çıkabileceği dikkate alınarak bir giderler tablosu oluşturulması önerilmektedir. Bu tabloda kurulum maliyetleri ilk yatırım dönemine, operasyonel maliyetleri ise işletme dönemindeki periyodlara dağıtılmalıdır. Periyodlar en azından bir yıl, mümkünse daha kısa süreli olarak belirlenerek işletme maliyetleri bir periyod için hesaplanmalıdır. Kaynaklara ilişkin yüksek maliyetler yıllara yayılacaksa, işletme maliyetleri gibi yatırım maliyetleri de periyodlara bölünmelidir. Enflasyon, yeniden değerleme oranı, iş gücü ücretleri, döviz kurları gibi temel ekonomi göstergelere ilişkin öngörüler yapılmalıdır. İşlenen malzeme miktarının artması ile nakliye maliyetlerinin de artması ya da yıllar içinde makineler giderek daha fazla yıpranacağı için bakım onarım maliyetlerinin artması gibi etkenler de dikkate alınmalıdır. Bu verilere göre maliyetlerin zaman içindeki değişimi hesaplanmalı böylece yıllara bazında olarak maliyet gelişimi hesaplanmalıdır.

11.2.9 Gelir Kaynakları

İşletmeler için gelir, varlıklarını sürdürebilme, büyüme ve hedeflerine ulaşma yolunda hayati bir öneme sahiptir. Gelirler, işletmenin ilk yatırım maliyetlerinin amorti edilmesini, operasyonel faaliyetlerin finanse edilmesini, personel maaşlarının ödemesini, yeni yatırımlar yapılmasını, Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesini, borçların geri ödenmesini ve nihayetinde girişimcinin diğer seçenekler yerine bu işletmeye sermaye aktararak aldığı riski karşılayacak kâr beklentisinin karşılanmasını temin eder.

İş modelinde "Gelir Kaynakları" bölümünün doğru ve eksiksiz bir şekilde doldurulması ise işletmenin finansal sürdürülebilirliğini sağlamak ve uzun vadeli başarıya ulaşmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu bölüm, işletmenin hangi faaliyetlerden ve nasıl gelir elde edeceğini açıkça ortaya koyar, böylece işletme stratejilerinin ve bütçe planlamasının temelini oluşturur. Gelir kaynakları bölümünün doğru doldurulması, işletmenin pazar potansiyelini doğru değerlendirmesine, rekabet avantajı elde etmesine ve müşteri ihtiyaçlarına en uygun şekilde cevap vermesine olanak tanır. Ayrıca, işletmenin yatırımcılar ve finans kuruluşları nezdinde güvenilirliğini artırır ve kredi ve devlet hibeleri gibi finansman kaynaklarına daha kolay ulaşmasını sağlar. Bir işletme gelir kaynaklarını ne kadar çeşitlendirirse, riskleri o ölçüde azalır ve dalgalanan pazar koşullarına karşı daha dirençli konuma ulaşır.

ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesinin gelir kaynaklarını değerlendirildiğinde çok sayıda gelir imkânı ortaya çıkmaktadır. Bu gelirlerin bir kısmı işletmenin ana faaliyeti olan FV atık yönetimi ve geri dönüştürme faaliyetlerinden elde edilirken, bir kısım gelir de doğrudan ana faaliyet alanı olmasa da gelir elde edilebilecek diğer faaliyetler sonucu gerçekleşebilir. Dolayısıyla ilk grup gelirleri Ana Faaliyet Gelirleri, Yan Faaliyet Gelirleri olarak gruplandırmak mümkündür. İşletmenin gelirler tablosu oluşturulurken, Ana Faaliyet Gelirleri olabildiğince hassas belirlenmesi gereklidir. İkincil gelirlerin miktarını önceden kestirmek kolay olmayacağı için bu kaynaklardan elde edilecek kazanımların gelir modeline daha konservatif yaklaşımla katılması, gelir-gider planlamasındaki dengelerin bozulması riskini azaltacaktır.

Ana Faaliyet Gelirleri

Geri Dönüştürülmüş Malzeme Satışı: Güneş paneli geri dönüşüm işletmesinin en önemli gelir kaynaklarından biri, geri kazanılmış malzemelerin satışıdır. Bu gelir akışı, ömrünü tamamlamış güneş panellerinden elde edilen değerli ham maddelerin çeşitli sektörlere yeniden kazandırılmasıyla oluşur.

Geri dönüşüm sürecinde ayrıştırılan ve işlenen cam, alüminyum, bakır, silisyum, gümüş ve diğer değerli metaller, uygun kalite ve saflık standartlarına getirildikten sonra, farklı endüstrilerde ham madde olarak kullanılmak üzere satışa sunulur. Bu malzemelerin satış fiyatları, pazar talebine, arz koşullarına, malzemenin saflığına, kalitesine ve güncel piyasa fiyatlarına bağlı olarak değişir. Panelden elde edilen silisyum ve gümüş gibi değerli metallerin ekonomik getiri potansiyeli yüksektir. Nitekim güneş enerjisi sektörü de bu şekilde gelişmiştir. Alüminyum, cam ve bakır gibi daha yaygın malzemeler daha düşük birim fiyatlarından satılabilir. Bu noktada küresel emtia fiyatlarında yaşanan hareketlilikler işletmenin gelirlerinin önceden tahmin edilmesini güçleştiren bir etkendir. Bununla baş etmek için işletmenin gelir ve giderlerini iyi modelleyerek, çeşitli piyasa senaryoları çalıştırarak belirlemesi gerekir. Aslında bu tür çevresel maliyetleri düşürmeye yönelik iş kollarının henüz gelişme aşamasındayken piyasa oynaklıklara direnci düşük olacağı için devletler finansal sürdürülebilirliği sağlayacak teşviklerle sektörü olgunlaşıncaya kadar ayakta tutarlar.

Tipik bir k-Si FV panelin malzeme bileşen oranları dikkate alınarak, yıllık 5.000 ton FV panelden ne kadar toz formunda atık elde edilebileceği ve her bir çıktı malzeme grubunun güncel piyasa değerleri tespit edilerek, firmanın malzeme satışından elde edebileceği gelirler hesaplanabilir. Örneğin, Gönen ve Kaplanoğlu'nun 2019 yılında Türkiye koşullarına göre yaptıkları bir hesaplama sonucunda, alüminyum çerçeve için 8,78 ABD Doları, panel içindeki diğer alüminyum için 0,26 ABD Doları, bakır için 0,17 ABD Doları ve gümüş için 5,45 ABD Doları olmak üzere tek bir panelden toplam 14,66 ABD Doları ekonomik getiri beklentisi hesaplamışlardır (Gönen & Kaplanoğlu, 2019). ABD kaynaklı bir başka çalışmada ise geri kazanılan malzeme değerinin panel başına 10,61 ABD Doları olduğu hesaplanmıştır (Tao vd., 2020). Konya Karapınar'da 1 GW kurulu güce sahip GES vaka analizi yapılarak 2050 yılına gelindiğinde santralden çıkan atık panellerden elde edilebilecek silisyum malzemesinin 600.000 ABD Doları, gümüşün 255.000 ABD Doları, camın ise 210.000 ABD Doları değerinde olacağı hesaplanmıştır (Artaş, 2023). Kuzey Kıbrıs'ın Serhatköy bölgesinde 2011 yılında kurulan 1,275 MW_P'lık güneş santralinin incelendiği bir başka çalışmada

ise uygun bir geri dönüşüm yöntemi ile 63.476 kg cam, 16.807 kg alüminyum, 9.230 kg çelik, 6.640 kg EVA, 807 kg silisyum, ve 746 kg bakırın geri dönüştürülebileceği ifade edilmekte ancak bu atıktan elde edilebilecek gümüş miktarı hakkında bir bilgi verilmemektedir (Cellatoğlu Baytın, 2024).

Atık Yönetimi Hizmetleri: Ömrünü tamamlamış panellerin bulunduğu GES'lerdeki paneller eğer atık niteliğindeyse santral sahibi açısından kurtulması gereken bir yük durumundadır. Ancak pek çok işletmenin finansal modelinde olduğu gibi GES sahibi de modüllerin bir hurda değeri olmasını bekler. Dolayısıyla bu değeri elde etmesi için hizmete ihtiyacı vardır. Aslında genel olarak geri dönüşüm yapan firmalar bu koşullar altında kendileri için uygun gelir modellerini kurgulamalı, ömrünü tamamlamış santralin sökülmesi hizmet bedeli ile FV atığın hurda değeri arasında bir denge oluşturarak santral sahibi ile anlaşmaya varmalıdır. Aynı durum FV panel ve paneli oluşturan bileşenleri üreten firmaların üretim sürecindeki atıkları ve üretim hatasından kaynaklı fireleri için de geçerlidir.

Geri Dönüştürme Ücretleri: ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesi, FV atık sahipleri ve EEE alanında faaliyet gösteren diğer atık yönetim şirketleri için sadece geri dönüştürme hizmeti veren bir rol üstlenebilir. Bu modelde elinde FV atıkları olan firmalar ve kurumlar panelleri tesise teslim ederek daha sonra ortaya çıkan malzemenin satışını kendileri yapabilirler. Bu yöntem işletme açısından panel atığı temin etme ve daha sonra malzemelerin satılması süreçlerinden muaf olarak sadece teknolojik olarak atıkların geri dönüştürülmesi faaliyetlerine odaklanması anlamına gelecektir. İşletmenin kapsamlı bir pazar araştırması yaparak, bu hizmetten yararlanmak isteyecek firmalardan kaynaklanacak atık miktarı potansiyelini kestirmesi ve bunların hizmet alımından faydalanmayı cazip bulacakları hizmet bedeli seviyesini belirlemesi gerekmektedir. Elbette bu bedelin işletmenin yatırım ve geri dönüştürme giderlerini karşılayarak finansal sürdürülebilirliğini de karşılayacak düzeyde olması da zorunluluktur.

Teşvikler ve Sübvansiyonlar: Dünyanın bazı ülkelerinde sektörünün kalkınması için FV panellerin geri dönüşümünün çeşitli finansal mekanizmalarla teşvik edildiği bilinmektedir (bakınız: Bölüm 9 ve 10). Esasen bu teşvikler nakit hibeler, vergi indirimleri, düşük faizli krediler veya geri ödemesiz destekler şeklinde çeşitlendirilebilir. Hâlihazırda ülkemizde FV panellere özel bir finansal teşvik mekanizması bulunmamaktadır Bununla birlikte, girişimcilik, sanayi, bölgesel kalkınma, bilimsel ve teknolojik Ar-Ge, yeşil dönüşüm ve çevre alanlarında faaliyet gösteren işletmelere yönelik çok sayıda uygun koşullu krediler, yatırım teşvikleri ve hibelerden faydalanma imkânı vardır. Bunlardan yararlanılması işletmenin gelir yönüne katkıda bulunacaktır. Ayrıca sunulmakta olan gümrük vergisi, sigorta primi muafiyeti, vergi indirimleri gibi birtakım malî avantajlar da işletmenin gider tarafında önemli düşüşler sağlama fırsatı vermektedir. Bu destek modellerinden faydalanmak için işletmenin birtakım koşulları yerine getiriyor olması gerekir. İşletmenin gelir modeli oluşturulurken, uygun olunan teşvik ve sübvansiyon imkânları iyi değerlendirilerek hesaplamalara dâhil edilmelidir.

