T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Metro Sistemlerinde Güneş Enerjisi Kullanımının Çevresel Sürdürülebilirlik Kapsamında Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Burcu UZUN AYVAZ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Burcu ONAT

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Doktora Programı

Haziran, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Burcu UZUN AYVAZ tarafından, **Prof. Dr. Burcu ONAT** danışmanlığında hazırlanan **" Metro Sistemlerinde Güneş Enerjisi Kullanımının Çevresel Sürdürülebilirlik Kapsamında Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **27/06/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Burcu ONAT İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Beyhan PEKEY Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Semih NEMLİOĞLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Selami DEMİR İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Burcu UZUN AYVAZ

Canımın pareleri, Annem ve Babam 'a ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

Metro Sistemlerinde Güneş Enerjisi Kullanımının Çevresel Sürdürülebilirlik Kapsamında Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 35905

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK)'nun YÖK 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Akademik araştırma deneyimim ve tez çalışmam boyunca, bana rehberlik eden, desteğini ve öğretilerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Burcu ONAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik araştırmalarımız sürecinde, verdiği tavsiyeler ve öğretiler için değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN'e,

Tez izleme sürecinde, görüş ve katkıları ile bana destek olan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Beyhan PEKEY ve Sayın Prof. Dr. Semih NEMLİOĞLU'na,

Tez çalışmam süresince, veri temini kısmında mesleki bilgi ve tavsiyelerini içtenlikle paylaşan İstanbul Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş. Çevre Yüksek Mühendisi Sayın Yusuf DURAN'a,

Doktora eğitimim boyunca, 2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında destekleyen YÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bir kadının her şeyi başarabileceğine olan inançları ile beni bu yolda her daim destekleyen canlarım Beyza BİRDAL, Başak BİRDAL ve Hilal BİRDAL'a ve biricik dostlarım Zuhal AYDIN, Selma BOZDEMİR, Kevser KORKMAZ'a ve lisansüstü eğitimimiz sürecinde aynı mücadeleyi paylaştığımız C. Belit ÇOBANOĞLU KAYIKÇI'ya kocaman sevgilerimi sunarım.

Çabaladığımız akademik kariyer yolculuğunda, ekip arkadaşlığının ve koşulsuz desteğinin yanında, hayatı mutluluk ve güvenle paylaştığım sevgili eşim Arş. Gör. Coşkun AYVAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayattaki en büyük şansım olan, annem BİNGÖL UZUN'a, babam Mustafa UZUN'a ve abim Burçin UZUN'a, her anımda koşulsuz sevgi ve destekleri ile yanımda oldukları, adil ve güçlü bir birey olmam için verdikleri ilhamdan dolayı sonsuz teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Haziran 2024 Burcu UZUN AYVAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvi**
ABSTRACT ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. KÜRESEL ENERJİ GÖRÜNÜMÜ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER 5
2.1.1. Türkiye Enerji Görünümü ve Geleceğe Yönelik Beklentiler 8
2.2. KÜRESEL GÜNEŞ PV GÖRÜNÜMÜ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER 12
2.2.1. PV Modül Küresel Tedarik Zinciri 13
2.2.2. PV Modül Fiyatları 14
2.2.3. PV Hücre Teknolojileri 15
2.2.4. PV Kurulumları 17
2.2.5. Türkiye Güneş PV Görünümü ve Geleceğe Yönelik Beklentiler 19
2.3. ÇATI ÜSTÜ PV'LERİN ŞEHİRLERE ENTEGRE EDİLMESİ 20
2.3.1. Çatı Üstü PV'lerin Raylı Sistemlere Entegre Edilmesi 21
2.4. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME 22
2.4.1. Çatı üstü PV'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Literatür İncelemesi 23
2.4.2. PERC Hücrelerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Literatür İncelemesi 28
2.4.3. Çatı Üstü PV'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Türkiye 32
3. YÖNTEM **34**

3.1. AMAÇ VE KAPSAM TANIMLANMASI 34
3.1.1. Uygulama Sahası 34
3.1.2. Çatı Üstü PV Santrali Proje Bilgileri 36
3.1.3. Sistem Sınırı 37
3.1.4. Fonksiyonel Birim 37
3.2. ENVANTER ANALİZİ 39
3.2.1. PERC PV modül üretimi 39
3.2.2. PERC PV Modülü Özellikleri 40
3.2.3. Sistem Dengesi Bileşenleri 42
3.2.4. Ulaşım 43
3.2.5. Kurulum/Kullanım Aşaması 44
3.2.6. Kullanım Ömrü Sonu 44
3.3. ÇEVRESEL ETKİ ANALİZİ 44
3.4. ALTERNATİF SENARYOLARIN OLUŞTURULMASI 46
3.4.1. Senaryo 1: Üretim Lokasyonu 46
3.4.2. Senaryo 2: Şebeke Elektriği 46
3.4.3. Senaryo 3: Diğer Enerji Kaynakları 47
3.4.4. Senaryo 4: Farklı Modül Türü 47
3.5. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ 48
3.6. HASSASİYET ANALİZİ 49
3.7. BELİRSİZLİK ANALİZİ 49
4. BULGULAR 50
4.1. ÜRETİLEN kWh ELEKTRİK BAŞINA ÇEVRESEL ETKİLER- TEMEL DURUM SENARYOSU 50
4.1.1. Üretim Aşaması Sıcak Noktaları 52
4.1.2. PERC Modül Üretiminden Kaynaklanan Sıcak Noktalar 56
4.1.3. Sistem Dengesi Bileşenlerinin Üretiminden Kaynaklanan Sıcak Noktalar 58
4.1.4. Ulaşımdan Kaynaklanan Sıcak Noktalar 61
4.2. ALTERNATİF SENARYOLARIN SONUÇLARI 61
4.2.1. Üretim Lokasyonunun Etkisi 61
4.2.2. Şebeke elektriği 69
4.2.3. Diğer Enerji Kaynakları 72
4.2.4. Farklı Modül Tasarımı 74
4.3. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ 80
4.4. BELİRSİZLİK ANALİZİ 81

4.4.1. Modül tasarımı 81
4.4.2. Üretim Lokasyonu 83
5. TARTIŞMA 86
5.1. TEMEL SENARYO-1956.15 kWp'lik ÇATI ÜSTÜ PV 86
5.1.1. GHG 86
5.1.2. Diğer Çevresel Etki Kategori Sonuçları 89
5.2. PERC MODÜLÜ ÜRETİMİ SICAK NOKTALAR 91
5.3. ÜRETİM LOKASYONU 93
5.4. MODÜL TASARIMI 94
5.5. SİSTEM DENGESİ BİLEŞENLERİ 95
5.6. EPBT 96
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 97
KAYNAKLAR 102
EKLER 118
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 147
ETİK KURUL İZİN YAZISI 148
KURUM İZNİ YAZILARI 149
ÖZGEÇMİŞ 150

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1: 2022 yılı dünya birincil enerji tüketimi (TWh cinsinden) (Our World in Data, 2022). 5

Şekil 2: 2015-2023 yılları arası gerçekleştirilen temiz enerji yatırımları (IEA, 2023d). 6

Şekil 3: Teknoloji ve segment bazında yenilenebilir enerji kapasite ilaveleri (IEA, 2023a). 7

Şekil 4: AB-27'nin 2023 ve 2027 yıllarındaki en büyük 10 güneş enerjisi pazarının payı (SolarPower Europe, 2023a). 8

Şekil 5: Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı, 2023 (ETKB, 2022a). 9

Şekil 6: Türkiye güneş enerji kurulu gücü ve elektrik üretimindeki payı, 2017-2023 (The World Bank, 2020)..... 10

Şekil 7: Türkiye güneş haritası (a) güneş enerjisi potansiyeli (b) güneş ışınımı (The World Bank, 2020). 11

Şekil 8: Küresel güneş modülü üretimi ve güneş PV kapasitesi eklemeleri (IEA, 2023e). 13

Şekil 9: Ülke ve bölgelere göre güneş PV üretim kapasitesi, 2021 (IEA, 2023a)..... 14

Şekil 10: Ortalama üretim kapasitesi kullanımı ve küresel PV modül fiyatları, 2019-2028 (IEA, 2023a). 15

Şekil 11: Farklı hücre teknolojilerinin pazar payları (ITRPV, 2023). 17

Şekil 12: Çatı üstü (a) ve şebeke ölçeği (b) mevcut kurulumu ve orta vade senaryosu, 2023-2027 (SolarPower Europe, 2023c). 18

Şekil 13: AB-27 için çatı üstü segmentlerine göre kurulum payları, 2018-2023 (SolarPower Europe, 2023a)..... 18

Şekil 14: Uygulamanın yapılacağı atölye binasının üstten görünüşü ve depolama sahası (Google Earth, 2024)..... 35

Şekil 15: Çalışmada ele alınan sistem sınırı. 38

Şekil 16: Çatı üstü PV santrali tarafından üretilmesi tahmin edilen elektriğin aylara göre değişimi. 39

Şekil 17: mono-Si PERC PV üretim süreçleri ve yaşam döngüsü (Bartie ve diğ., 2021). 41

Şekil 18: Al-BSF hücresinin (A) ve tek yüzlü PERC hücresinin (B) yapısı (Farrell ve diğ., 2020). 42

Şekil 19: İki farklı modül tasarımının şematik gösterimi (a) geleneksel cam/arka tabaka modülü (b) çift cam modülü (Luo ve diğ., 2018). 48

Şekil 20: Beş ana aşamanın çevresel etki kategorilerine olan yüzde katkıları. 51

Şekil 21: HTP-kanser olmayan, HTP-kanser, FETP, ADP-fosil, ADP-nihai ve FEP etki kategorilerinin her birine ait Sankey diyagramları ve sıcak noktalarının ayrıştırılması. 53

Şekil 22: GWP etki kategorisine ait Sankey diyagramı ve sıcak noktalarının ayrıştırılması.. 55

Şekil 23: PERC modülüne ait ana üretim aşamalarının her bir çevre etki kategorisine olan yüzdesel katkısı. 57

Şekil 24: Modül montaj üretim aşamasının her bir çevresel etki kategorisine olan yüzdesel katkısı. 59

Şekil 25: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g CO_2 eşd./kWh cinsinden GWP sonuçları. 62

Şekil 26: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUh/kWh cinsinden HTP-kanser olmayan sonuçları 62

Şekil 27: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUh/kWh cinsinden HTP-kanser sonuçları. 63

Şekil 28: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g P eşd./kWh cinsinden FEP sonuçları. 64

Şekil 29: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUe/kWh cinsinden FETP sonuçları. 64

Şekil 30: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için MJ/kWh cinsinden ADP-fosil sonuçları. 65

Şekil 31: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g Sb eşd./kWh cinsinden ADP-nihai sonuçları. 65

Şekil 32: Çin, Türkiye ve Avrupa elektrik karışımlarının Ecoinvent v3.7'ye göre payları. 66

Şekil 33: Üç farklı lokasyonda üretilen Cz-Si, poly-Si, $AlMg_3$, cam ve modül montajı aşamalarının GWP değişimi. 68

Şekil 34: GWP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 69

Şekil 35: HTP-kanser olmayan etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 70