Yan Faaliyet Gelirleri

Sertifikasyon ve Denetim Hizmetleri: İşletme, diğer geri dönüşüm şirketlerine, denetim kuruluşlarına ve düzenleyici ve denetleyici kamu kurumlarına yönelik olarak, geri dönüşüm süreçlerinin ve geri kazanılan malzemelerin kalitesini değerlendirmek için sertifikasyon ve denetim hizmetleri sunabilir. FV panel geri dönüşümü konusunda öncü rol üstlenmesi beklenen işletme, bu sayede sadece yan gelir elde etmekle kalmaz aynı zamanda sektör genelinde operasyonların güvenilirliğini, şeffaflığını ve kalite standartlarını güvence alarak sektörel gelişime de katkı sağlamış olur. İşletme, sertifikasyon ve denetim hizmetleri aracılığıyla, sektördeki liderliğini pekiştirebilir, FV geri dönüşümünün önemi konusundaki farkındalığı artırabilir ve müşteri güvenini temin edebilir.

Teknoloji Lisanslama ve Transferi: İş modeli kapsamında işletmenin Ar-Ge faaliyetlerinin önemi özellikle vurgulanmaktadır. FV panel geri dönüşüm işi ile ilgilenen bir işletme sadece standart bir panel türünün geri dönüşümünün yapılması ile kendini sınırlarsa, sektördeki gelişmelere ayak uyduramayarak rekabette geri düşeceği için Ar-Ge faaliyetlerini kesintisiz sürdürmelidir. Yapılacak olan Ar-Ge çalışmaları sonucunda ortaya çıkarılacak yenilikçi FV panel geri dönüşüm teknikleri ve süreçleri patent ve faydalı model gibi mekanizmalarla koruma altına alınarak, dünya genelinde bu buluşlardan faydalanmak isteyen firmalara lisanslama ya da transferi yolu ile gelir elde edilebilir. Ayrıca firma geliştirdiği teknikleri uygulayan makineler üretip satarak da gelir elde edebilir.

Danışmanlık ve Eğitim Hizmetleri: İşletme zaman içerisinde ÖT FV panellerin geri dönüştürülmesi ile ilgili dikkate değer bir bilgi ve deneyim sahibi olacaktır. Bu konuda uzmanlığa ihtiyaç duyacak firmalar, güneş paneli ve bileşenleri geri dönüşümü, atık yönetimi, sürdürülebilirlik uygulamaları ve çevre mevzuatı konularında danışmanlık ve eğitim hizmetleri talep edebilirler. Hizmetler FV panel üreticileri, başta FV hücre olmak üzere panel üretiminde kullanılan bileşenleri üreten firmalar, GES sahipleri, kendisini bu alanda geliştirmek isteyen profesyoneller ve kapasite geliştirmek isteyen kurum ve kuruluşlar olabilir. İşletmenin danışmanlık ve eğitim hizmetleri vermesi hem güneş enerjisi hem de geri dönüşüm sektörünün gelişimine katkıda bulunacaktır.

Karbon Kredileri: GES'lerin karbon ayak izi tamamen sıfır düzeyinde değildir. Başta polisilisyum ve hücre üretimi olmak üzere panel üretim sürecinin belli bir karbon emisyonu vardır. Doğru uygulanmış bir geri dönüşüm işlemi, panelin ömür boyu çevresel maliyetini düşürdüğü için karbon ayak izinde düşüş olacaktır. Bu nedenle FV panellerin geri dönüşümünü yaparak karbon emisyonunda düşüş sağlanacaktır. Emisyondaki azaltım karbon ticareti mekanizmaları çerçevesinde sertifikalandırılarak gelir oluşturması mümkündür. Henüz ülkemizde karbon ticareti yeterince yaygınlaşmamış olmakla birlikte, bu piyasa oluşup zamanla derinleşmeye başladığında bu gibi gelir kaynakları da işletme için ilave destekler sağlayacaktır. Bu aşamada bu gelirlerin ölçeğini hesaplamak kolay olmayacağı için ilk etapta gelir modeline dâhil edilmeyebilir.

11.2.10 Sosyal ve Çevresel Maliyetler

FV panel geri dönüşüm işletmelerinin sosyal maliyetleri, işletme faaliyetlerinin olumsuz etkilerini içerir ve bu etkilerin dikkatlice yönetilmesi gerekir. Öncelikle, iş güvenliği ve çalışan sağlığı riskleri, geri dönüşüm süreçlerinde çalışanların potansiyel tehlikelere maruz kalmasıyla ortaya çıkar ve bu riskler uygun önlemlerle minimize edilmelidir. Tesisin kurulduğu bölgedeki yerel topluluk etkisi, gürültü, trafik gibi olumsuz sonuçlar yaratabilir ve bu etkilerin toplumun yaşam kalitesi üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirilmelidir. İşletmenin toplumsal kabul görmesi, toplumun geri dönüşüm faaliyetlerine duyduğu güven ve desteğe bağlıdır, bu nedenle şeffaflık ve iletişim çok önemlidir. Son olarak, atık yönetimi süreçlerinde etik kaygılar yaşanabilir ve bu kaygılar adil uygulamaların benimsenmesi ve şeffaflığın sağlanması ile giderilmelidir.

Sosyal maliyetlerin yanı sıra çevresel maliyetleri dikkate alınmalıdır. Bunlar işletmenin yürüteceği faaliyetlerin doğa ve ekosistem üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini kapsar ve bu etkilerin en aza indirilmesi için çaba gösterilmesi gerekmektedir. Öncelikle, lojistik etkileri, atık toplama ve taşıma süreçlerinde kullanılan araçların yakıt tüketimi ve neden olduğu emisyonlar gibi çevresel sonuçlar doğurması kaçınılmazdır. İlk etapta sadece mekanik ayrıştırma yöntemleri kullanılan bir geri dönüşüm konsepti belirlenmiş olsa da zaman içinde faaliyet alanlarının genişlemesi durumunda FV panel geri dönüşüm işletmesinin enerji, su ve kimyasal kullanımı ortaya çıkabilecektir. Bu tür kullanımlar kaynak tüketimi ve kirlilik riskleri yaratabilir; bu nedenle, kaynakların verimli kullanılması ve çevre dostu alternatiflerin tercih edilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Geri dönüşüm süreçlerinden sonra başka şekilde değerlendirilemeyecek bir miktar atığın kalması kaçınılmaz olabileceğin için bu atıkların uygun şekilde yönetilmesi ve bertaraf edilmesi, çevreyi koruma açısından büyük önem taşımaktadır. Son olarak, tesis operasyonlarından kaynaklanabilecek hava ve toprak kirliliği ile emisyonlar, çevresel sağlık sorunlarına yol açabilir ve bu sorunları azaltmak için gelişmiş teknolojiler ve önleyici tedbirler kullanılmalıdır.

11.2.11 Sosyal ve Çevresel Fayda

ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesinin sosyal ve çevresel kazanımları hem toplumsal kalkınmaya hem de gezegenin sağlığına olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu tür bir işletme istihdam yaratacaktır. Ayrıca ihtiyaç duyulacak nitelikli teknik personel nedeniyle beceri ve eğitim fırsatları oluşturacaktır. Genel olarak yerel halkın iş gücü piyasasına katılımını ve gelişimini destekleme ihtimali bulunmaktadır. Tesisin varlığı yerel ekonomik büyümeye ivme kazandırarak, bölgedeki refah seviyesini yükseltecektir. Geri dönüşüm süreçlerinin benimsenmesiyle, döngüsel ekonomiye katılım sağlanarak, kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanınması önemli bir çevresel kazanım alanı oluşturacaktır. Tüm bu olumlu etkiler, sonuç olarak toplumsal refah artışına katkıda bulunur. Geri dönüşüm işletmelerinin önemli bir getirisi geri dönüşüm oranlarının artması yoluyla atık miktarının azaltılmasıdır. Ayrıca, doğal kaynakların korunması ve enerji tasarrufu sağlanarak, gezegenimizin sürdürülebilirliği için önemli bir adım atılması sağlanacaktır. Son olarak, bu tür işletmeler sürdürülebilir tüketim ve döngüsel ekonomi katkısını teşvik ederek, gelecek nesiller için daha yaşanabilir bir dünya yaratılmasına yardımcı olmaktadır.

11.3 İş Modeli Ekonomik Değerlendirmesi

11.3.1 Varsayımlar

Hesaplamalar ABD Doları üzerinden yapılmış olup indirgeme oranı 2024 yılı ABD enflasyon oranı (%3,2) olarak öngörülmüştür.

Tesisin Niğde ili Bor ilçesi sınırlarındaki Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas OSB içerisinde 5.000 m² alan üzerine toplam 2.400 m² kapalı alana sahip tek katlı binada hizmet vermesi planlanmıştır.

Tesiste kullanılacak ekipmanın ekonomik ömrü 10 yıl olarak alınmıştır. Tesiste yenileme yatırımı öngörülmemiştir. Ekipmanın emre amadelik oranı %98 olarak varsayılmıştır. Geri dönüşüm hattının kapasitesi saatte 1500 kg panel işleme olarak alınarak yıllık 3.057.600 kg panel işlenecek olup bu değer yaklaşık olarak 152.800 FV panele karşılık gelmektedir. Hesaplamada tipik bir fotovoltaik panelin ortalama 400 vat gücünde, 20 kg ağırlığında ve 1000*1950*40 mm ölçülerinde olduğu kabulü yapılmıştır.

Hurda değer olarak arazi bedelinin tamamı, inşaat bedelinin %50'si, makine ve ekipmanın %20'si olarak kabul edilmiştir.

İşletmenin geri dönüşüm hizmeti veren tek işletme olmayacağı, ancak öncü konumu ve etkin tanıtımı ile güneş enerjisi sektöründe bilinirlik sağlayacağı öngörülmektedir. Kapasite kullanım oranı (KKO) %100 olmadığı müddetçe, Türkiye'de mevcut FV panel atıklarının %75'ini elde ederek işleyebileceği varsayılmaktadır.

FV panel atıklarının temini için, panelin hurda değerinin %50'si kadar bir bedelin işletme tarafından ödeneceği varsayımı yapılmıştır.

FV panel geri dönüşüm süreçlerine özel herhangi bir devlet desteği olmadığı varsayılmıştır. Tesis için yatırım teşvik belgesi alınması yolu ile yatırım dönemi KDV'ler yükümlülüklerinden muaf olacağı kabulü yapılmıştır.

Hesaplamalar ABD Doları (USD) üzerinden yapılmış olup Türk Lirasından yapılan dönüştürmelerde Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'nın 14.02.2025 günü ilan edilen 1 USD karşılığı 36,1060 kur esas alınmıştır.

11.3.2 FV Panel Atık Akışı

ÖT FV panel atıklarının miktarı işletme için büyük önem taşıyan bir etkendir. Türkiye koşulları için 2030, 2040 ve 2050 yılları için FV atık miktarlarını veren bir çalışmadan hareketle hazırlanan 2026 – 2035 aralığına ilişkin atık önerisi Tablo 21'te sunulmuştur (Birtürk & Çeliktaş, 2023). İşletmenin yıllar bazında işleyeceği atık miktarı ve KKO verileri de tabloda yer almaktadır.

Tablo 21: Atık Akış Öngörüsü

Açıklama / Yıllar	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Mevcut Atık Miktarı (ton)	2.000	4.359	6.718	9.077	11.436	13.795	16.154	20.872	27.740	39.700
İşlenen Atık Miktarı (ton)	1.500	3.058	3.058	3.058	3.058	3.058	3.058	3.058	3.058	3.058
KKO	49%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

11.3.3 FV Panel Atık Değeri

Tipik bir fotovoltaik paneli oluşturan bileşenlerin miktarları için Tablo 8 esas alınmıştır. Malzemelerin hurda değerlerinin belirlenmesinde hurda malzeme ticareti yapan çeşitli işletmelerin web sayfalarında yer alan veriler kullanılmıştır. Gümüş fiyatı için uluslararası emtia piyasalarındaki güncel değer esas alınmıştır. Buna göre tipik bir FV panelin günümüzdeki değeri 563,63 TL ya da 15,61 USD olarak elde edilmektedir.

Tablo 22: FV Panel Atık Değeri

Malzeme	Oran	Miktar (kg)	Birim Fiyatı (TL/kg)	Birim Fiyatı (USD/kg)	Panel Başı Değer (TL)	Panel Başı Değer (USD)
Alüminyum	%16,03	490.133,28	48,00	1,33	153,89	4,26
Cam	%67	2.048.592,00	3,97	0,11	53,22	1,47
Plastik	%11	336.336,00	7,00	0,19	15,40	0,43
Silisyum	%4,4	134.534,40	97,49	2,70	85,79	2,38
Gümüş	%0,03	917,28	36.178,21	1.002,00	217,07	6,01
Bakır	%0,8	24.460,80	160,00	4,43	25,60	0,71
Kalay	%0,1	3.057,60	628,00	17,39	12,56	0,35
Kurşun	%0,01	305,76	53,00	1,47	0,11	0,00
				Toplam	563,63	15,61

11.3.4 Sabit Yatırım Tutarı

Niğde'de yapılacak ÖT FV panel geri dönüşüm işletmesi için sabit yatırım kalemleri arazi ve binalar, geri dönüşüm ekipmanları, diğer makine, teçhizat ve ekipman, lisans ve izinler ve işletme ilk kuruluş maliyetleri olarak belirlenmiştir.

Arazi maliyeti belirlenirken, OSB'den alınan arazi m² fiyatı esas alınmıştır. İnşaat maliyeti için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2024 yılı için yayımlanan yapı yaklaşık birim maliyetlerine ilişkin tebliğde "Sanayi yapıları (Tek katlı, bodrum ve asma katı da olabilen)" kategorisinin bulunduğu C grubu II. sınıf yapılara ilişkin olarak belirlenen 7.750 TL/m² birim fiyatına 2025 yılı yeniden değerleme oranında (%43,93) artış uygulanması yolu ile elde edilmiştir.

Tesiste yer alacak ekipman fiyatları bu alanda makine üretimi yapan yurt dışı firmalarından temin edilmiştir.

Tesis için esas alınan yıllık kapasiteyi işlemeye uygun yatırımın maliyet tablosu Tablo 23 ile sunulmuştur. Tabloda toplam bedeli verilen hattın bileşenleri 11.2.4 bölümünde listelenen makinelerden oluşmakta olup bedel ekipmanın fabrikaya kadar teslim maliyetlerini içermektedir. İşletmenin toplam sabit yatırım tutarı 56.352.865 TL karşılığı 1.560.762 USD olacağı öngörülmektedir.

Tablo 23: Tahmini Sabit Yatırım Maliyeti Tablosu

Gider Kalemi	Yaklaşık Bedel (TL)	Yaklaşık Bedel ($)
Arazi ve Bina	**30.270.980**	**838.392**
Arazi	3.500.000	96.937
Bina	26.770.980	741.455
Geri Dönüşüm Ekipmanı	**18.103.548**	**501.400**
Çift Kat Cam Fotovoltaik Güneş Paneli Öğütme ve Ayırma Hattı	18.103.548	501.400
2 Adet Çift Şaftlı Parçalayıcı		
1 Adet Dikey Çekiçli Kırıcı		
1 Adet Bıçaklı Kırıcı		
1 Adet Turbo Değirmeni		
3 Adet Titreşimli Elek		
1 Adet Manyetik Ayırıcı		
1 Adet Eddy (Anafor) Akımı Ayırıcı		
1 Adet Hava Ayırıcı		
1 Adet Elektrostatik Ayırıcı		
5 Adet Konveyör Bandı		
2 Adet Vida Konveyör		
4 Adet Siklon Ayırıcı		
4 Adet Toz Toplayıcı		
Soğutma Sistemi		
Kontrol Sistemi		
Tesis İşletmeye Alma Giderleri	**905.177**	**25.070**
Diğer Makine, Teçhizat, Ekipman	**6.073.159**	**168.204**
Forklift	902.650	25.000
Transpalet	45.133	1.250
Taşıma Kasaları	21.664	600
Muhtelif Alet ve Avadanlık	122.760	3.400
2 Adet Baskül Kantar	12.637	350
Test ve Analiz Ekipmanları	270.795	7.500
Spektrometre	306.901	8.500
Kamyon/Kamyonet	4.000.000	110.785
İş Güvenliği Ekipmanları	40.619	1.125
Ofis Mobilyaları	120.000	3.324
Ofis Ekipmanı	230.000	6.370
Lisans ve İzinler	**1.000.000**	**27.696**
Toplam Sabit Yatırım Tutarı	**56.352.865**	**1.560.762**

Tesisin hurda değerleri varsayılan oranlar esas alınarak 534.625 USD olarak belirlenmiştir. Sabit yatırımların KDV'ye esas olan bileşenlerinin 694.674 USD matrahı üzerinden hesaplanacak yatırım dönemi KDV tutarı 138.935 USD olup yatırım teşvik belgesi sayesinde bu giderden muaf olunacaktır.

11.3.5 Yıllık İşletme Giderleri

İşletmenin yıllık giderleri personel ücretleri ve yasal yükümlülükler, enerji ve su tüketimi, ekipmanın bakım onarım ve sarf giderleri, FV atıkların lojistik ve taşıma maliyetleri, Ar-Ge harcamaları, kurumsal iletişim ve etkinlik giderlerinden oluşmaktadır. Ayrıca %3 oranında beklenmeyen giderler bütçesi eklenmiştir. Yıllık işletme giderleri Tablo 24'de gösterildiği üzere 794.986 USD olarak bulunmuştur.

Tablo 24: Yıllık İşletme Giderleri

Gider Unsurları	Miktar	Katsayı / Birim Fiyat	Yaklaşık Tutar (TL)	Yaklaşık Tutar ($)
Personel			**10.298.178**	**285.221**
Mühendis	2	2,50	1.560.330	43.215
Teknisyen	2	1,75	1.092.231	30.251
İşçi	4	1,25	1.560.330	43.215
İdari Personel	2	1,50	936.198	25.929
İş Geliştirme Uzmanı	1	2,00	624.132	17.286
Temizlik ve Hizmet Personeli	1	1,00	312.066	8.643
Güvenlik Personeli	2	1,00	624.132	17.286
İdari Yönetici	1	3,50	1.092.231	30.251
Sürücü + Yükleme Elemanı	4	1,25	1.560.330	43.215
Personel Maliyet Genel Masrafları			936.198	25.929
Enerji ve Su			**6.351.869**	**175.923**
Elektrik (kWh)	1.112.086	5,27	5.858.189	162.250
Su (m3)	29.040	17,00	493.680	13.673
Bakım Onarım ve Sarf Giderleri	**1,00**	**15%**	**8.452.930**	**234.114**
Lojistik ve Taşıma Giderleri			**1.390.612**	**38.515**
Ar-Ge			**750.000**	**20.772**
Kurumsal İletişim ve Etkinlik Giderleri			**624.132**	**17.286**
Beklenmeyen Giderler (%3)			**836.032**	**23.155**
Yıllık İşletme Giderleri			**28.703.752**	**794.986**

Tablo 24'de personel giderleri hesaplamasında yer alan katsayı değeri ilgili personel kategorisine verilecek aylık ücretin asgari ücretin kaç katı olduğunu göstermektedir. Elektrik ve su tüketimi hattın yıllık tüketimi esas alınarak hesaplanmıştır. Bakım işletme ve sarf maliyetleri sabit yatırımın %15 esas alınarak elde edilmiştir. Lojistik ve taşıma giderleri için, sabit yatırımlar kapsamında yer alan kamyonun yakıt ve bakım onarım maliyeti Tablo 25'de verilen bilgiler doğrultusunda hesaplanmıştır. Ar-Ge giderleri hesaplanırken yıllık 3 proje için TÜBİTAK'ın 1507 – TÜBİTAK KOBİ Ar-Ge Başlangıç Destek Programı firmanın öz kaynak olarak ayrılması gereken tutar esas alınmıştır. İşletmenin tanıtılması için yapılacak giderlerin bu amaçla çalışan personelin yıllık maliyeti kadar olacağı varsayılmıştır.

Tablo 25: Lojistik ve Taşıma Maliyeti Hesabı

Kamyon Hacimsel Kapasite (m3)	86
1 Panel Hacim (m3)	0,08
Kamyon Tam Yük Panel Kapasitesi (adet)	1.103,00
1 Panel Ağırlığı (kg)	20
Kamyonun Tam Yüklü Ağırlığı (kg)	22.060
Yıllık Hat Kapasitesi (kg)	3.057.600
Kapasiteye Ulaşmak için Sefer Sayısı	139
Her Seferde Ortalama Menzil (km)	450
Toplam Yol (km)	62.550
Akaryakıt Ücreti (TL/lt)	48,08
Ortalama Yakıt Tüketimi (lt/100 km)	40,00
Akaryakıt Maliyeti (TL)	1.202.961,60
Araç Bakım ve İşletme (TL)	187.650,00
Toplam Taşıma Maliyeti (TL)	**1.390.611,60**

İşletmenin yıllık giderleri Tablo 26'de yer alan Sabit ve Değişken sütunlarındaki oranlar doğrultusunda ayrıştırılmış, böylece işletmenin yıllık sabit işletme gideri 273.086 USD, yıllık değişken işletme gideri 442.309 USD olarak belirlenmiştir.

Tablo 26: Sabit ve Değişken Yıllık İşletme Giderleri

Gider Unsurları	Sabit (%)	Değişken (%)	Toplam Sabit Tutar (TL)	Toplam Sabit Tutar (USD)	Toplam Değişken Tutar (TL)	Toplam Değişken Tutar (USD)
Personel	0,34	0,66	3.501.381	96.975	6.796.797	188.246
Enerji ve Su	0,10	0,90	635.187	17.592	5.716.682	158.331
Bakım Onarım ve Sarf Giderleri	0,75	0,25	6.339.697	175.586	2.113.232	58.529
Lojistik ve Taşıma Giderleri	0,05	0,95	69.531	1.926	1.321.081	36.589
Ar-Ge Giderleri	0,75	0,25	562.500	15.579	187.500	5.193
Kurumsal İletişim ve Etkinlik Giderleri	0,75	0,25	468.099	12.965	156.033	4.322
Beklenmeyen Giderler (%3)	0,50	0,50	418.016	11.577	418.016	11.577
Yıllık İşletme Giderleri			11.994.410	332.200	16.709.342	462.786

11.3.6 İşletme Sermayesi

İşletmenin faaliyetleri sürdürmek için toplam 45 günlük işletme sermayesine gereksinim duyacağı varsayımına dayanarak, yapılan işletme sermayesi hesabı Tablo 27 ile sunulmaktadır. Başlangıç işletme sermayesi işletmenin ilk yılındaki KKO oranına göre hesaplanmış olup toplam işletme sermayesi ile aradaki farkın faaliyete geçişin ikinci yılında tamamlanması öngörülmüştür.

Tablo 27: İşletme Sermayesi

İşletme Sermayesi Unsurları	Tutar (TL)	Tutar (USD)
Sabit Yıllık Giderler	11.994.410	332.200
Değişken Yıllık Giderler	16.709.342	462.786
Sabit İşletme Sermayesi İhtiyacı	1.499.301	41.525
Değişken İşletme Sermayesi İhtiyacı	2.088.668	57.848
Toplam İşletme Sermayesi İhtiyacı	3.587.969	99.373
Başlangıç İşletme Sermayesi	2.523.962	69.904

11.3.7 Amortisman Hesabı

Yapılan sabit yatırımlara karşılık yıllık olarak ayrılacak amortisman tutarları Tablo 28 ile sunulmaktadır.