Şekil 36: HTP-kanser etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 70

Şekil 37: FEP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 70

Şekil 38: FETP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 71

Şekil 39: ADP-fosil etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 71

Şekil 40: ADP-nihai etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması. 72

Şekil 41: (a) Toplam GHG emisyonu sonuçları (b) PERC modül üretiminin farklı aşamaları için GHG emisyonları. 75

Şekil 42: (a) Toplam HTP-kanser olmayan etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için HTP-kanser olmayan etki sonuçları. 76

Şekil 43: (a) Toplam HTP-kanser etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için HTP-kanser etki sonuçları..... 77

Şekil 44: (a) Toplam FEP etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için FEP etki sonuçları. 77

Şekil 45: (a) Toplam FETP etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için FETP etki sonuçları. 78

Şekil 46: (a) Toplam ADP-fosil etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için ADP-fosil etki sonuçları. 79

Şekil 47: Toplam ADP-nihai etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için ADP-nihai etki sonuçları. 79

Şekil 48: Modül tür ve özelliklerine göre EPBT sonuçları. 81

Şekil 49: İki farklı PERC modül tasarımı için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: geleneksel cam/arka tabaka modülü (B) çift cam modülü). 82

Şekil 50: İki farklı modül tasarımının tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: geleneksel cam/arka tabaka modülü (B) çift cam modülü). 82

Şekil 51: Modül üretim lokasyonu için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1a)..... 83

Şekil 52: Modül üretim lokasyonu için tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1a)..... 83

Şekil 53: Modül üretim lokasyonu için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1b). 84

Şekil 54: Modül üretim lokasyonu için tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1b). 85

Şekil 55: Toplam GHG emisyonlarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması (g CO_2 eşd/kWh) 87

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Türkiye elektrik üretiminde gelecek yıllara göre kaynakların payı (%) (ETKB, 2022b). 12

Tablo 2: Hücre teknolojilerinin malzeme ve yapısına göre sınıflandırılması. 16

Tablo 3: PERC PV modülünün YDD'sine ilişkin çalışmalar. 30

Tablo 4: Çatı üstü PV santrali projesine ait teknik bilgiler. 36

Tablo 5: Kurulum için gerekli olan bileşenler ve özellikleri. 36

Tablo 6: Tek yüzlü PERC PV modülünün temel özellikleri. 41

Tablo 7: Ana sistem dengesi bileşenleri ve özellikleri. 43

Tablo 8: EF etki kategorileri ve ilgili etki kategorisi göstergeleri ve karakterizasyon modelleri. 45

Tablo 9: Üç farklı üretim lokasyonu için orta gerilim elektrik karışım sürecinin tanımı. 47

Tablo 10: Silikon AL-BSF ve PERC hücre teknolojisine ait PV modüllerinin özellikleri. 48

Tablo 11: Çatı üstü güneş PV ve diğer enerji kaynaklarını temsil eden senaryoların 1 kWh başına etki sonuçları. 73

Tablo 12: Diğer çevresel etkilerin karşılaştırılması. 90

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
CO_2	: Karbondioksit
W	: Watt
g	: gram
kg	: kilogram
m^3	: metreküp
m^2	: metrekare
GW	: Gigawatt
MW	: Megawatt
kWh	: Kilowatt saat
kWp	: Kilowatt peak
MWp	: Megawatt peak
SiO_2	: Silikondioksit
tkm	: Ton kilometre
Sb	: Antimon
P	: Fosfor
N	: Azot
MJ	: Megajul
Mt	: Milyon ton
$AlMg_3$	: Alüminyum alaşımı

Kısaltmalar	Açıklama
GHG	: Sera Gazı Emisyonu
HTP	: İnsan Toksisitesi
FEP	: Tatlısu Ötrofikasyonu
FETP	: Tatlısu Ekotoksisitesi
ADP-fosil	: Fosil Kaynak Kullanımı
ADP-nihai	: Mineral ve Metal kullanımı
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirme
BM	: Birleşmiş Milletler
PV	: Fotovoltaik
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
AB	: Avrupa Birliği
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
PERC	: Pasifleştirilmiş Verici Arka Hücre
CSP	: Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
NECP	: Ulusal Enerji ve İklim Planı
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
AL-BSF	: Alüminyum Arka Yüzey Alanı
TOPCon	: Tünel oksit pasifleştirilmiş temas
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
ISO	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu
EPBT	: Enerji Geri Ödeme Süresi
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
EF	: Çevresel Ayak İzi Kategori Kuralları
NMVOC	: Metan olmayan uçucu organik bileşikler
CFC11	: Kloroflorokarbon
KKYDP	: Kırsal Kalkınma Yatırımlarını Destekleme Programı
TurSEFF	: Yenilenebilir Enerji Yatırımları Finansmanı

ÖZET

DOKTORA TEZİ

METRO SİSTEMLERİNDE GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANIMININ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAPSAMINDA YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Burcu UZUN AYVAZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman: Prof. Dr. Burcu ONAT

Küresel ölçekte uygulanan enerji dönüşümü politikalarına bakıldığında, çatı üstü fotovoltaik (PV) uygulamalarına yönelik ilginin arttığı, özellikle şehirlerde bu uygulamalara yönelik alanların değerlendirildiği ve teşvik programlarının oluşturulduğu gözlenmektedir. Bu vesile ile, gelişmeye devam eden yeni PV teknoloji ve uygulamalarının, çevresel performansını anlamak ve diğer enerji kaynaklarıyla anlamlı bir karşılaştırmaya olanak sağlamak için, kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi önemlidir. Bu çalışma, Türkiye'nin İstanbul ilinde, bir raylı sistem yerleşkesinde bulunan atölye binasının çatısına uygulanacak ve 1956.15 kilowatt peak (kWp) kurulu gücüne sahip bir çatı üstü PV santralinin, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirmesine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, son teknolojilerden biri olan yüksek verimli Pasifleştirilmiş Verici ve Arka Hücre (PERC) ile oluşturulmuş bir PV modül sisteminin, ulaşım yapı bileşenlerine entegre edilmesi ve Türkiye kurulum lokasyonu dikkate alınarak çevresel etkilerinin kapsamlı olarak değerlendirilmesi ilk kez yapılmıştır. SimaPro v9.2 yazılımı ile gerçekleştirilen Yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) kapsamı, "beşikten

mezara” olarak belirlenmiştir ve fonksiyonel birim 1 kilowatt saat (kWh) elektrik üretimi olarak kabul edilmiştir.

Çatı üstü PV santralinin yaşam döngüsü boyunca, 1 kWh elektrik üretimi başına düşen toplam sera gazı (GHG) emisyonu 55.1 gram karbondioksit eşdeğeri (g CO_2 eşd.) olarak hesaplanmıştır. Şebeke elektriğine göre karşılaştırıldığında, analiz edilen sistemin kullanım ömrü boyunca, toplam ~1146 ton/yıl CO_2'yi önleyeceği tahmin edilmiştir. Öncelikli olarak dikkate alınan diğer çevresel etkiler; insan toksisitesi-kanserojen olmayan; 1.9E-06 CTUh/kWh, insan toksisitesi-kanserojen; 7.6E-08 CTUh/kWh, tatlı su ötrofikasyonu; 0.03 g P eşd./kWh, tatlısı ekotoksisitesi; 2649.9 CTUe/kWh, fosil kaynak kullanımı; 570.2 MJ/kWh ve mineral ve metal kullanımı; 0.0050 g Sb eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Çevresel yüklerin en büyük kaynağı, PERC PV modülünün üretim aşamasıdır (yaklaşık %82.2- %99.0). Üretim lokasyonuna ilişkin hassasiyet analizinden, sıcak noktalar olarak belirlenen modül montajı ve enerji yoğun süreçlerin (poly-Si ve Cz-Si) daha yeşil enerji karışımına sahip bir lokasyonda yapılmasının, çevresel faydalarda iyileşme sağlayabileceği gözlenmiştir. Çift camlı modül tasarımına sahip bir PERC modülünün uygulamada kullanılması senaryosu ise çevresel etkiler açısından en iyi performansı göstermiştir.

Sonuçlar, yerinde güneş enerjisiyle üretilen elektriğin, fosil yakıt bazlı elektriğe göre etkilerin çoğunda daha avantajlı olduğunu desteklemektedir. Önemli ulaşım türlerinden biri olan raylı sistem bileşenlerine uygulanacak çatı üstü PV kurulumları, özellikle İstanbul gibi metropol şehirlerde çevresel faydalar sağlayabilir. Ancak, bu sistemlerin özellikle modül üretimi gibi diğer aşamalarından kaynaklanabilecek çevresel etkilerinin de olabileceği (ADP-nihai gibi) dikkate alınmalıdır. Uygulamaların sürdürülebilirliği açısından yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarının proje öncesi analizlere dahil edilmesi, çevresel etkilere sebep olan sıcak noktaların belirlenmesinde ve buna yönelik önlemler alınmasında fayda sağlayacaktır. ⌋

Haziran 2024 , ⌊170⌋ sayfa.

Anahtar ⌊kelimeler: Metro, Güneş enerjisi, Fotovoltaik, Çatı üstü, Yaşam döngüsü değerlendirme, Çevresel etkiler ⌋

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SOLAR ENERGY USE IN METRO SYSTEMS WITHIN THE SCOPE OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

Burcu UZUN AYVAZ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Name of Programme

Supervisor: Prof. Dr. Burcu ONAT

In terms of energy transition policies that are being implemented on a global scale, interest in rooftop photovoltaic (PV) applications is on the rise, sites for these applications are being evaluated, and incentive programs are being put in place, especially in cities. Therefore, it is important to comprehensively evaluate new PV technologies and applications as they evolve in order to understand their environmental performance and make meaningful comparisons with other energy sources. The focus of this study is the assessment of the life cycle environmental impacts of a rooftop PV system with an installed capacity of 1956.15 kilowatt peak (kWp) on the roof of a workshop building at a railway system campus in Istanbul, Türkiye. This is the first time that a PV module system using one of the latest technologies, the high-efficiency Passivated Emitter and Rear Cell (PERC), has been integrated into transportation building components and its environmental impacts have been comprehensively assessed. The study also takes into account the Türkiye location of the installation. The scope of the life cycle assessment

(LCA) conducted with SimaPro v9.2 software was determined as “cradle to grave” and the functional unit was considered as 1 kilowatt hour (kWh) electricity generation.

Over the life cycle of the rooftop PV system, the total greenhouse gas (GHG) emissions per 1 kWh of electricity produced are calculated to be 55.1 grams of carbon dioxide equivalent (g CO_2 eq.). Compared to grid electricity, the analysed system is estimated to avoid a total of ~1146 tons/year of CO_2 over its lifetime. Other significant environmental impacts are calculated as human toxicity non-carcinogenic; 1.9E-06 CTUh/kWh, human toxicity carcinogenic; 7.6E-08 CTUh/kWh, freshwater eutrophication; 0.03 g P eq./kWh, freshwater ecotoxicity; 2649.9 CTUe/kWh, fossil resource use; 570.2 MJ/kWh and mineral and metal use; 0.0050 g Sb eq./kWh. The biggest source of environmental impact is the production phase of the PV module (approximately 82.2-99.0 %). The sensitivity analysis of the manufacturing location showed that module assembly and energy-intensive processes (poly-Si and Cz-Si) in a country with a more environmentally friendly energy mix could result in an improvement of the environmental performance. The best performance in terms of environmental impact was achieved by glass-glass PERC.