Tablo 28: Yıllık Amortisman Tutarları

Yıllar	Arazi ve Bina (40 yıl - %2,5)	Makine Teçhizat (10 yıl - %10)	Kamyon ve Forklift (5 yıl - %20)	Yıllık Amortisman (TL)	Yıllık Amortisman (USD)
Amortismana Esas Yatırım Tutarı	30.270.980	18.103.548	4.902.650		
2026	756.775	1.810.355	980.530	3.547.659	98.257
2027	756.775	1.810.355	980.530	3.547.659	98.257
2028	756.775	1.810.355	980.530	3.547.659	98.257
2029	756.775	1.810.355	980.530	3.547.659	98.257
2030	756.775	1.810.355	980.530	3.547.659	98.257
2031	756.775	1.810.355	0	2.567.129	71.100
2032	756.775	1.810.355	0	2.567.129	71.100
2033	756.775	1.810.355	0	2.567.129	71.100
2034	756.775	1.810.355	0	2.567.129	71.100
2035	756.775	1.810.355	0	2.567.129	71.100

11.3.8 Proforma Gelir Gider Hesabı

İşletmenin proforma gelir gider hesabı yapılırken tesisin %100 KKO'da bir başka deyişle kurulu kapasite düzeyinde gerçekleşecek sabit ve değişken maliyetleri ile atık panel temin giderleri ve geri dönüştürülmüş malzemenin satış gelirleri Tablo 29'de yer almaktadır. Yıllık gelir Tablo 22'te hesaplanan panel başına geri kazanılmış malzeme fiyatları ile yıllık atık panel işleme kapasitesinin çarpımı ile elde edilmiştir.

Tablo 29: Kurulu Kapasite için Yıllık Gelir ve Giderler

Yıllık Sabit İşletme Gideri (A)	332.200
Yıllık Değişken İşletme Gideri (B)	462.786
Yıllık FV Atık Gideri (C)	1.193.264
Yıllık İşletme Gelirleri (D)	2.386.528

Kurulu kapasite değerlerine ve ilgili yıldaki KKO'ya göre elde edilen yıllık gelirlerin ve giderlerin hesabı Tablo 30'te yapılmış olup sonuçta yıllar bazında net proje kârı/zararı hesaplanmıştır.

Tablo 30: Proforma Gelirler ve Giderler

Açıklama/Yıllar	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1. İşletme Giderleri (A + KKO x (B + C))	1.144.626	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249
2. Amortismanlar	98.257	98.257	98.257	98.257	98.257	71.100	71.100	71.100	71.100	71.100
3. Satılan Hizmet Maliyeti (1+2)	1.242.883	2.086.506	2.086.506	2.086.506	2.086.506	2.059.349	2.059.349	2.059.349	2.059.349	2.059.349
4. Proje Gelirleri (KKO x D)	1.170.785	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528
5. Vergi Öncesi Brüt Kâr/Zarar (4-3)	-72.098	300.021	300.021	300.021	300.021	327.178	327.178	327.178	327.178	327.178
6. Geçmiş Yıllar Zarar Mahsubu	0	-72.098	0	0	0	0	0	0	0	0
7. Kurumlar Vergisi Matrahı (5-6)	-72.098	227.923	300.021	300.021	300.021	327.178	327.178	327.178	327.178	327.178
8. Kurumlar Vergisi (7*%25)	0	56.981	75.005	75.005	75.005	81.795	81.795	81.795	81.795	81.795
9. Net Proje Kârı/Zararı (7-8)	-72.098	170.942	225.016	225.016	225.016	245.384	245.384	245.384	245.384	245.384

11.3.9 Nakit Akımı

İşletmenin ilk 10 yıldaki nakit girişleri ve çıkışları Tablo 31'te gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 31: Yıllık Nakit Giriş Çıkış Dengesi

AÇIKLAMA/YILLAR	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
A. Nakit Girişleri	1.170.785	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528
Proje Gelirleri	1.170.785	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528
Devlet Teşviği	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B. Nakit Çıkışları	1.144.626	2.045.230	2.063.255	2.063.255	2.063.255	2.070.044	2.070.044	2.070.044	2.070.044	2.070.044
İşletme Dönemi Yatırımları	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
İşletme Giderleri	1.144.626	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249
Kurumlar Vergisi	0	56.981	75.005	75.005	75.005	81.795	81.795	81.795	81.795	81.795
Temettü	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C. Nakit Farkı	**26.159**	**341.297**	**323.273**	**323.273**	**323.273**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**316.484**

Yıllar bazında elde edilen nakit farklarından hareketle projenin ilgili yıllar müddetince net nakit akımı (NNA), bu değerler kullanılarak da projenin indirgenmiş NNA değerleri hesaplanmıştır (Tablo 32).

Tablo 32: İşletmenin Net Nakit Akımı

AÇIKLAMA/YILLAR	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
A.Yatırım Faaliyetlerinden Doğan Nakit Akımı	-1.560.762	-69.904	-29.469	0	0	0	0	0	0	0	534.625
1. Sabit Yatırım (-)	1.560.762										
2. İşletme Sermayesi Yatırımı (-)		69.904	29.469	0							
3. Tesisin Hurda Değeri (+)											534.625
B.İşletme Faaliyetlerinden Doğan Nakit Akımı		26.159	341.297	323.273	323.273	323.273	316.484	316.484	316.484	316.484	316.484
1. Proje Gelirleri (+)		1.170.785	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528	2.386.528
2. İ.K.D.V. (+)											
3. İşletme Giderleri (-)		1.144.626	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249	1.988.249
4. Vergi Ödemeleri (-)		0	56.981	75.005	75.005	75.005	81.795	81.795	81.795	81.795	81.795
C.Finansmandan Doğan Nakit Akımı		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1. Faiz Ödemeleri (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Temettü Ödemeleri (-)											
Projenin Net Nakit Akımı (NNA) (A+B+C)	**-1.560.762**	**-43.746**	**311.828**	**323.273**	**323.273**	**323.273**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**316.484**	**851.108**
Projenin İndirgenmiş Net Nakit Akımı (Hurda Değer Dahil)	**-1.560.762**	**-42.389**	**292.790**	**294.124**	**285.004**	**276.166**	**261.983**	**253.859**	**245.988**	**238.360**	**621.138**
Projenin İndirgenmiş Net Nakit Akımı (Hurda Değer Hariç)	**-1.560.762**	**-42.389**	**292.790**	**294.124**	**285.004**	**276.166**	**261.983**	**253.859**	**245.988**	**238.360**	**230.969**

11.3.10 Finansal Göstergeler

11.3.10.1 Net Bugünkü Değer ve İç Karlılık Oranı

Buna göre işletmenin hurda değeri dahil net bugünkü değeri (NBD) tutarı 1.166.261 USD, hurda değeri katılmadan NBD değeri 776.092 USD olarak belirlenmiştir. Projenin iç karlılık oranı ise hurda değeri dahil edildiğinde %9,55, hurda değeri hariç %7,41 olarak elde edilmektedir (Tablo 33).

Tablo 33: Net Bugünkü Değer ve İç Karlılık Oranı

	Hurda Değer Dahil	Hurda Değer Hariç
Projenin Net Bugünkü Değeri (USD)	1.166.261	776.092
Projenin İç Karlılık Oranı (%)	9,55%	7,41%

11.3.10.2 Başa Baş Noktası Kapasite Kullanım Oranı

İşletmenin başa baş noktası değişken giderlerin KKO ile çarpımı ile sabit giderlerin toplamının gelirlerin KKO ile çarpımına eşitlendiği noktadır. Dolayısıyla, yıllık sabit giderlerin gelirler ile yıllık değişken giderler arasındaki farka bölümü, işletmenin başa baş noktasına ulaşması için gerçekleşmesi gereken kapasite kullanım oranını vermektedir. Bu hesaplamaya göre işletmenin kapasite kullanım oranı %45,48 olarak hesaplanmıştır.

$$BBN\ KKO = 332.200 / (2.386.528 - 1.656.050) = \%45,48$$

11.3.10.3 Geri Dönüş Süresi

Yatırımın geri dönüş süresi, projenin indirgenmiş net nakit akımlarının proje başlangıcında yapılan sabit yatırım maliyetlerini ne kadar süre sonra karşılayacağını belirlemeye yönelik bir hesaplamadır. Önerilen işletme için bu süre 6 yıl 3 ay olarak belirlenmektedir.

11.3.10.4 Fayda/Maliyet Oranı

Fayda/maliyet oranı, yatırımın indirgenmiş gelirlerinin indirgenmiş giderlerine bölünmesi ile elde edilen bir göstergedir. Tablo 32'te yer alan Proje Gelirleri ve İşletme Giderleri satırlarındaki değerlerin indirgenmiş karşılıkları sırasıyla 27.241.146 USD ve 22.869.623 USD olarak hesaplanmıştır. Buna göre projenin Fayda/Maliyet Oranı 1,19 olarak belirlenmiştir. Bir yatırımın Fayda/Maliyet Oranı değerinin 1'in üzerinde olması projenin kârlı olacağını gösterse de elde edilen oranın 1'e yakın olması kâr marjının düşük olduğu ve yatırımın riskli olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret eder.

11.3.10.5 Katma Değer Etkisi

Yatırımın katma değer etkisi, ortaya çıkan finansal değerlerin yanı sıra yaratılan istihdamı da hesaba katan, bir başka deyişle yatırımın ekonomiye ve topluma sağladığı ek değeri gösteren bir finansal göstergedir. Önerilen iş modelinin katma değer etkisi Tablo 34'de gösterildiği şekilde hesaplanmış olup indirgenmiş net

katma değerlerin toplamı 4.545.935 USD, brüt katma değerlerin toplamı ise 5.269.951 USD olarak belirlenmiştir. İşletmenin risklerinin iyi yönetilmesi koşulu ile elde edilen değerler kabul edilir düzeydedir.

Tablo 34: Katma Değer Etkisi

Bileşenler / Yıllar	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Vergi Öncesi Kâr	-72.098	300.021	300.021	300.021	300.021	327.178	327.178	327.178	327.178	327.178
İşçilik	139.924	285.221	285.221	285.221	285.221	285.221	285.221	285.221	285.221	285.221
Net Katma Değer	67.826	585.242	585.242	585.242	585.242	612.399	612.399	612.399	612.399	612.399
Amortismanlar	98.257	98.257	98.257	98.257	98.257	71.100	71.100	71.100	71.100	71.100
Brüt Katma Değer	166.082	683.499	683.499	683.499	683.499	683.499	683.499	683.499	683.499	683.499
İndirgenmiş Net Katma Değer	65.723	549.511	532.472	515.961	499.962	506.940	491.221	475.989	461.230	446.928
İndirgenmiş Brüt Katma Değer	160.933	641.768	621.869	602.586	583.901	565.796	548.252	531.252	514.779	498.816

11.3.10.6 Finansal Analiz Özeti

Proje ile ilgili olarak hesaplanmış olan finansal göstergeler ile özetlenmektedir.

Tablo 35: Finansal Analiz Özeti

Finansal Değerlendirme Özeti *(Parasal değerler USD cinsindedir)*	
Panel İşleme Kapasitesi (adet)	152.880
Öngörülen KKO	%65;%100;+
Gerekli Minimum Arazi Büyüklüğü (m2)	5.000
Sabit Yatırım Tutarı	1.560.762
İşletme Sermayesi İhtiyacı	69.904
Toplam Yatırım Tutarı	1.630.666
Finansman İhtiyacı (KDV Dahil)	1.769.601
Finansman İhtiyacı (KDV Hariç)	1.630.666
İndirgeme Oranı	3,20
NBD (Hurda Değer Dahil)	1.166.261
NBD (Hurda Değer Hariç)	776.092
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Dahil)	9,55%
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Hariç)	7,41%
Geri Dönüş Süresi	6 yıl 3 ay
Başabaş Noktadaki KKO	45,48%
Fayda/Maliyet Oranı	1,19
Katma Değer Etkisi (Net)	4.545.935
Katma Değer Etkisi (Brüt)	5.269.951
Yatırımın Gerçekleştirilme Süresi (ay)	12
Kurulu Kapasitede İstihdam Sayısı (kişi)	19

11.3.11 Duyarlılık Analizi

11.3.11.1 FV Panel Atık Bedeli Duyarlılık Analizi

İşletme için en önemli girdilerden biri FV atıkların hangi bedelden temin edileceğidir. FV atık bedelinin çeşitli değerlerine göre finansal göstergelerin ne şekilde değişeceği Tablo 36 ile sunulmuştur.

Tablo 36: Atık Alım Katsayısı Duyarlılık Analizi

Atık Alım Katsayısı Duyarlılık Analizi

%98 Emre amade; %75 Pazar Payı; Devlet Teşviksiz)

	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
NBD (Hurda Değer Dahil)	8.281.790	6.858.793	5.435.795	4.012.797	2.589.800	1.166.261	-257.616	-2.058.263	-3.955.593	-5.852.923	-7.750.253
NBD (Hurda Değer Hariç)	7.891.622	6.468.624	5.045.627	3.622.629	2.199.631	776.092	-647.785	-2.448.431	-4.345.761	-6.243.091	-8.140.421
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Dahil)	53,14%	45,36%	37,28%	28,78%	19,67%	9,55%	-2,35%	-22,95%	x	x	x
İç Kârlılık Oranı (Hurda Değer Hariç)	52,97%	45,11%	36,89%	28,15%	18,57%	7,41%	-7,77%	x	x	x	x
Geri Dönüş Süresi	3 yıl	3 yıl	3 yıl	4 yıl	5 yıl	7 yıl	> 10 yıl	> 10 yıl	> 10 yıl	> 10 yıl	> 10 yıl
Başabaş Noktadaki KKO	17,27%	19,71%	22,97%	27,50%	34,28%	45,48%	67,54%	131,21%	2287,91%	-148,22%	-71,78%
Fayda/Maliyet Oranı	2,94	2,27	1,85	1,56	1,35	1,19	1,06	0,96	0,88	0,81	0,75
Katma Değer Etkisi (Net)	14.032.585	12.135.255	10.237.925	8.340.595	6.443.265	4.545.935	2.648.604	751.274	-1.146.056	-3.043.386	-4.940.716
Katma Değer Etkisi (Brüt)	14.756.601	12.859.271	10.961.941	9.064.611	7.167.281	5.269.951	3.372.620	1.475.290	-422.040	-2.319.370	-4.216.700

11.3.11.2 FV Panel Atık Bedeli Duyarlılık Analizi

Türkiye'de henüz FV panellerin geri dönüşümünü teşvik edecek bir mekanizma bulunmamaktadır. Bununla birlikte, geri dönüştürülen her panel başına işletmenin 1 ile 5 USD arasında değişen tutarda teşvik alması durumunda, bunun projenin Fayda/Maliyet oranına etkisi Tablo 37'da sunulmaktadır.

Tablo 37: Atık Alım Katsayısı – Devlet Teşviği Duyarlılık Analizi

Atık Alım Katsayısı - Devlet Teşviği Duyarlılık Analizi

(%98 Emre amade; %75 Pazar Payı)

	Atık Alım Katsayısı (%)										
Devlet Teşviki (USD/panel)	**0%**	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**	**70%**	**80%**	**90%**	**100%**
1	3,12	2,42	1,97	1,66	1,44	1,27	1,13	1,02	0,93	0,86	0,79
2	3,31	2,56	2,09	1,76	1,52	1,34	1,20	1,08	0,99	0,91	0,84
3	3,50	2,71	2,21	1,86	1,61	1,42	1,27	1,15	1,05	0,96	0,89
4	3,69	2,85	2,32	1,96	1,70	1,49	1,34	1,21	1,10	1,01	0,94
5	3,88	3,00	2,44	2,06	1,78	1,57	1,40	1,27	1,16	1,06	0,98

11.4 İş Modeli Risk Değerlendirmesi

Önerilen işletme modelinin finansal göstergelerinden de anlaşılacağı üzere, FV panel geri dönüşüm sektöründe sürdürülebilir bir işletme kurulması, titizlikle hazırlanmış bir iş modelinin paralelinde, potansiyel risklerin önceden tespit edilmesini, bu risklerin gerçekleşme olasılıkları iyi hesaplanmasını ve gerçekleştiklerinde işletme için yol açacakları etkilerinin derinlemesine değerlendirilmesini gerektirmektedir. Risk yönetim yaklaşımı, iş modelinin hayata geçirilmesi sürecinde gelişmekte olan sorun alanlarına erken tespit edilerek çözümlerin zamanında uygulanmasını sağlar. Geri dönüşüm sektörünün doğası gereği, teknolojik yeniliklerin sürekli devam ettiği, ekonomik dalgalanmaların sık görüldüğü, yasal düzenlemelerin sürekli değiştiği, rekabetin yoğun olduğu ve sürdürülebilirlik taleplerinin artış gösterdiği dinamik bir ortamda faaliyet göstermektedir. Bu nedenle, risk yönetimi, işletmenin gelecekteki zorluklara karşı dayanıklılığını artırmak, fırsatları değerlendirmek ve belirsizliklerle başa çıkabilmek için hayati öneme sahiptir. İşletmenin sürdürülebilirliği ve başarısı için riskleri sadece bir engel olarak değil, aynı zamanda gelişim ve iyileştirme fırsatları olarak da görmek gerekmektedir. Raporun bu bölümünde önerilen iş modelinin riskleri ve bunlara ilişkin önlemler ve B planları ortaya konulmaktadır.

11.4.1 Risk Tanımlama

Risk tanımlama adımında FV Panel Geri Dönüşüm iş modelinin risk alanları şu şekilde belirlenmiştir:

Teknolojik Riskler:

Teknolojik riskler, geri dönüşüm sürecinde kullanılan ekipman ve teknolojilerin etkinliği, güvenilirliği ve uzun ömürlülüğü ile ilgilidir. Bu risk alanı, geri dönüştürülecek FV modüllerde sürekli gelişen teknolojiler ve yeni geri dönüşüm yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla, işletmenin mevcut sistemlerinin eskimesi veya yetersiz kalması olasılığını içerir. Ayrıca, kullanılan ekipmanlarda arıza veya beklenmedik performans düşüşleri yaşanması, süreçlerdeki verimsizlik ve seçilen teknolojinin planlanan malzeme geri kazanım oranlarına ulaşamaması gibi teknik sorunları da kapsar. Örneğin FV panel üretimi ile ilgili çalışan firma ve araştırma kurumlarının son dönemde üzerinde yoğun olarak çalıştığı bir konu panellerde kullanılan gümüş miktarının azaltılması, hatta tamamen başka malzeme ile değiştirilmesine yöneliktir. Mevcut panellerin malzeme reçeteleri baz alınarak yapılacak geleceğe dönük projeksiyonlar, bu alandaki gelişmelerle olumsuz yönde değişikliklere yol açabilir. İşletmenin bu tür risklere karşı hazırlıklı olmak için sürekli olarak teknolojik gelişmeleri takip etmesi, ekipmanları düzenli olarak bakım, onarım ve tadilattan geçirmesi ve daha farklı teknolojileri destekleyebilecek esnek sistemlere yatırım yapması zorunludur. Yeni teknolojilerin benimsenmesi sürecindeki zorluklar da teknolojik riskler kapsamında değerlendirilir.

- Teknoloji Eskimesi: Kullanılan geri dönüşüm teknolojilerinin hızla eskimesi ve daha verimli yöntemlerin ortaya çıkması
- Geri Kazanım Verimsizliği: Seçilen geri dönüşüm yöntemlerinin beklenilen verimlilikte malzeme geri kazanımı sağlamaması
- Ekipman Arızaları: Geri dönüşüm ekipmanlarının beklenmedik arızalar vermesi ve operasyonel kesintilere neden olması
- Yeni Teknoloji Uyum Zorluğu: Tesisin mevcut süreçlerinin yeni FV panel ve geri dönüşüm teknolojilerine uygun hale getirilmesinde olağan dışı büyük zorlukların yaşanması

Piyasa Riskleri:

Piyasa riskleri, geri dönüşüm sektöründeki rekabet, malzeme fiyatlarındaki dalgalanmalar, pazar talebinin belirsizliği ve atık tedarik zincirindeki sorunlar gibi faktörlerden kaynaklanır. Bu riskler, geri kazanılan malzemelerin pazar değerinin beklenenden düşük olması veya hızlı bir şekilde düşmesi, rekabetin artmasıyla pazar payının azalması, geri dönüştürülmüş malzemelere olan talebin yetersiz kalması gibi finansal kayıplara yol açabilir. Piyasa riskleri arasında en önemlisi FV panel atığı tedariğinde yaşanabilecek belirsizliklerdir. Bu nedenle işletme, müşteri ve tedarikçi ilişkilerini sürekli güçlü tutmalı, mümkünse bu alanda münhasır yetkiler elde etmeli, pazar araştırmaları yaparak riskleri öngörmeli ve çeşitli gelir kaynakları oluşturarak rekabet avantajı elde etmelidir.

- Malzeme Fiyat Dalgalanmaları: Geri kazanılan malzemelerin piyasa fiyatlarında öngörülemeyen düşüşlerin gelirleri azaltması
- Rekabetin Artması: Rakip firmaların ortaya çıkarak sektördeki rekabetin artması, FV atığa erişimin rekabete açılması ve pazar payının azalması
- Talep Yetersizliği: Geri dönüştürme süreçlerinden kazanılan malzemelerin hedef pazarlarda yeterince talep görmemesi
- Atık Akışı Belirsizliği: Yeterli miktarda ve sürekli olarak FV panel atığı temininde belirsizlik yaşanması

Yasal ve Düzenleyici Riskler:

Enerji piyasalarında yaşanan liberalleşme sürecine karşılık, devlet düzenleyici rolünü korumaktadır. Elektrik piyasalarında yaşanan gelişmelerin çoğunun üzerinde ilgili kamu kurumlarının aldıkları kararlar ve uygulamaların büyük etkisi vardır. Bu nedenle, geri dönüşüm faaliyetleri de hükümet politikaları, mevzuat değişiklikleri, lisans ve izin süreçlerindeki zorluklar, çevresel standartlara uyum ve olası yaptırımlardan doğrudan etkilenmeye açıktır. Geri dönüşüm sektörü, çevresel ve teknik standartlara uyumu gerektirdiğinden,

bu standartlara uymamak, işletmelerin faaliyetlerini durdurmasına veya önemli para cezaları ödemesine neden olabilir. Sektördeki yeni düzenlemelerin ve yasal değişikliklerin takibi ve bu düzenlemelere uyum için gerekli önlemlerin alınması, bu riskleri minimize etmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, atık yönetimi, geri kazanım ve lisans süreçlerinde yaşanabilecek olası aksaklıklar da bu kapsamda değerlendirilmelidir.

- Mevzuat Değişiklikleri: FV atık miktarlarını, atıkların içeriklerini ve geri dönüşüm faaliyetlerini etkileyen yasal düzenlemelerin değişmesi
- Lisans ve İzin Problemleri: Atık işleme ile ilgili alınması gereken lisans ve izinlerin alınması ve sürdürülmesinde zorluklar yaşanması
- Çevresel Mevzuata Uyum Güçlüğü: Geri dönüşüm süreçlerinin çevresel standartlara uyumunun sağlanmasında zorluklar çıkması

Finansal Riskler:

Finansal riskler, işletmenin sermaye yapısı, yatırım maliyetleri, operasyonel giderler ve finansman kaynaklarına erişimle ilgili sorunlardan kaynaklanır. Yüksek yatırım maliyetleri, geri dönüşüm tesisi kurmak için gerekli olan arazi, bina, makine ve ekipman gibi unsurların beklenenden yüksek maliyetli olması, finansal riskleri artırabilir. Operasyonel giderler ise, personel maliyetleri, enerji ve su giderleri, bakım ve onarım maliyetleri, pazarlama giderleri ve atık yönetimi giderleri gibi unsurları kapsar ve bunların beklenenden daha yüksek olması işletmenin karlılığını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, işletme öz sermaye, banka kredileri, devlet teşvikleri ve hibeleri ile finansal kiralama gibi finansman kaynaklarına ulaşmakta zorluk yaşayabilir, bu da yatırım ve büyüme planlarını sekteye uğratabilir.