The results support that on-site solar electricity generation is more advantageous than fossil fuel electricity generation in most of the impacts. Rooftop PV installations on components of rail systems, one of the main modes of transportation, can provide environmental benefits, especially in large cities such as Istanbul. However, it should be noted that these systems may also have environmental impacts (such as resource use, minerals and metals) that may arise from other stages of these systems, in particular from manufacturing the modules. The inclusion of life cycle assessment in pre-project analyses in terms of sustainability of the applications will be beneficial in identifying hotspots that cause environmental impacts and taking measures accordingly.

June 2024, 170 pages.

Keywords: Subway, Solar energy, Photovoltaics, Rooftop, Life cycle assessment, Environmental impacts

1. GİRİŞ

Enerji arzının güvenliği, iklim değişikliği ile mücadele, geleneksel kaynakların kullanılması ve ulusal ekonomilerin iyileştirilmesi amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) büyük ve küçük ölçekli uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır (Baranes ve diğ., 2017). Küresel sıcaklık artışının 2 derece santigrat (°C) ile sınırlaması konusunda anlaşmaya varılmasıyla (UNFCCC, 2016), fosil bazlı geleneksel kaynaklar yerine güneş fotovoltaikleri (PV) gibi yenilenebilir enerjilere geçiş yoluyla, küresel enerji arzının hızlı bir şekilde karbondan arındırılması yönünde bir eğilim oluşmuştur. Bu, özellikle enerji ve ulaştırma sektörlerinin karbonsuzlaştırılmasında da temel bir rol oynamaktadır.

PV'ler ile, güneş ışığı termal veya elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Ludin ve diğ., 2018). PV'ler, ihtiyaçlara yönelik uygun ve sürdürülebilir bir alternatif olarak görülmekte ve dünyada en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojisi haline gelerek (Jean ve Brown, 2020) kurulumları gittikçe yaygınlaşmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) raporuna göre, 2023 yılında ilave edilen 510 GW (Gigawatt)'lık YEK payının dörtte üçünü, güneş PV'si oluşturmuştur ve küresel enerji geçişini yönlendirmede güneş enerjisinin lider konumu dikkat çekmektedir (IEA, 2023a). Avrupa Birliği (AB) üye devletleri, 2023 yılında gerçekleştirdiği 55.9 GW'lık PV kurulumu ile 2022 yılı seviyelerine göre %40 oranında bir büyüme sağlamıştır (SolarPower Europe, 2023a). Exeter Üniversitesi ve Londra Kolej Üniversitesi öncülüğünde yapılan bir araştırmada, dünyanın küresel olarak bir güneş enerjisi devrilme noktasına ulaştığı ve önümüzdeki yıllarda güneş enerjisinin en verimli ve uygun maliyetli elektrik üretim kaynağı haline gelebileceği belirtilmiştir. 2050 yılında, elektrik üretiminin %56'sından sorumlu olacağı tahmin edilmektedir (Nijsse ve diğ., 2023). Son yıllarda ülkeler, coğrafi konumu, iklim değerleri, sosyal yapıları, ekonomik koşulları ve enerji kaynaklarına göre, güneş enerjisi uygulamalarının arttırılması için çeşitli politikalar ve teşvikler uygulamaktadır (Kılıç ve Kekezoğlu, 2022). PV yayılımındaki büyümenin devam etmesi ile, 2050 yılına kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosunu takip edecek şekilde ölçeğin büyütüleceği ve bunun da politika kararlılığının sürdürülmesi ile sonuçlanacağı beklenmektedir (IEA, 2023a).

Dünyada uygulanan enerji dönüşümü politikalarına bakıldığında, PV sistemlerinin çatı uygulamalarına yönelik ilginin arttığı görülmektedir. Bu bağlamda, özellikle şehirlerde bu

uygulamalara yönelik teşvik programları oluşturmaktadır ve uygun alanlar değerlendirilmektedir. 2022 yılında, dünyada kurulan toplam yeni güneş PV kapasitesinin (239 GW) yarısına yakını çatılara kurulmuştur (118 GW). Buna göre, 2022 yılında yeni kurulan çatı üstü PV'ler bir önceki yıla göre %49 artış göstermiştir (Alparslan ve Yıldırım, 2023). AB'nin 27 üye ülkesinin (AB-27) çatı üstü PV uygulamaları, bir önceki yıla göre %54 oranında büyümüştür. Buna göre konut, ticari ve endüstriyel çatıların yeni kurulu kapasitelerinin payı, bir önceki yıla göre artarak %33'e ulaşmıştır (SolarPower Europe 2023a). Önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahip Türkiye ise, mevcut kurulu gücünün neredeyse on katı bir çatı üstü PV üretim potansiyeline sahiptir (Alparslan ve Yıldırım, 2023). Son yıllarda, bir deprem bölgesi olmasının getirdiği farkındalık ile, yeni binaların inşası, özel/kamu binalarına panel yükümlülüklerinin getirilmesi ve uygun çatı alanlarının belediyeler tarafından ihale edilmesi ile, çatı üstü PV kurumlarının önümüzdeki yıllarda artması muhtemel gözükmektedir.

PV'lerin cephe, , entegre laminat, açık zemin, düz ve eğimli çatı olarak farklı kurulumları yapılmaktadır (Ratner ve Lychev, 2019). PV ve enerji depolama sistemleri, konut gibi uygulamalarının yanında (Martin ve diğ., 2022; Alhadri ve diğ., 2023) artık ulaşıma da entegre edilmektedir (Ren ve diğ., 2022). Bu ulaşım türlerinden biri olan raylı sistemler, çeşitli yapı ve bileşenlerinin olması sebebiyle, bu yönüyle değerlendirilme potansiyeline sahiptir. Özellikle metropol şehirlerde, önemli bir ulaşım türü haline gelen metroların kullanım/işletme aşaması, tüm sistemin sebep olduğu emisyon ve enerji tüketiminin önemli bir kaynağı olarak dikkat çekmektedir (Del Pero ve diğ., 2015; De Andrade ve diğ., 2016; Ghate ve Qamar, 2020; Uzun ve Onat, 2023). Elektrik ile çalışan ve şehirlerde arazi kullanımı sebebiyle önemli bir potansiyele sahip olan raylı sistem ve bileşenlerine, yenilenebilir enerjinin entegre edilmesi ile daha verimli ve çevre dostu operasyonların oluşturulması sağlanabilir (Struckl ve diğ., 2007; Del Pero ve diğ., 2015; Chester ve diğ., 2009; Li ve diğ., 2018). Halihazırda, raylı sistemlerin platform, tren ve bakım deposu çatıları, ses ve rüzgarlık bariyerleri ve demiryolu hattı boyunca açıklıklara yerleştirildiği çeşitli PV kurulum alternatifleri mevcuttur.

PV kurulumları sırasında, kimyasal elementler ve verimlilik açısından farklılık gösteren PV modül türleri kullanılmaktadır. Mevcut ve gelişmekte olan PV modüllerinin malzeme, üretim süreçleri ve elektriksel özellikleri farklılık göstermektedir (Rabaia ve diğ., 2021). Şu anda en yaygın teknoloji olan monokristalin silikon (mono-Si) teknolojisi, hücre verimliliğini artırılması ve belirli kurulumlar için daha uygun hale getirilmesi için tasarlanmış çok çeşitli

hücre tiplerini içermektedir. 2022 yılında, küresel pazarın %78'ini Pasifleştirilmiş Verici ve Arka Hücre (PERC) teknolojisi oluşturmuştur (ITRPV, 2023).

PV modüllerinin çalışma ömrü boyunca neredeyse çevre dostu olduğu düşünülse de, bir PV sisteminin üretilmesi sırasında ham maddelerinin çıkarılması ve işlenmesi, bileşenlerinin tedarik edilmesi ve montaj gibi farklı aşamaları bazı olumsuz çevresel etkilere sebep olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, PV sistemlerinin sera gazı (GHG) emisyonu (Hondo ve diğ., 2005), hava toksisitesi (Rahman ve diğ., 2022) ve su kirliliği (Tsoutsos ve diğ., 2005) gibi etkilerden sorumlu olabileceği belirtilmiştir. Yapısal özelliğinden dolayı, PV hücresinin geri dönüşümü veya bertarafının zorlayıcı olabileceği de belirtilmektedir (Molla ve diğ., 2024). Bu nedenle, çeşitli PV teknoloji ve uygulamalarının çevresel performansını anlamak ve diğer enerji kaynaklarıyla anlamlı bir karşılaştırmaya olanak sağlamak için doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), bir ürünün veya sürecin tüm yaşam döngüsü boyunca neden olduğu potansiyel çevresel etkileri anlamak için kullanılan yangın bir metodolojidir. IEA tarafından, PV yaşam döngüsüne ilişkin metodoloji kılavuzlar yayınlanmıştır (Frischknecht ve diğ., 2020a). PV'lerin YDD'si, envanter verileri (örneğin elektrik karışımları, malzeme tüketimi ve enerji gereksinimleri), sistem sınırlarındaki farklılıklar, kullanım ömrü sonu işlemlerinin dahil edilmesi veya hariç tutulması, ulaşım ve işletme parametreleri (örneğin güneş ışınımı, ömrü, performans oranı ve modül verimliliği) sebebiyle oldukça farklılık göstermektedir (Wong ve diğ., 2016; Fthenakis ve diğ., 2017; Ludin ve diğ., 2018). PV sistemlerdeki teknolojik yeniliklerin (hücre teknolojileri, modül verimliliği, çevre dostu malzemeler gibi) ilerlemesi, uygulamaların artmasına ve gelişmesine yol açmaktadır. Bu sebeple, olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek, çevre dostu elektrik üretim kaynaklarından doğru şekilde yararlanmak ve olası sürdürülebilir çözümlerin bulunması için ilgili araştırmalara ihtiyaç vardır. Hem dünyada da hem de ülkemizde, PV sektörünün hızla genişlemesi göz önüne alındığında, farklı PV sistem uygulamalarının daha geniş bir perspektiften değerlendirilmesiyle, politika yapıcılara ve enerji yatırımcılarına değerli bilgiler sağlamanın yanında, üreticiler için de güçlü bir ürün optimizasyon aracı oluşturulmaktadır.

Bu çalışma, Türkiye'nin İstanbul ilinde, bir raylı sistem yerleşkesinde bulunan atölye binasının çatısına uygulanacak ve 1956.15 kilowatt peak (kWp) kurulu gücüne sahip bir çatı üstü PV santralinin, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirmesine odaklanmaktadır.

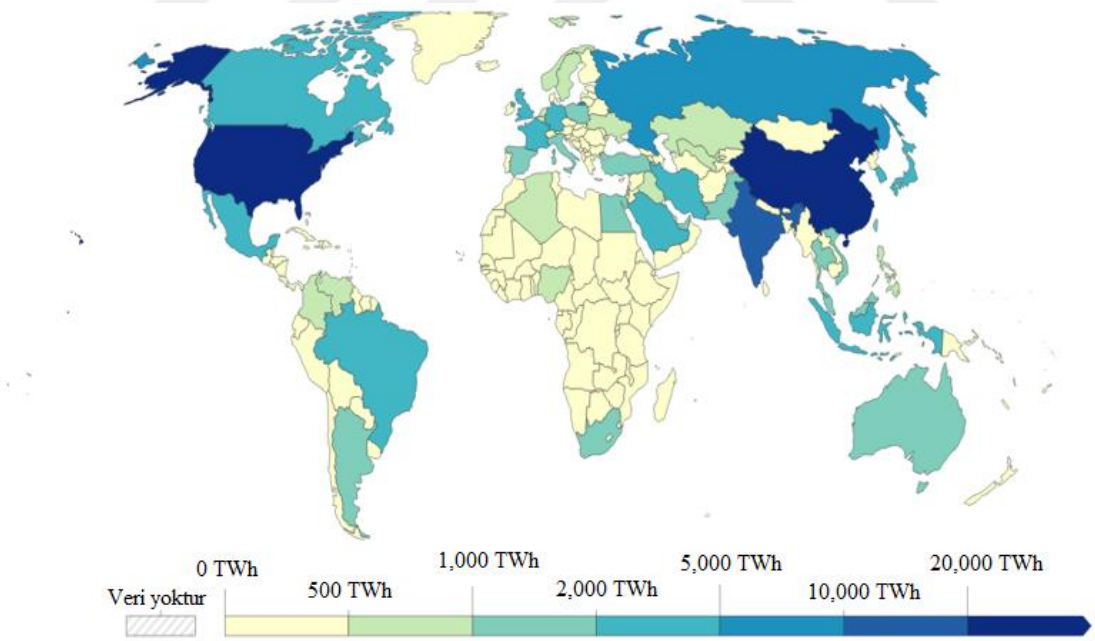
Bu kapsamda, son teknolojilerden biri olan yüksek verimli PERC hücresi ile oluşturulmuş bir PV modül sisteminin, ulaşım yapı bileşenlerine entegre edilmesi ve Türkiye kurulum lokasyonu dikkate alınarak çevresel etkilerinin kapsamlı olarak değerlendirilmesi ilk kez yapılmıştır.

Çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde detaylandırılmıştır: Bölüm 2'de küresel ve Türkiye ölçeğinde PV teknolojisinin gelişimi, geleceğe yönelik beklentiler, çatı üstü PV teknolojilerinin önemi, çatı üstü PV uygulamalarının yaşam döngüsü kapsamı ve PERC hücre teknolojisi literatür kapsamında değerlendirilmiştir. Bölüm 3'te uygulama verileri, modül özellikleri, montaj koşulları, analiz yöntemleri, çevresel etkilerin tahmin edilmesine yönelik metodoloji ve oluşturulan alternatif senaryolar paylaşılmıştır. Bölüm 4'te modellenen sistemin analiz bulguları sunulmakta, Bölüm 5'te bulgular tartışılmakta, Bölüm 6'da sonuç ve öneriler ile sonlandırılmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. KÜRESEL ENERJİ GÖRÜNÜMÜ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER

Küresel enerji krizi sırasında, enerji piyasalarında yaşanan dalgalanmalar, özellikle enerji hizmetlerine yönelik talepte en fazla artışın yaşandığı ve fiyatlara duyarlı gelişmekte olan ekonomilerde, uygun maliyetli, güvenilir ve dayanıklı arzın sağlanması yönündeki ilgiyi artırmıştır. Şekil 1, dünya genelinde birincil enerji tüketimini ülke bazında göstermektedir. Buna göre, 2022 yılında toplam 167.788 terawatt saatlik (TWh) bir enerji tüketimi gerçekleştirilmiştir (Our World in Data, 2022). Toplam birincil enerji tüketimi, %1'lik bir artış ile 2019 yılında başlayan koronavirüs (COVID-19) salgını öncesindeki seviyesinin yaklaşık %3 üzerine çıkmıştır. Fosil yakıt tüketiminin, birincil enerjiye oranı %82'lik bir pay ile sabit kalırken, YEK'in (hidroelektrik hariç) birincil enerji tüketimindeki payı, bir önceki yıla göre yaklaşık %1 artışla %7.5'e yükselmiştir (EI, 2023).



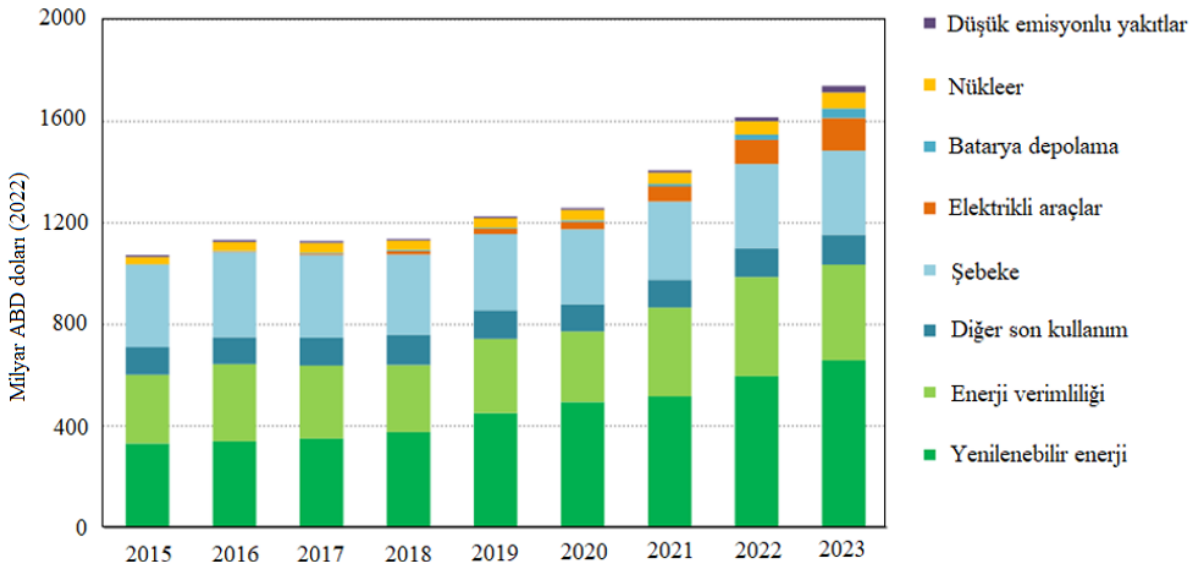
Şekil 1: 2022 yılı dünya birincil enerji tüketimi (TWh cinsinden) (Our World in Data, 2022).

Enerji sektörü, dünya nüfusunun %90'ından fazlasının solumak zorunda kaldığı ve yılda 6 milyondan fazla erken ölümle ilişkili olan hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biridir (IEA, 2023b). Küresel enerjiyle ilişkili karbondioksit (CO_2) emisyonları, 2023 yılında %1.1 artışla

410 milyon ton yükselerek 37.4 milyar tonluk yeni bir rekora ulaşmıştır. 2023'teki artışın %65'inden fazlasını ise kömür kaynaklı emisyonlar oluşturmaktadır (IEA, 2023c).

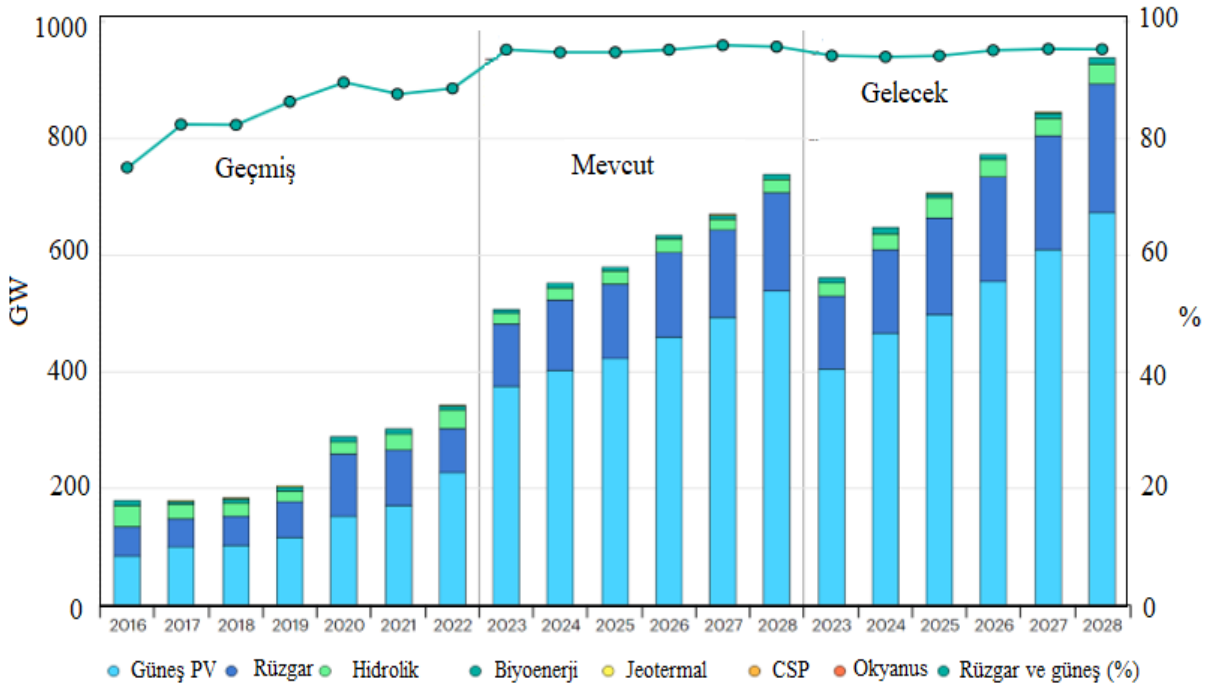
Petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi alternatif enerjilere kademeli ve hızlı ikamesi, CO_2 emisyonlarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. 2023 yılında düzenlenen 28.Taraflar Konferansı'nın (COP28) ana sonuçları arasında, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kurulu gücünün üç katına çıkarılması, enerji verimliliğinin iki katına çıkarılması, fosil yakıt sübvansiyonlarının ve kömürün aşamalı olarak azaltılması hedefleri yer almıştır (UNFCCC, 2023). 2050 yılına kadar, küresel sıcaklık artışının 1.5°C'de tutma hedefine ulaşmada, yenilenebilir enerji, elektrifikasyon, temiz hidrojen, sürdürülebilir biyokütle ve kritik mineraller için çeşitlendirilmiş arz, temel geçiş faktörleri olarak ön plana çıkmaktadır (IRENA, 2023a).

COVID-19 salgınının neden olduğu durgunluğun ardından, toparlanma ve küresel enerji krizine verilen tepki ile temiz enerji yatırımları önemli bir ivme kazanmıştır. Şekil 2'de, 2016-2023 yılları arasında temiz enerji yatırımlarının değişimi gösterilmektedir. 2023 yılında, güneş enerjisi başta olmak üzere YEK ve elektrikli araçlar, temiz enerji yatırımında beklenen artışa öncülük etmiştir (IEA, 2023d). Temiz enerji yatırımı, 2019'dan 2023'e kadar yaklaşık %50 oranında artarak, 2023'te 1.8 trilyon ABD dolarına ulaşmıştır ve bu dönemde yılda yaklaşık %10 oranında büyümüştür (IEA, 2024).