- Yatırım Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış: Tesis kurulumu, ekipman alımı ve ilk işletme giderlerinin beklenenden yüksek çıkması
- İşletme Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış: Operasyonel giderlerin (enerji, su, personel, lojistik, vb.) beklenenden daha hızlı artması
- Finansman Kaynaklarına Erişim Zorluğu: Finansman kaynaklarına (öz sermaye, banka kredileri, teşvik, finansal kiralama) erişimde zorluklar yaşanması

Operasyonel Riskler:

Operasyonel riskler, tesisin günlük işleyişiyle ilgili beklenmedik sorunlardan kaynaklanır. Bunlar, tedarik zincirinde yaşanan aksaklıklar, lojistik ve taşıma süreçlerindeki zorluklar, tesis ekipmanlarında meydana gelen arızalar, bakım ve onarım çalışmalarında yaşanan gecikmeler ve iş güvenliği ile çalışan sağlığı sorunları gibi operasyonel süreçleri aksatabilecek olayları içerir. Örneğin görece yeni bir iş alanı olduğu için tedarik edilecek geri dönüşüm ekipmanlarının güvenilirliği bir risk faktörü olarak dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yangın, patlama, sel gibi doğal afetler gibi beklenmedik durumlar da tesisin operasyonlarını olumsuz etkileyebilir. Bu riskleri yönetmek için sağlam bir tedarik zinciri, verimli lojistik planlaması, düzenli ekipman bakımı, iş sağlığı ve güvenliği prosedürlerinin titizlikle uygulanması önemlidir.

- Tedarik Zinciri Sorunları: FV atık tedarikçilerinde veya ekipman alımında ortaya çıkabilecek sorunlar ve tedarik zincirindeki aksamalar
- Lojistik ve Taşıma Zorlukları: FV atıklarının taşınması sırasında lojistik sorunlar, yüksek maliyetler veya gecikmeler yaşanması
- Bakım ve Onarım Kesintileri: Tesis ekipmanlarında meydana gelebilecek arızalar ve bakım süreçlerinden dolayı operasyonlarda kesintiler oluşması
- Nitelikli Personel Temin Güçlüğü: İşletme ve Ar-Ge faaliyetlerini yönlendirecek nitelikli yetişmiş personelin tesisin kurulduğu bölgede bulunamaması
- İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı Sorunları: Çalışanların iş güvenliği ve sağlığı konusunda sorunlar yaşaması, yaralanma ve kaza risklerinin yüksek olması

Dışsal Riskler:

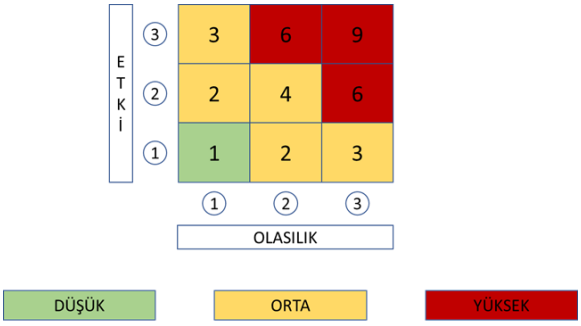
İşletmenin kontrolü dışındaki faktörlerden kaynaklanan riskler dışsal riskler olarak tanımlanır. Küresel ve ülke ekonomik koşulları ve sosyal olaylar, doğal afetler ve benzeri gelişmelerin makro ölçekteki etkilerinin

işletme üzerindeki sarsıcı sonuçlar doğurma ihtimali vardır. Makroekonomik dalgalanmalar, enflasyon, döviz kuru değişimleri ve faiz oranlarındaki artışlar, işletmenin finansal performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Doğal afetler, tesisin ve ekipmanların zarar görmesine veya operasyonların durmasına neden olabilir. Ayrıca küresel tedarik zincirlerindeki bozulmalar ve lojistik sorunları da bu kapsamda değerlendirilebilir. İşletme bu dışsal risklere doğrudan müdahale edemese de etkilerini azaltmak için ön alıcı planlama ve hazırlık yapmalıdır.

- Makroekonomik Dalgalanmalar: Enflasyon, döviz kurları, faiz oranları gibi makroekonomik faktörlerdeki olumsuz dalgalanmalar
- Doğal Afetler ve Beklenmedik Olaylar: Depremler, sel baskınları, yangınlar gibi doğal afetler veya beklenmedik olaylar nedeniyle tesisin zarar görmesi
- Küresel Tedarik Zinciri Problemleri: Uluslararası ticaret ve tedarik zincirinde yaşanan beklenmedik problemler ve kesintiler

11.4.2 Risk Analizi ve Değerlendirme

İlk bölümde belirlenen risklerin gerçekleşme olasılıkları ve gerçekleşmeleri durumunda işletme üzerinde yaratacakları etki değerlendirilerek, risk haritası oluşturulmaktadır. Değerlendirme yapılırken her bir riske 1 ila 3 arasında olasılık ve etki puanları verilmiştir. Daha sonra Şekil 8'de yer alan risk derecelendirme matrisine göre risk düzeylerin belirlenmiştir. Bu matrise göre olasılığı ve etkisi 1 olan bir risk düşük düzey, olasılık veya etkiden herhangi birinin 2 diğerinin 3 ya da ikisinin de 3 olduğu riskler yüksek düzey olarak belirlenmektedir. Bu şekilde risklerin kendi aralarında önceliklendirilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 8: Risk Derecelendirme Matrisi

Yukarıda açıklanan riskler analiz ve değerlendirme yöntemine göre FV panel geri dönüşüm iş modelinin riskleri Tablo 38 ile sunulmaktadır.

Tablo 38: FV Panel Geri Dönüşüm İş Modelinin Riskleri

Risk Alanı	Risk No	Risk	Olasılık	Etki	Risk Düzeyi
Teknolojik	1	Teknoloji Eskimesi	2	2	Orta
	2	Geri Kazanım Verimsizliği	3	3	Yüksek
	3	Ekipman Arızaları	1	2	Orta
	4	Yeni Teknoloji Uyum Zorluğu	1	2	Orta
Piyasa	5	Malzeme Fiyat Dalgalanmaları	3	3	Yüksek
	6	Rekabetin Artması	2	2	Orta
	7	Talep Yetersizliği	2	2	Orta
	8	Atık Akışı Belirsizliği	3	3	Yüksek
Yasal ve Düzenleyici	9	Mevzuat Değişiklikleri	1	2	Orta
	10	Lisans ve İzin Problemleri	1	2	Orta
	11	Çevresel Mevzuata Uyum Güçlüğü	2	3	Yüksek

Finansal	12	Yatırım Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	3	3	Yüksek
	13	İşletme Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	2	2	Orta
	14	Finansman Kaynaklarına Erişim Zorluğu	1	2	Orta
Operasyonel	15	Tedarik Zinciri Sorunları	2	2	Orta
	16	Lojistik ve Taşıma Zorlukları	1	1	Düşük
	17	Bakım ve Onarım Kesintileri	1	1	Düşük
	18	Nitelikli Personel Temin Güçlüğü	2	2	Orta
	19	İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı Sorunları	2	2	Orta
Dışsal	20	Makroekonomik Dalgalanmalar	2	2	Orta
	21	Doğal Afetler ve Beklenmedik Olaylar	1	3	Orta
	22	Küresel Tedarik Zinciri Problemler	1	2	Orta

11.4.3 Risk Önlemleri ve Alternatifler

İşletme için riskler tanımlandıktan sonraki adım bu risklerin gerçekleşmesini önlemek için alınması gereken önlemlerin belirlenmesidir. Önerilen işletme için riskler Tablo 39'te verilmektedir.

Tablo 39: Risk Önlemleri

Risk No	Risk Açıklaması	Önerilen Önlemler
1	Teknoloji Eskimesi	Sürekli teknoloji takibi, esnek sistemlere yatırım, Ar-Ge'ye yatırım
2	Geri Kazanım Verimsizliği	Süreç optimizasyonu, performans takibi, çoklu ayırma teknikleri, personel eğitimi
3	Ekipman Arızaları	Düzenli bakım, yedek parça stoğu, eğitilmiş teknik ekip, yedek ekipmanlar
4	Yeni Teknoloji Uyum Zorluğu	Detaylı fizibilite, pilot uygulamalar, uzman desteği, eğitim ve uyum planları
5	Malzeme Fiyat Dalgalanmaları	Pazar takibi, farklı müşteri segmentleri, vadeli sözleşmeler, farklı finansal araçlar
6	Rekabetin Artması	Değer önerisi güçlendirme, marka bilinirliği, müşteri ilişkileri, yenilikçilik
7	Pazar Talebi Eksikliği	Pazar araştırması, yeni pazarlar, sürdürülebilirlik vurgusu, etkili pazarlama
8	Atık Akışı Belirsizliği	Güvenilir tedarikçiler, çeşitli kaynaklar, geri dönüşüm ağları
9	Mevzuat Değişiklikleri	Mevzuat takibi, ilgili kurumlarla iletişim, uzman desteği, izin takibi, hukuk danışmanlığı
10	Lisans ve İzin Problemleri	Önceden başvuru, gerekli belgeler, süreç takibi, uzman danışmanlık, alternatif lokasyon değerlendirmesi
11	Çevresel Mevzuata Uyum Güçlüğü	Standartlara tam uyum, çevre dostu teknolojiler, atık ve emisyon kontrolü, düzenli denetim
12	Yatırım Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	Detaylı fizibilite, farklı teklifler, uygun maliyetli alternatifler, verimli kaynak kullanımı
13	İşletme Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	Gider takibi, enerji tasarrufu, su optimizasyonu, personel eğitimi, lojistik optimizasyonu
14	Finansman Kaynaklarına Erişim Zorluğu	Çeşitli kaynaklar, devlet teşvikleri, yatırımcılarla iş birliği, borçlanmayı kontrollü tutmak
15	Tedarik Zinciri Sorunları	Birden fazla tedarikçi, uzun vadeli tedarik zinciri, alternatif tedarikçiler, stok kontrol
16	Lojistik ve Taşıma Zorlukları	Lojistik optimizasyonu, uygun taşıma yöntemleri, lojistik firmalarıyla sözleşme, merkezi konum

17	Bakım ve Onarım Kesintileri	Düzenli bakım, yedek parça stoğu, eğitilmiş teknik ekip, acil durum planları
18	Nitelikli Personel Temin Güçlüğü	Personel ihtiyacı analizi, eğitim programları, staj olanakları, üniversite iş birlikleri
19	İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı Sorunları	İş güvenliği eğitimleri, gerekli ekipmanlar, risk değerlendirmesi, acil durum planları, sağlık kontrolleri
20	Makroekonomik Dalgalanmalar	Ekonomi takibi, finansal araçlar, giderleri kontrol altında tutmak, gelirleri çeşitlendirmek
21	Doğal Afetler ve Beklenmedik Olaylar	Tesisin uygun konum seçimi, risk değerlendirmesi, sigorta, acil durum planları, uygun bina tasarımları
22	Küresel Tedarik Zinciri Problemleri	Tedarik kaynaklarını çeşitlendirmek, uzun vadeli tedarikçi anlaşmaları, yedekli stok bulundurmak, alternatif lojistik rotaları

Sistematik bir risk yönetim yaklaşımı ile riskler belirlenerek önlemler alınsa da bazen bunların gerçekleşmesinin önün geçmek mümkün olmaz. Bu gibi durumlar için alternatif yollar ve çözüm planları düşünülmelidir. FV panel geri dönüşümü iş modelinde belirlenen riskler gerçekleşmesi durumunda izlenebilecek alternatifler Tablo 40'da listelenmiştir. Bazı riskler için önerilen önlemler geniş ifadelerle tanımlandığı için alternatif çözümlerinde de aynı ifade kullanılmıştır.