Şekil 2: 2015-2023 yılları arası gerçekleştirilen temiz enerji yatırımları (IEA, 2023d).

Şekil 3'te, teknoloji ve segment bazında yıllara göre yenilenebilir enerji kapasite ilaveleri gösterilmektedir. 130'dan fazla ülkede sürdürülen politika desteği, YEK kapasitesinin küresel büyüme eğiliminde önemli bir değişikliğe yol açarak, 2023 yılında yaklaşık 510 GW'a ulaşmasını sağlamıştır. 2023'teki dünya çapındaki bu ivmede, özellikle Çin'deki hızla artan güneş (+%116) ve rüzgâr enerjisi (+%66) pazarının yıllık büyümesi etkili olmuştur (IEA, 2023a). Güneş enerjisi, 346 GW'lık bir ilaveyle yenilenebilir enerji kapasite artışının tek başına yaklaşık dörtte üçünü oluşturmuştur (IRENA, 2024).

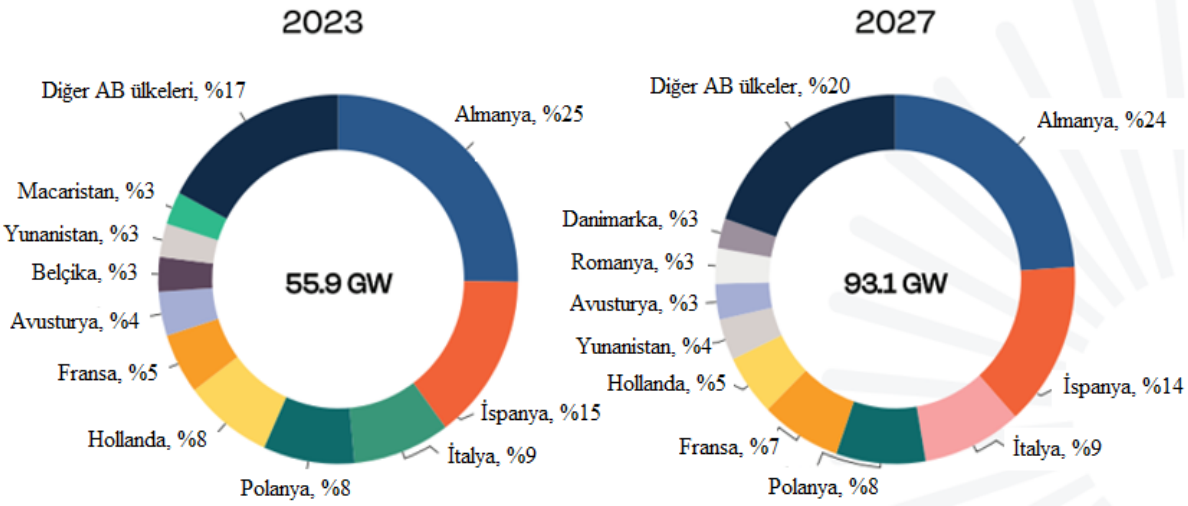


Şekil 3: Teknoloji ve segment bazında yenilenebilir enerji kapasite ilaveleri (IEA, 2023a).

Güneş enerjisinin, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) ve PV olmak üzere farklı üretim teknolojileri bulunmaktadır. PV'ler, çeşitli malzemeler ve bileşenler yardımıyla güneş ışığını doğru akıma (DC) dönüştürerek elektrik üretmek için kullanılan en yaygın yollardan biridir (Al-Ezzi ve Ansari, 2022). Şekil 3'te görüldüğü gibi, güneş PV'si 2016'dan 2022'ye kadar olan dönemde en hızlı büyüyen teknoloji konumundadır. YEK'lerin, önümüzdeki beş yıl içinde daha da güçlü bir şekilde büyümesi ve daha fazla kapasite eklenmesi beklenmektedir. Mevcut politikalar ve piyasa koşulları altında, 2023-2028 yıllarını kapsayan dönemde yaklaşık 3700 GW yeni yenilenebilir kapasitenin devreye girmesi beklenmektedir. Üretim maliyetlerinin çoğu ülkede düşük olmasından dolayı, bu artışın %95'inin güneş PV ve rüzgâr enerjisinden kaynaklanacağı ve 2025 yılı başları itibari ile kömürü geçerek küresel elektrik üretiminin en önemli kaynağı olacağı tahmin edilmektedir. 2028 yılında ise, YEK'lerin, küresel elektrik

üretiminin %42'sinden fazlasını oluşturması, rüzgâr ve güneş PV payının %25'e ulaşacağı öngörülmektedir (IEA, 2023a). Küresel olarak bakıldığında, güneş PV'sinin enerji dönüşümündeki artan payı dikkat çekmektedir.

AB ülkeleri son yıllarda, Ulusal Enerji ve İklim Planlarını (NECP) güncelleme sürecine girmiştir. Buna göre, 2030 yılına kadar, 425 GW kapasitesinde güneş enerjisi kurulması hedeflenmiştir (SolarPower Europe, 2023b). Avrupa Parlamentosu tarafından yenilenebilir enerji yönergesinin kabul edilmesi ile, AB'nin 2030 yılı YEK hedefi %42.5'e yükseltilmiştir (EU RED, 2023). Bununla birlikte, belirli hızlanmakta olan alanlarda bu projelere daha kolay onay verilmesi prosedürleri üzerine de çalışılmaktadır (GDIP, 2023). Şekil 4, 2023 ve 2027 yılları için AB-27 ülkelerinin güneş enerjisi pazar payları gösterilmektedir. Son bir yılda, 55.9 GW güneş enerjisi kurulumu ile, toplam güneş kapasitesi 263 GW'a ulaşmıştır. Almanya, 2023 yılında 14.1 GW kurulu gücü ile en fazla güneş pazarına sahip ülke konumundadır (%25) (SolarPower Europe, 2023a). Avrupa Yeşil Mutabakatına göre, 2030 ve 2050 yılları için belirlenen iklim hedeflerine ulaşmak için, AB'nin enerji sistemini karbondan arındırmak kritik önem taşımaktadır ve PV'lerin bu süreçteki rolüne dikkat çekilmektedir (GDIP, 2023).



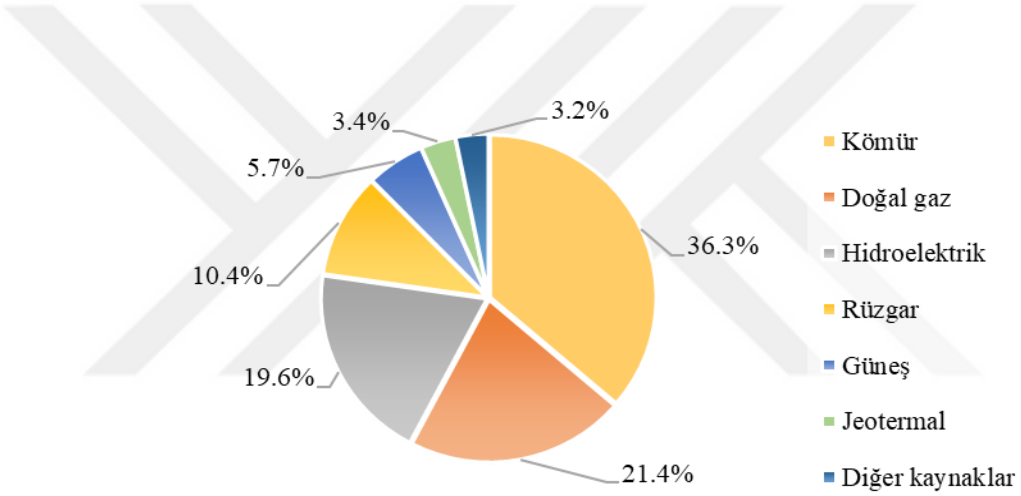
Şekil 4: AB-27'nin 2023 ve 2027 yıllarındaki en büyük 10 güneş enerjisi pazarının payı (SolarPower Europe, 2023a).

2.1.1. Türkiye Enerji Görünümü ve Geleceğe Yönelik Beklentiler

Türkiye'nin hızla artan nüfusu ve genişleyen ekonomisi, enerji talebinin artmasına sebep olmaktadır. Birincil enerji tüketimi 2022 yılında 7 eksajul, 2023 yılında ise hafif bir artışla 7.1 eksajul olarak gerçekleşmiştir (Statista, 2024). 2021 yılında, toplam emisyon salımı 564.4 milyon ton karbondioksit eşdeğeridir (Mt CO_2 eşd.). Enerji sektörü, 2021 yılı toplam GHG

emisyonlarının %71.3'lük kısmına, CO_2 emisyonlarının ise %85.2'sine neden olmuştur (TÜİK, 2021). Enerji kaynaklı toplam CO_2 emisyonlarının %36'sı elektrik ve ısı üretiminden, %22'si ise ulaşımdan kaynaklanmaktadır (IEA, 2021). Bu sebeple, elektrik ve ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılarak enerji dönüşümüne öncülük etmesi önem taşımaktadır.

2023 yılında, bir önceki yıla göre %0.6'lık bir düşüşle 326.3 TWh elektrik enerjisi üretilmiştir. Çeşitli enerji kaynaklarının, ülkenin toplam elektrik karışımına katkıları Şekil 5'te gösterilmektedir. 2023 yılında, elektriğin %36.3'ü kömürden, %21.4'ü doğalgazdan, %19.6'sı hidroelektrikten, %10.4'ü rüzgârdan, %5.7'si güneş enerjisinden, %3.4'ü jeotermal enerjiden ve %3.2'si diğer kaynaklardan üretilmiştir (ETKB, 2022a).

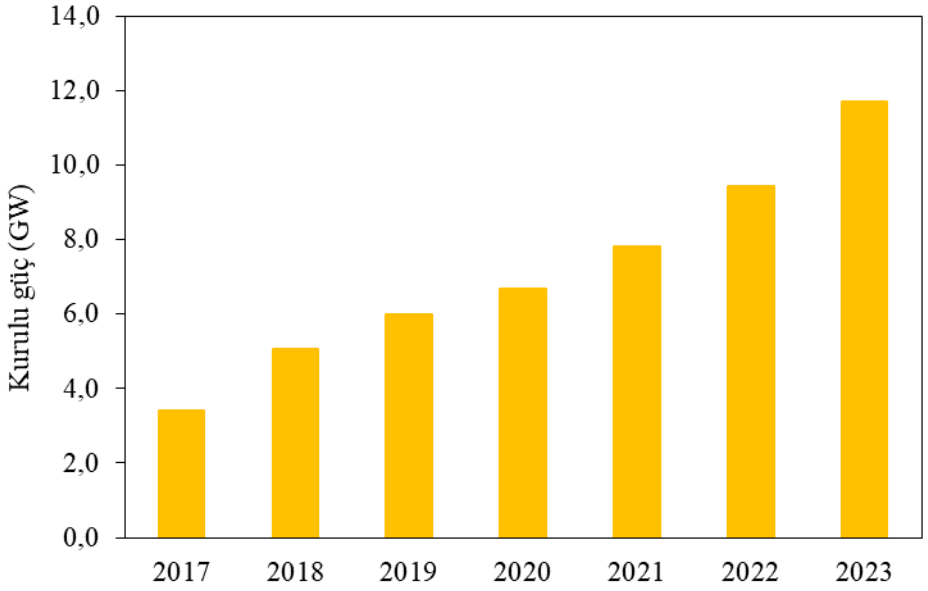


Şekil 5: Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı, 2023 (ETKB, 2022a).

Şekil 6, Türkiye güneş kurulu gücünün yıllara göre değişimini göstermektedir. Buna göre, 2017-2023 yılları arasında güneş enerjisinde sürekli bir artış yaşanmıştır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından aylık olarak hazırlanan rapora göre, 2023 yılı Aralık ayında toplam kurulu gücün %10.62'lik kısmı (11.292 Megawatt (MW)) güneş enerji santrallerinden elde edilmiştir (TEİAŞ, 2023).

Dünya Bankası tarafından yayınlanan Küresel Enerji Atlasına göre, Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneş ışınımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Güneş enerji potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeler, 30 derece kuzey ve 30 derece güney enlemleri arasındadır. Türkiye, birçok

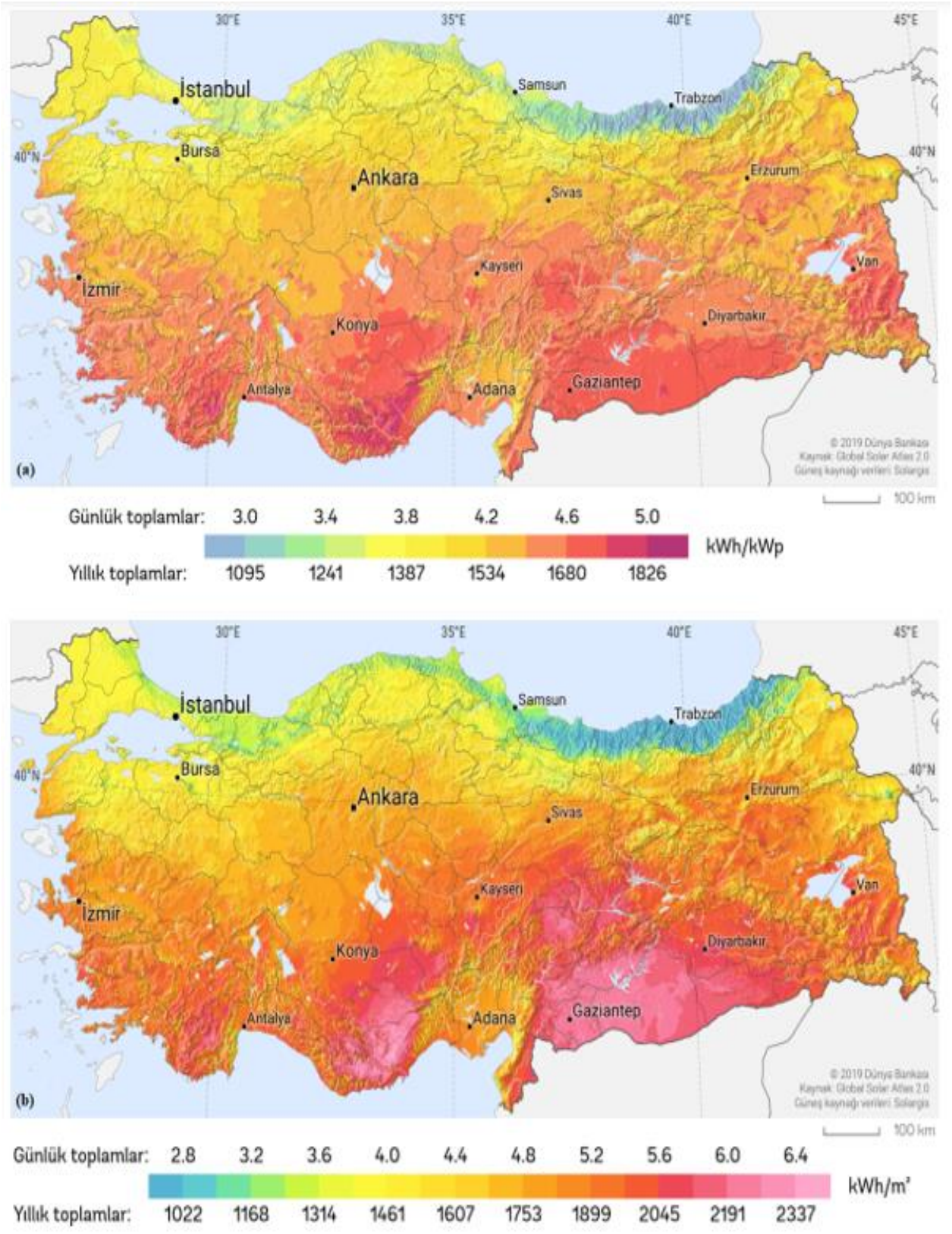
ülkeye göre daha fazla ışınım potansiyeline sahiptir, bu da metrekare (m^2) başına düşen güneş enerji üretim potansiyelini artırmaktadır (The World Bank, 2020).



Şekil 6: Türkiye güneş enerji kurulu gücü ve elektrik üretimindeki payı, 2017-2023 (The World Bank, 2020).

Kalkınma planına göre güneş enerjisi kurulu gücünün, 2025 yılı sonunda 17.9 GW, 2030 yılı sonunda 32.9 GW, 2035 yılında ise 52.9 GW'a yükseleceği öngörülmektedir. Bu projeksiyona göre, 2035 yılında hidroelektrik santrallerinin kurulu gücü 35.1 GW'e ulaşırken, rüzgâr ve nükleer santrallerin kurulu gücünün sırasıyla 29.6 GW ve 7.2 GW'a ulaşacağı beklenmektedir (CSBB, 2023).

Elektrik üretim kaynaklarının geleceğe yönelik öngörülen payları, Tablo 1'de gösterilmektedir. Buna göre, 2023 yılında elektrik üretim karışımının büyük bir kısmını oluşturan termik kaynakların (kömür ve doğalgaz (%57.7)) payı (Şekil 5), 2035 yılında %34.2'ye düşecektir. 2023 yılında, elektrik üretiminde sırasıyla %5.7 ve %10.4 paya sahip olan güneş ve rüzgâr enerjisinin toplamdaki payı, 2035 yılında kademeli olarak %33.9'a yükselecektir. Türkiye Ulusal Enerji Modelinde, yeni yatırım kararları alınırken, kaynak miktarı, genel sistem maliyetleri ve karbon emisyonları dikkate alınmaktadır. Tahminler, 2025 ile 2035 yılları arasında nükleer enerjinin bu amaçla kullanılacağını ve 2035'te %11.1'lik paya sahip olacağını göstermektedir (ETKB, 2022b).



Şekil 7: Türkiye güneş haritası (a) güneş enerjisi potansiyeli (b) güneş ışınımı (The World Bank, 2020).

Tablo 1: Türkiye elektrik üretiminde gelecek yıllara göre kaynakların payı (%) (ETKB, 2022b).

Enerji kaynağı	2025	2030	2035
Güneş	7.4	11.5	16.5
Rüzgâr	10.1	11.9	17.7
Hidrolik	21.5	19.4	17.3
Nükleer	4.9	8.2	11.1
Termik	51.7	44.5	34.2
Diğer	4.4	4.5	3.2

Son revize Ulusal Katkı Beyanına göre, 2030 yılına kadar GHG emisyonlarının %41 oranında azaltılması taahhüt edilmektedir. Bu amaçla, emisyonları en geç 2038 yılında zirveye çıkarılması ve 2053 yılına kadar net sıfıra ulaşılması planlanmaktadır (NDC, 2023). Türkiye, coğrafi konumunun bir sonucu olarak, güneş enerjisi de dahil olmak üzere önemli bir YEK potansiyeline sahiptir. 12. Kalkınma Planına göre, gelecek yıllarda ülkenin temiz enerji kaynaklarına olan talebinin artacağı, yeşil hidrojen, batarya, karbon yakalama, depolama gibi yeni teknolojilerin yaygınlaşacağı belirtilmektedir. Bununla birlikte, enerji sektöründeki gelişme ile kritik minerallere olan talebin, önemli ölçüde artacağı tahmin edilmekte olup, sürdürülebilir ve uygun maliyetli tedariğin gerçekleştirilmesi önem kazanacaktır (CSBB, 2023).

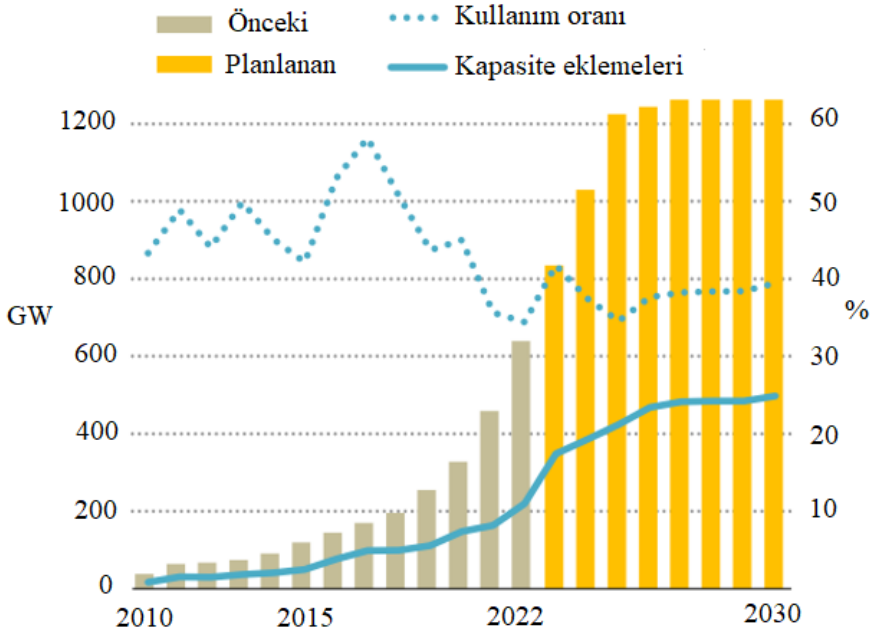
2.2. KÜRESEL GÜNEŞ PV GÖRÜNÜMÜ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER

Yenilenebilir enerjiye geçişin öncüsü olan güneş PV'sinin, dünya çapında birçok ülkede kurulumları hızla artmaktadır. PV teknolojisini kullanan enerji üretimi, güneş modülleri ile sağlanmaktadır. Bu modüller, farklı özellikteki malzemelerden üretilen hücrelerden oluşmaktadır. Birden fazla hücrenin birleşmesiyle, daha büyük ölçekte elektrik üretimine imkân veren modüller oluşturulmaktadır. Sonrasında, bu modüller birkaç metre uzunlukta bir PV dizisine monte edilmektedir ve şebeke ölçeğinde elektrik üretimi için büyük bir sistem oluşturmak üzere birbirine bağlanmaktadır (Khan ve Arsalan, 2016).