Tablo 40: Riskler İçin Alternatif Çözüm Önerileri

Risk No	Risk Açıklaması	Önerilen Alternatif Çözümler (B Planı)
1	Teknoloji Eskimesi	Sürekli teknoloji takibi, esnek sistemlere yatırım, Ar-Ge'ye yatırım
2	Geri Kazanım Verimsizliği	Süreç optimizasyonu, performans takibi, çoklu ayırma teknikleri, personel eğitimi
3	Ekipman Arızaları	Düzenli bakım, yedek parça stoğu, eğitilmiş teknik ekip, yedek ekipmanlar
4	Yeni Teknoloji Uyum Zorluğu	Detaylı fizibilite, pilot uygulamalar, uzman desteği, eğitim ve uyum planları
5	Malzeme Fiyat Dalgalanmaları	Pazar takibi, farklı müşteri segmentleri, vadeli sözleşmeler, farklı finansal araçlar
6	Rekabetin Artması	Değer önerisi güçlendirme, marka bilinirliği, müşteri ilişkileri, inovasyon
7	Pazar Talebi Eksikliği	Pazar araştırması, yeni pazarlar, sürdürülebilirlik vurgusu, etkili pazarlama
8	Atık Akışı Belirsizliği	Güvenilir tedarikçiler, çeşitli kaynaklar, geri dönüşüm ağları
9	Mevzuat Değişiklikleri	Mevzuat takibi, ilgili kurumlarla iletişim, uzman desteği, izin takibi, hukuk danışmanlığı
10	Lisans ve İzin Problemleri	Önceden başvuru, gerekli belgeler, süreç takibi, uzman danışmanlık, alternatif lokasyon değerlendirmesi
11	Çevresel Mevzuata Uyum Güçlüğü	Standartlara tam uyum, çevre dostu teknolojiler, atık ve emisyon kontrolü, düzenli denetim
12	Yatırım Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	Detaylı fizibilite, farklı teklifler, uygun maliyetli alternatifler, verimli kaynak kullanımı
13	İşletme Maliyetlerinde Beklenmeyen Artış	Gider takibi, enerji tasarrufu, su optimizasyonu, personel eğitimi, lojistik optimizasyonu
14	Finansman Kaynaklarına Erişim Zorluğu	Çeşitli kaynaklar, devlet teşvikleri, yatırımcılarla iş birliği, borçlanmayı kontrollü tutmak
15	Tedarik Zinciri Sorunları	Birden fazla tedarikçi, uzun vadeli tedarik zinciri, alternatif tedarikçiler, stok kontrol
16	Lojistik ve Taşıma Zorlukları	Lojistik optimizasyonu, uygun taşıma yöntemleri, lojistik firmalarıyla sözleşme, merkezi konum
17	Bakım ve Onarım Kesintileri	Düzenli bakım, yedek parça stoğu, eğitilmiş teknik ekip, acil durum planları
18	Nitelikli Personel Temin Güçlüğü	Personel ihtiyacı analizi, eğitim programları, staj olanakları, üniversite iş birlikleri
19	İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı Sorunları	İş güvenliği eğitimleri, gerekli ekipmanlar, risk değerlendirmesi, acil durum planları, sağlık kontrolleri
20	Makroekonomik Dalgalanmalar	Ekonomi takibi, finansal araçlar, giderleri kontrol altında tutmak, gelirleri çeşitlendirmek

21	Doğal Afetler ve Beklenmedik Olaylar	Tesisin uygun konum seçimi, risk değerlendirmesi, sigorta, acil durum planları, uygun bina tasarımları
22	Küresel Tedarik Zinciri Problemleri	Tedarik kaynaklarını çeşitlendirmek, uzun vadeli tedarikçi anlaşmaları, yedekli stok bulundurmak, alternatif lojistik rotaları

12 Sonuç

Küresel enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda güneş enerjisine olan ilgi her geçen gün artmakta, bu durum kullanım ömrünü tamamlayan FV panellerin giderek artan atık sorunuyla birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle Türkiye gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek ve GES yatırımları hızlı bir büyüme gösteren bir ülke için FV atık sorunu, çevresel ve ekonomik açıdan daha da önem kazanmaktadır. Bu rapor, FV panel geri dönüşümünün mevcut durumunu, zorluklarını ve potansiyellerini ayrıntılı olarak değerlendirerek bu alanda gelecekte yapılacak yatırımları değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan fizibilite çalışması sonucunda, bu amaca yönelik bir tesisin kurulmasının gerekliliğini ortaya çıkmaktadır.

Artan kurulu güneş enerjisi gücü, beraberinde önemli miktarda atık FV panelin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu atıkların geleneksel yöntemlerle bertaraf edilmesi hem çevresel riskleri artıracak hem de içerdikleri değerli malzemelerin ekonomik değerinin kaybolmasına yol açacaktır. Bu nedenle, etkin bir geri dönüşüm sistemi kurmak bir yandan çevre koruma hedeflerine ulaşmak diğer yandan da ekonomik kayıpları en aza indirmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Rapor, mevcut durumda kullanılan FV panel üretim teknikleri, yasal mevzuat, geri dönüşüm yöntemleri ve diğer ülkelerdeki uygulamaları göz önüne alarak, Türkiye'nin bu alanda bir an önce harekete geçmesi gerektiği sonucuna varmıştır.

Ancak bu çalışmada elde edilen bulgular ve literatür araştırması ışığında, Türkiye'de henüz ayrıntılı bir yatırım planlaması için erken olduğu da net olarak ortaya çıkmaktadır. Geri dönüşüm teknolojilerinin ve ekipmanlarının sürekli geliştiği ve piyasada henüz yeterince ticarileşmiş geri dönüşüm ekipmanı olmadığı göz önünde bulundurulduğunda, net ve kesin verilere sahip olmak büyük önem taşımaktadır. Diğer teknolojilere göre daha yaygın kullanıldığı için atıklarıyla en çok karşılaşılan k-Si panellerde bile geri dönüşüm yöntemlerinin henüz çok net olmaması ve her geçen gün farklı geri dönüşüm teknolojilerinin araştırılıyor olması, bu alanda yapılacak yatırımları gelişmelere ayak uydurabilecek esneklikte yapmayı zorunlu kılmaktadır. Bu esneklik için piyasa ve teknolojik gelişmelerin dikkatle izlenmesi ve elde edilecek yeni veriler ile birlikte yatırım planlamasına gidilmesi gerekmektedir. Rapor, bu nedenle, işletme ölçeğinin, geri dönüşüm yöntemlerinin, pazar hedeflerinin ve diğer faktörlerin somut olarak karar verilmeden önce, daha detaylı ve dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini tavsiye etmektedir.

FV panel geri dönüşümü konusundaki yatırımların sürdürülebilirliğinin sağlanmasının en önemli etmenlerinden biri, bu alandaki gelişmeleri destekleyecek yasal düzenleme ve teşvik mekanizmalarının mevcut olmasıdır. Mevcut atık yönetimi mevzuatı, FV panellere özgü gereksinimleri yeterince karşılamamakta ve geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırmaya yönelik özel teşvikler sunmamaktadır. Bu durum, geri dönüşüm sektörünün gelişimini yavaşlatmakta ve yatırımcıların bu alana yönelmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, yasal düzenlemelerin güncellenmesi, FV panellere özel geri dönüşüm standartlarının oluşturulması ve geri dönüşüm faaliyetlerini teşvik edecek mekanizmaların hayata geçirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, üretici sorumluluğunu esas alan ve atık toplama, geri kazanım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm hedeflerini içeren düzenlemelerin yapılması da önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu düzenlemelerle birlikte, geri dönüşüm faaliyetleri ekonomik olarak da desteklenmeli ve işletmelerin sürdürülebilir geri dönüşüm sistemleri kurmaları özendirilmelidir. Bunun için karbon kredisi, sübvansiyonlar, vergi teşvikleri gibi yöntemler kullanılabilir.

Raporun da ortaya koyduğu gibi, potansiyel yatırımcıların karar alma süreçlerinde göz önünde bulundurması gereken çok sayıda unsur bulunmaktadır. FV panel geri dönüşümü, teknolojik olarak hızla gelişen bir alandır ve yeni yöntemler, malzemeler ve ekipmanlar sürekli geliştirilse de piyasaya çıkmaları zaman almaktadır. Bu nedenle, potansiyel yatırımcılar, hem uluslararası düzeydeki düzenlemeleri ve uygulamaları yakından takip etmeli hem de teknolojik gelişmeleri ve ortaya çıkan fırsatları sürekli olarak değerlendirmelidir. Yatırım kararı alınmadan önce piyasada yer alan farklı teknolojilerin karşılaştırılması, geri kazanım oranlarının değerlendirilmesi ve maliyet-etkinlik analizlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Yalnızca mevcut durum değil, aynı zamanda gelecekte FV atıklarının nasıl bir şekil alacağı ve ilgili geri dönüşüm

teknolojilerinin ne yönde evrileceği hakkında da bilgi sahibi olunmalıdır. Bu süreçte etkili bir risk yönetim sürecinin çok yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında çeşitli kritik kararlara ve varsayımlara dayanarak bir ÖT FV panel işletmesi iş modeli ortaya konulmuş ve bunun ayrıntıları açıklanmıştır. Buna göre Niğde ilinde OSB kapsamında faaliyet gösterecek yıllık 152.880 adet panel işleme kapasitesine sahip bir mekanik geri dönüşüm tesisinin, pazardan elde edebileceği FV atıkları geri dönüştürmesi konseptine dayanan bir işletme önerilmiştir. Bu işletme için iş modeli kanvası tekniği kullanılarak değer önerisi, sürdürülecek temel faaliyetler, yararlanılacak kaynaklar, kurgulanacak iş ortaklıkları, hedeflenebilecek müşteri segmentleri, bunlara ulaşmak için kullanılacak kanallar ve ilişkiler tanımlanmıştır. İşletmenin maliyetleri ve gelirleri de belirlenen konsept çerçevesinde tanımlandıktan sonra ayrıntılı ekonomik bir fizibilite modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen iş modelinin hurda değeri dahil olmak üzere %9,55 iç karlılık oranı elde edeceğini ve yaklaşık 6 yıl 3 ay geri dönüş süresi olacağını göstermektedir. İşletmenin fayda/maliyet oranı 1,19 olarak hesaplanmıştır. FV panel geri dönüşüm tesisinin brüt katma değer etkisinin 5.269.951 USD olacağı öngörülmektedir. Bu finansal göstergeler yatırımın ilk etapta cazip olmadığını göstermektedir. Konu ile ilgili dünyadaki yayınlarda da sıklıkla ifade edilen devlet düzenlemelerinin olması ve uygun teşviklerin kullanılması durumunda ise, önerilen işletme finansal sürdürülebilirlik elde edebilecektir.