PV'lerin, düşük karbon emisyonları sebebiyle iklim değişikliğini hafifletmeye yardımcı olması (Hou ve diğ., 2016; Wong ve diğ., 2016) güvenilir, kolay konumlandırabilir, sessiz ve az bakım gerektirmesi (Corkish ve Prasad, 2006) ve üretim maliyetlerinin gün gittikçe azalması teşvik edilmesinin ana sebeplerindendir (Üçtuğ ve Azapagic, 2018). 2022 sonu itibarıyla, küresel kümülatif güneş PV kurulu kapasitesi 1047 GW'a ulaşmıştır ve bu kurulumların %59'u Asya kıtasındadır (IRENA, 2023b). Yıllık güneş PV pazarının büyümeye devam etmesi ve 2023'e

göre %7'nin üzerinde bir artışla 2024'te neredeyse 310 GW'a ulaşması beklenmektedir. Düşük modül fiyatları, büyük ölçekli ve çatı üstü PV kurulumlarının benimsenmesi ve politika desteklerinin, pazarın büyümesinde etkisinin olduğu düşünülmektedir (IEA, 2023e).

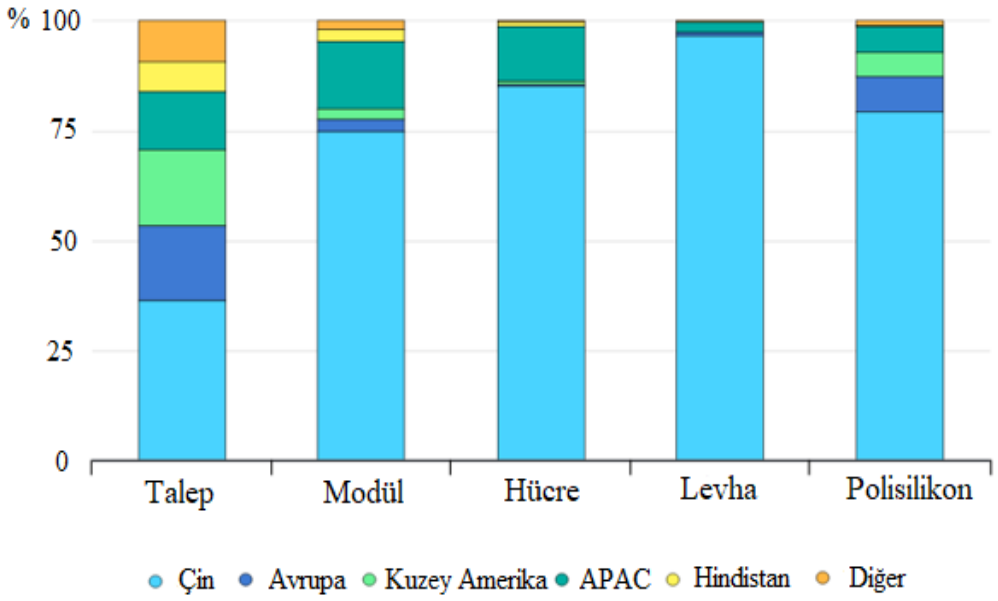
Şekil 8, 2010- 2030 yılları için küresel güneş modülü üretimi ve güneş PV kapasitesi ilavelerini göstermektedir. Buna göre, küresel güneş modülü üretim kapasitesinin, orta vadede 1.200 GW'ın üzerine çıkması beklenmektedir. PV kapasite ilaveleri ise, 2030 yılında yaklaşık 500 GW'a genişleyecektir, ancak bu da kullanım oranının %40'ın altında kalması anlamına gelmektedir (IEA, 2023e). PV üretiminde planlanan genişleme, dünya çapında yaygınlaşmasını sağlayarak enerji geçişlerini hızlandırmak için önemli bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 8: Küresel güneş modülü üretimi ve güneş PV kapasitesi eklemeleri (IEA, 2023e).

2.2.1. PV Modül Küresel Tedarik Zinciri

Çin, dünyadaki PV modülü üretiminin yaklaşık %80'sini oluşturmaktadır ve her yıl 500 GW'ın üzerinde üretim gerçekleştirmektedir. Bunu sırasıyla, Vietnam (küresel pazarın %5'i), Hindistan (%3), Malezya (%3) ve Tayland (%2) takip etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kore, Kamboçya, Türkiye, Taipei ve AB, küresel toplamın yaklaşık %1'ini oluşturmaktadır (IEA, 2023b). Şekil 9, bölge veya ülkelere göre güneş PV üretim kapasitelerini göstermektedir. ABD ve Hindistan'da politika desteğinin yol açtığı PV üretimindeki genişlemeye rağmen, Çin'in küresel tedarik zincirlerindeki konumunu (imalat segmentine bağlı olarak) koruması beklenmektedir (IEA, 2023a).

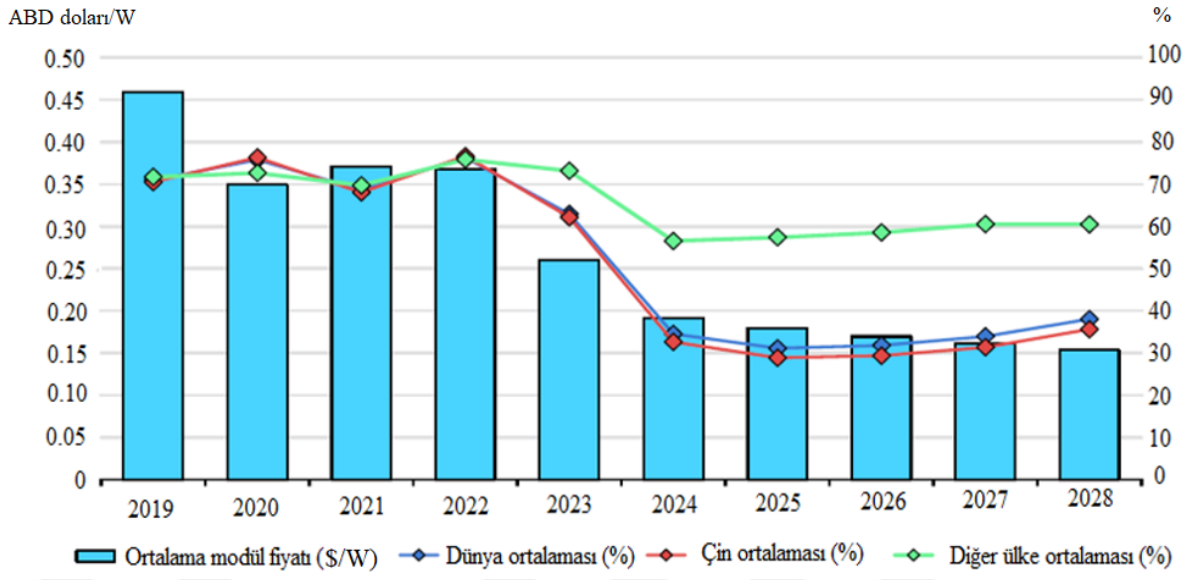


Şekil 9: Ülke ve bölgelere göre güneş PV üretim kapasitesi, 2021 (IEA, 2023a).

Levha bazlı kristal silikon (c-Si) teknolojisi, PV hücrelerinin üretiminde baskın bir teknolojidir. PV hücreleri için polisilikon üretim hacmi, 2022 yılındaki toplam polisilikon üretiminin yaklaşık %95'ini oluşturmuştur. PV hücreleri için polisilikon üretimi, 2022'de 955 bin 575 tona yükselmiştir. Yarı iletkenler için polisilikon üretimi ise, 45 bin 780 ton olmuştur. ABD, AB, Türkiye ve Hindistan'ın da aralarında bulunduğu pek çok ülke, yerli üretimi desteklemek için doğrudan sübvansiyonlar, vergi kredileri, yerel düzenlemeler ve ticari önlemler uygulamaya koymuştur. Böylece, imalat yatırımlarının arttırılması, istihdam sağlanması ve temiz enerji tedarik zincirinin güvenliğinin korunması amaçlanmaktadır (IEA PVPS, 2023).

2.2.2. PV Modül Fiyatları

2023 yılında, güneş PV modül fiyatı yıllık bazda yaklaşık %50 düşüş göstermiştir. Sektör, maliyetleri daha da düşürmeyi ve dağıtımı hızlandırmayı hedeflemektedir. 2023'ün ikinci çeyreğinde, Çin'den gelen PV modüllerinin fiyatı 2022'ye göre neredeyse %40 düşmüştür. Şekil 10, ortalama üretim kapasitesi kullanımı ve küresel PV modül fiyatlarının 2019-2028 yılları arasındaki değişimini göstermektedir. Buna göre, 2023 yılı ortalama modül fiyatı yaklaşık 0.26 ABD doları/W iken, tahmin dönemi boyunca fiyatının düşmeye devam etmesi beklenmektedir (IEA, 2023a).



Şekil 10: Ortalama üretim kapasitesi kullanımı ve küresel PV modül fiyatları, 2019-2028 (IEA, 2023a).

2.2.3. PV Hücre Teknolojileri

PV endüstrisi ve araştırmacıları, güneş hücreleri ve modülleri için maliyetleri azaltabilecek ve verimliliği artırabilecek teknolojileri sürekli olarak araştırmaktadır. Tablo 2'de güneş hücrelerinin malzeme ve yapısına göre sınıflandırılması özetlenmiştir (Cellura ve diğ., 2024). Silikon bazlı hücre teknolojisi, %95'lik bir pay ile PV pazarına hâkim durumdadır. Bu hücreler, monokristalin silikon (mono-Si), polikristalin silikon (multi-Si), ribbon-Si ve amorf silikon (a-Si) gibi özel işlemlerle tasarlanmış çok çeşitli hücre tiplerini içermektedir. Diğer silikon olmayan malzemeler ise, kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenit (CIGS), bakır indiyum diselenit (CIS), indiyum fosfit (InP), titanyum dioksit (TiO_2) veya galyum arsenit (GaAs) gibi ışığa duyarlı malzemelerdir. Perovskite güneş hücresi ise, potansiyel bir malzeme olarak araştırılmaya devam edilmektedir.