Sonuç olarak, bu çalışma Türkiye'de FV panel geri dönüşümünün gerekliliğini ortaya koyarken, bu alandaki yatırım kararlarının dikkatli ve titiz bir planlama sürecini gerektirdiğini vurgulamaktadır. FV panel geri dönüşümü sadece çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda önemli ekonomik fırsatlar da sunan bir sektör olarak görülmelidir. Gelecekte çok miktarda ve sürekli olarak FV atığının oluşacağı öngörülmekte, dolayısıyla bu atıkların değerlendirilmesi için bir an önce harekete geçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, potansiyel yatırımcılara, politika yapıcılara ve ilgili tüm paydaşlara yol gösterici bir kılavuz olmayı hedeflerken, aynı zamanda bu alandaki tartışmalara ve yeni çalışmalara da zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Gerekli yasal düzenlemeler, teşvik mekanizmaları ve teknolojik gelişmeler takip edilerek, Türkiye'de sürdürülebilir ve ekonomik olarak da başarılı bir FV panel geri dönüşüm sektörünün kurulması mümkündür. Bu türden tesislerin oluşması, aynı zamanda Türkiye'nin de yenilenebilir enerji ve döngüsel ekonomiye yaptığı katkıyı perçinleyecektir.

KAYNAKÇA

Ahiler Kalkınma Ajansı. (2023). *TR71 Düzey 2 Bölgesi: Bölge Planı 2024 -2028*. Ahiler Kalkınma Ajansı. https://www.ahika.gov.tr/assets/upload/dosyalar/2014-2023-bolge-plani.pdf

Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., & Redorici, L. (2019). Silicon solar cells: Toward the efficiency limits. *Advances in Physics: X*, *4*(1), 1548305. https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1548305

Artaş, S. B. (2023). *WASTE POTENTIAL AND RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS AT THE END OF THEIR ECONOMIC LIFE, A CASE STUDY ON RECYCLING WITH THE GLOBAL SITUATION*. GAZİANTEP UNIVERSITY.

Artaş, S. B., Kocaman, E., Bilgiç, H. H., Tutumlu, H., Yağlı, H., & Yumrutaş, R. (2023). Why PV panels must be recycled at the end of their economic life span? A case study on recycling together with the global situation. *Process Safety and Environmental Protection*, *174*, 63–78. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.053

Aşkın, A. (2022). *A SUSTAINABLE APPROACH TO SOLAR TECHNOLOGIES: RECYCLING SOLAR PANELS IN TURKEY*. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.

Aşkın, A., Kılkış, Ş., & Akınoğlu, B. G. (2023). Recycling photovoltaic modules within a circular economy approach and a snapshot for Türkiye. *Renewable Energy*, *208*, 583–596. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.035

Birtürk, A., & Çeliktaş, M. S. (2023). Fotovoltaik Modüllerin Sürdürülebilirliğinde Yaşanan İkarus Sendromu. *Mühendis ve Makina*. https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1280950

Birtürk, A., & Çeliktaş, M. S. (2024). Ongoing Waste Issue Towards the Development of Photovoltaic Module Recycling Regulations. *E3S Web of Conferences*, *487*, 03002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448703002

Birtürk, A., Keskin, T., & Çeliktaş, M. S. (2023). The effect of thermal treatments on photovoltaic module recycling. In *Handbook of Thermal Management Systems* (pp. 659–671). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19017-9.00015-5

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., & Grohol, M. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study* (JRC13288). Publications Office of the European Union. 10.2760/386650

Cellatoğlu Baytın, N. (2024). Waste Assessment of 1.275 MWP PV Plant: Case of Northern Cyprus. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *14*(2), 419–433. https://doi.org/10.31466/kfbd.1280155

Cheema, H., Ilyas, S., Kang, H., & Kim, H. (2024). Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. *Waste Management*, *174*, 187–202. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.025

Chowdhury, Md. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, Md., Tiong, S. K., Sopian, K., & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, *27*, 100431. https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431

Del Pero, F., Delogu, M., Berzi, L., & Escamilla, M. (2019). Innovative device for mechanical treatment of End of Life photovoltaic panels: Technical and environmental analysis. *Waste Management*, *95*, 535–548. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.037

Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, *187*, 106612. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612

Dias, P., Schmidt, L., Monteiro Lunardi, M., Chang, N. L., Spier, G., Corkish, R., & Veit, H. (2021). Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, *165*, 105241. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105241

Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *67*(1–4), 397–403. https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00308-1

Ege Ajans. (2023, August 29). Egeli akademisyenlerden Güneş Enerjisi Panellerinin geri dönüşümüne katkı sağlayacak proje – Ege Ajans. *Ege Üniversitesi Haber Ajansı*. https://www.euegeajans.com/index.php/2023/08/29/egeli-akademisyenlerden-gunes-enerjisi-panellerinin-geri-donusumune-katki-saglayacak-proje/

e-Stewards. (2023). *Home Page for the e-Stewards Certification*. E-Stewards. https://e-stewards.org/

ETKB. (2023). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

Franco, M. A., & Groesser, S. N. (2021). A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy. *Sustainability*, *13*(17), 9615. https://doi.org/10.3390/su13179615

Fraunhofer ISE. (2024). *Photovoltaics Report*. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf

Frelp by Sun. (2022). *Home—Frelp by sun | Recovery of Photovoltaic Components*. Frelp by Sun. https://www.frelp.info/

Gönen, Ç., & Kaplanoğlu, E. (2019). Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, *37*(4), 412–418. https://doi.org/10.1177/0734242X19826331

Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *123*, 239–248. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012

Horizon Result Booster. (2024). *Advancing Photovoltaic Sustainability and Circularity in Europe*. Horizon Result Booster.

IEA PVPS, Masson, G., & Kaizuka, I. (2022). *TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS 2022* (T1-43:2022). IEA PVPS. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/PVPS_Trend_Report_2022.pdf

Jayapradha, P., & Barik, D. (2023). A Review of Solar Photovoltaic Power Utilizations in India and Impacts of Segregation and Safe Disposal of Toxic Components from Retired Solar Panels. *International Journal of Energy Research*, *2023*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2023/3196734

Khawaja, M. K., Ghaith, M., & Alkhalidi, A. (2021). Public-private partnership versus extended producer responsibility for end-of-life of photovoltaic modules management policy. *Solar Energy*, *222*, 193–201. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.022

Kim, Y., & Lee, J. (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *98*, 317–322. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.022

Komoto, K., Lee, J.-S., Zhang, J., Ravikumar, D., Sinha, P., Wade, A., & Heath, G. A. (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies* (NREL/TP-6A20-73847, 1561523; p. NREL/TP-6A20-73847, 1561523). https://doi.org/10.2172/1561523

Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. (2022). Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. *Waste Management*, *137*, 312–318. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.024

Lovato, É. S., Donato, L. M., Lopes, P. P., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2021). Application of supercritical CO2 for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. *Journal of CO2 Utilization*, *46*, 101477. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477

NREL. (2024, July 22). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. NREL. https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf

ON İKİNCİ KALKINMA PLANI (2024-2028). (2023, October 31). Presidency of Strategy and Budget.

OSBÜK. (2024). *OSBÜK Organize Sanayi Bölge Listesi*. https://osbuk.org/view/osb/osbliste.php

Pagnanelli, F., Moscardini, E., Altimari, P., Padoan, F. C. S. M., Abo Atia, T., Beolchini, F., Amato, A., & Toro, L. (2019). Solvent versus thermal treatment for glass recovery from end of life photovoltaic panels: Environmental and economic assessment. *Journal of Environmental Management*, *248*, 109313. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109313

Palitzsch, W., & Loser, U. (2017). Integrated PV-Recycling-More Efficient, More Effective. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2272–2274. https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8521517

Pang, S., Yan, Y., Wang, Z., Wang, D., Li, S., Ma, W., & Wei, K. (2021). Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *230*, 111213. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111213

Peplow, M. (2022). Solar Panels Face Recycling Challenge. *ACS Central Science*, *8*(3), 299–302. https://doi.org/10.1021/acscentsci.2c00214

PV Cycle. (2024). *PV Cycle Annual Report 2023*. https://pvcycle.org/

Radavičius, T., Van Der Heide, A., Palitzsch, W., Rommens, T., Denafas, J., & Tvaronavičienė, M. (2021). Circular solar industry supply chain through product technological design changes. *Insights into Regional Development*, *3*(3), 10–30. https://doi.org/10.9770/IRD.2021.3.3(1)

Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E., & Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, *110*, 100619. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100619

Rao, R. R., Priyadarshani, S., & Mani, M. (2023). Examining the use of End-of-Life (EoL) PV panels in housing and sustainability. *Solar Energy*, *257*, 210–220. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.033

REN21. (2024, November 6). *Existing capacity of solar PV worldwide by select country 2023*. Statista. https://www.statista.com/statistics/264629/existing-solar-pv-capacity-worldwide/

Salim, H. K., Stewart, R. A., Sahin, O., & Dudley, M. (2019). Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *211*, 537–554. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229

Şensoy, S., Demircan, M., & Ulupınar, Y. (2008). *Climate of Turkey*.

SERI (Sustainable Electronics Recycling International). (2020, October 10). *R2—SERI*. https://sustainableelectronics.org/r2/

SolarPower Europe, & Schmela, M. (2022). *Global Market Outlook for Solar Power*. SolarPower Europe. https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_report_2022_2022_V2_2_87bd2c1e44.pdf

Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B., Butler, E., Sinha, P., Corkish, R., Wambach, K., & Simon, E. S. (2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *28*(10), 1077–1088. https://doi.org/10.1002/pip.3316

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2024). İstihdam. *T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB*. https://www.sbb.gov.tr/istihdam/

TEİAŞ. (2024). *Yerli Enerji Kaynaklarına Ait Kurulu Gücün Türkiye Toplam Kurulu Gücü İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi (2000-2023)* [Excel; Excel]. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri#:~:text=Yerli%20Enerji%20Kaynaklar%C4%B1na%20Ait%20Kurulu%20G%C3%BCc%C3%BCn%20T%C3%BCrkiye%20Toplam%20Kurulu%20G%C3%BCc%C3%BC%20%C4%B0%C3%A7indeki%20Pay%C4%B1n%C4%B1n%20Y%C4%B1llar%20%C4%B0tibariyle%20Geli%C5%9Fimi%20(2000%2D2023)

TEİAŞ YTBS. (2024, November 30). *Yük Tevzi BİIgi SIstemi Genel Günlük İşletme Neticesi(2024-11-30)*.

Trade Map. (2024, June 28). *Leading e-waste importers worldwide 2023*. Statista. https://www.statista.com/statistics/1389304/e-waste-imports-worldwide-by-country/

TÜİK. (2024). *TÜİK - Coğrafi İstatistik Portalı*. https://cip.tuik.gov.tr/

Vellini, M., Gambini, M., & Prattella, V. (2017). Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels. *Energy*, *138*, 1099–1111. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.031

Wambach, K., Libby, C., & Shaw, S. (2024). *Advances in Photovoltaic Module Recycling: Literature Review and Update to Empirical Life Cycle Inventory Data and Patent Review* (IEA-PVPS T12-28:2024). IEA-PVPS.

Wang, X., Xue, J., & Hou, X. (2023). Barriers analysis to Chinese waste photovoltaic module recycling under the background of "double carbon." *Renewable Energy*, *214*, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.137

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016). *End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels* (NREL/TP--6A20-73852, T12-06:2016, 1561525; p. NREL/TP--6A20-73852, T12-06:2016, 1561525). IEA-PVPS and IRENA. https://doi.org/10.2172/1561525

Xu, C., Li, B., Yuan, X., Liu, C., Shen, C., & Dai, G. (2019). Separation of backsheets from waste photovoltaic(PV) modules by ultrasonic irradiation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *242*, 032046. https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/3/032046

Yahoo, F. (2023, July 3). *The world's appetite for solar panels is squeezing silver supply*. Yahoo Finance. https://sg.finance.yahoo.com/news/the-worlds-appetite-for-solar-panels-is-squeezing-silver-supply-032108084.html

Yan, G., Zhang, M., Sun, Z., Zhao, P., & Zhang, B. (2023). Recycling technology of end-of-life photovoltaic panels: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *45*(4), 10890–10908. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2251925