PERC güneş hücresi, son yıllarda Alüminyum Arka Yüzey Alanı (Al-BSF) gibi geleneksel hücre yapılarının yerini alarak standart bir teknoloji türü haline gelmiştir (IEA PVPS, 2024). Şekil 11, farklı hücre teknolojilerinin dünyadaki pazar paylarını göstermektedir. Uluslararası Fotovoltaik Teknoloji Yol Haritası raporuna göre, p-tipi mono-Si PERC hücresinin 2022 yılındaki pazar payı %80'dir. PERC hücre teknolojisindeki verimlilik iyileştirmeleri, n-tipi ürünlerin piyasaya sürülmesi ve çok daha büyük modül ve levhaların kullanılması ile ortalama modül verimliliğinde artış sağlamıştır (ITRPV, 2023). Gelecekteki hücre teknolojisinin, heterojunction ve tünel oksit pasifleştirilmiş temas (TOPCon) dahil olmak üzere pasifleştirici

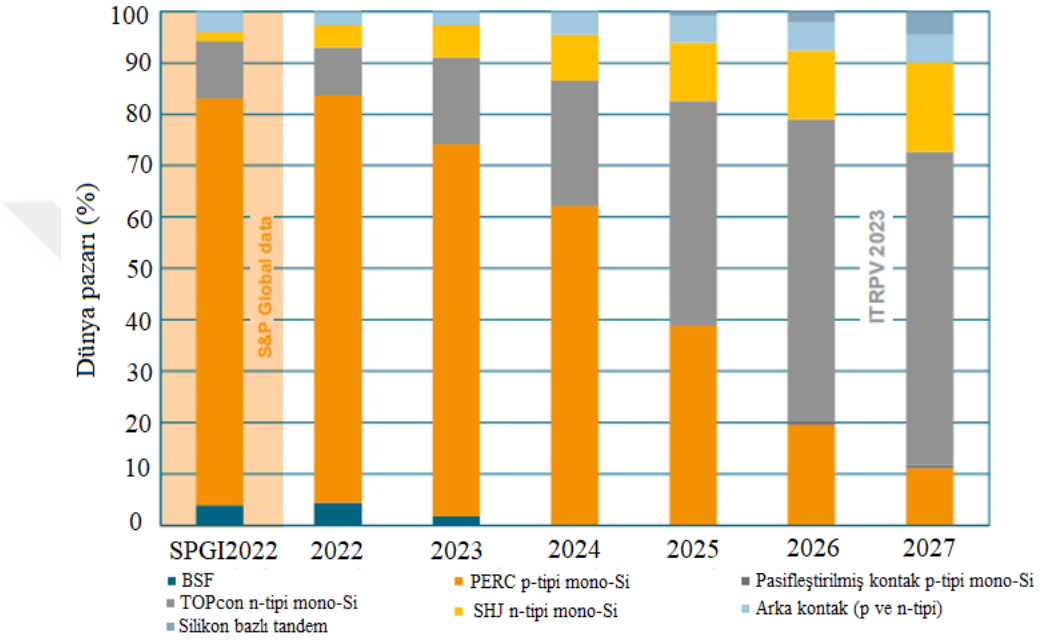
kontaklara sahip hücre teknolojilerinden oluşacağı ve bununda hücre verimliliğini %25'e çıkaracağı tahmin edilmektedir (Chen ve diğ., 2023).

Tablo 2: Hücre teknolojilerinin malzeme ve yapısına göre sınıflandırılması.

Malzeme yapısı	Silikon	Silikon olmayan
Geleneksel (monojunction ve tek yüzlü)	mono-Si multi-Si ribbon-Si	
Pasifleştirilmiş	PERC	
Çift yüzlü ve pasifleştirilmiş	PERC-çift yüzlü	
İnce film (heterojunction)	a-Si	CdTe CIGS/CIS GaAs Perovskite
Çift yüzlü ve heterojunction	Silikon bazlı çift yüzlü heterojunction	
Tandem (multijunction)	Silikon bazlı tandem	CIGS bazlı tandem Perovskite bazlı tandem

Bu değişimin en büyük etkenlerinden biri, PERC hücrelerinin ortaya çıkışı ve bu hücrelerin yarım kesilmiş hücreler gibi ortaya çıkan diğer yeniliklerle uyumluluğu olmuştur. Yarım hücreler, tamamen işlenmiş bir hücrenin gelişmiş lazer makineleriyle ikiye bölünmesiyle oluşmaktadır. Üretim açısından yalnızca küçük değişikliklerin gerekli olması sayesinde, bu hücreler hızla benimsenmektedir. Yarım hücreler, modül performansını ve dayanıklılığını artırmaktadır ve 5-6 watt (W)'lık güç artışı sağlayabilmektedir (Shravan ve Chunduri., 2019; IRENA, 2019). PERC hücrelerinin entegrasyonu sayesinde, yarım kesim teknolojiye sahip modüllerin %21.2'ye varan verimliliklere ve 460 W'a varan güç değerlerine ulaştığı görülmüştür (IEA PVPS, 2024). İleriki yıllarda pazardaki en önemli teknolojik değişimin, gelişmiş hücre tasarımının giderek daha fazla benimsenmesi ve sistem performans seviyelerine odaklanılmasıyla çift yüzeyli hücreler ve modüllerle ilgili olacağı beklenmektedir (IRENA, 2019). Bununla birlikte, son yıllarda modüllerin güç çıkışını iyileştirmek için daha büyük

levhalar kullanılmaya başlanmıştır. Levhaların genişletilmesi ile, yüzey alanı da genişleyeceğinden üretilen güç artmaktadır. Geleneksel olan M6 levha boyutundaki modüllerin, 2024 yılında piyasadan aşamalı olarak kaldırılacağı beklenmektedir. 182 mm veya M10'a eşit ve daha büyük levha boyutları halihazırda pazara hakimken, 210 mm veya G12'den büyük panellerin 2025'ten itibaren üretilmesi ve 2033 yılında %6'lık bir pazar payına sahip olması beklenmektedir.

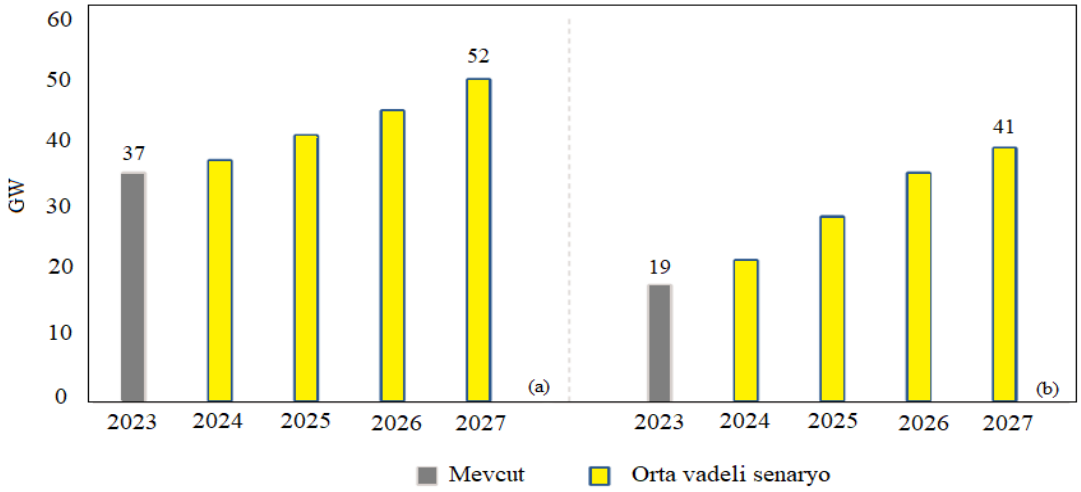


Şekil 11: Farklı hücre teknolojilerinin pazar payları (ITRPV, 2023).

2.2.4. PV Kurulumları

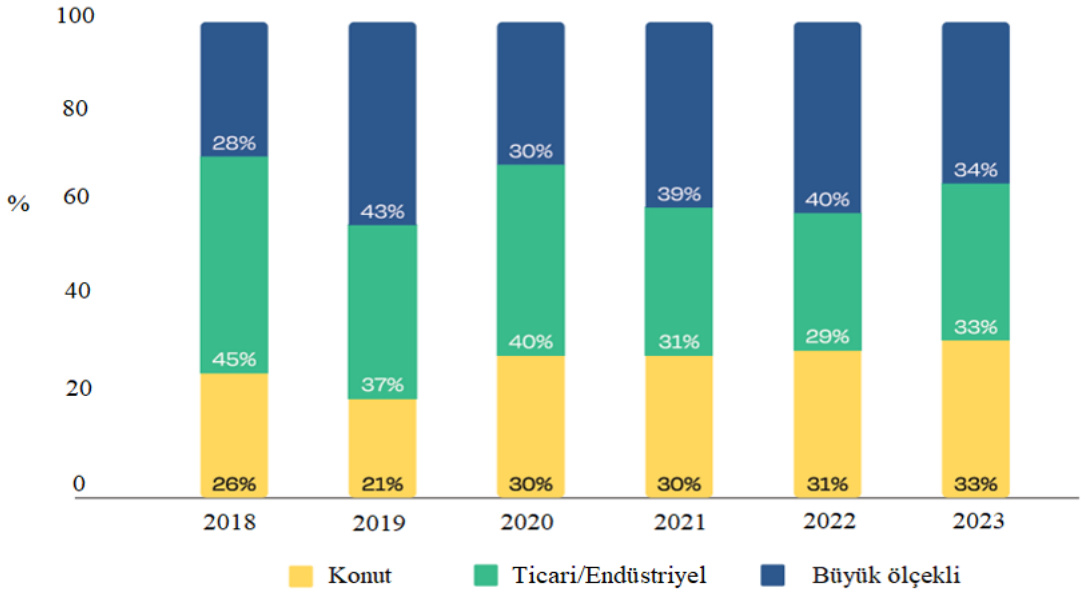
PV modülleri ile, çatı üstü ve arazi tipi olarak kurulum yapılabilmektedir. Arazi tipi PV'ler, daha çok ticari gelir elde etmek amacıyla kurulan ve enerji santrali olarak kullanılan sistemlerdir. Çatı üstü PV'ler ise, konut, ticari ve endüstriyel olarak sınıflandırılabilmektedir. Bu sistemlerin amacı, öz tüketimin karşılanmasıdır. Öz tüketimden fazla enerji olması durumunda, enerji ulusal şebekelere iletilebilmekte ve kazanç elde edilebilmektedir (Kılıç ve Kekezoğlu, 2022).

Şekil 12, 2023-2027 yılları arasındaki pazarın, çatı üstü ve şebeke ölçeğinde gelişimini göstermektedir. Dünya genelinde, çatı üstü kurulum payının kademeli olarak artacağı, 2023 yılında 37 GW olan çatı pazarının, 2027'de %41 artarak 52 GW'a ulaşması beklenmektedir (SolarPower Europe, 2023c).



Şekil 12: Çatı üstü (a) ve şebeke ölçeği (b) mevcut kurulumu ve orta vade senaryosu, 2023-2027 (SolarPower Europe, 2023c).

AB'de, güneş enerjisi geleneksel olarak çatı uygulamalarının hakimiyetindedir ve enerji krizi ölçeğin bu yönde daha da gelişmesine sebep olmuştur. Şekil 13'te, AB-27 için çatı üstü segmentlerine (konut, ticari ve endüstriyel) göre 2018-2023 yılları arasındaki kurulum payları gösterilmektedir. Çatı üstü segmentleri, 2023 yılında yıllık bazda %54 oranında büyürken, en fazla gelişme endüstriyel kurulumda olmuştur (SolarPower Europe, 2023a). Özellikle AB'de, konut ve ticari tüketicilerin yüksek fiyatlar karşısında elektrik faturalarını düşürmeye çalışması nedeniyle, çatı üstü güneş PV'sindeki büyümenin büyük ölçekli tesisleri geride bırakması beklenmektedir (IEA, 2023a).



Şekil 13: AB-27 için çatı üstü segmentlerine göre kurulum payları, 2018-2023 (SolarPower Europe, 2023a).

2.2.5. Türkiye Güneş PV Görünümü ve Geleceğe Yönelik Beklentiler

Türkiye'de, TEİAŞ tarafından yayınlanan Aralık 2022 kurulu güç raporuna göre, birincil kaynaklara göre toplam kurulu güç kapasitesi 103.809 MW'a ulaşmış olup, bunun 9.425 MW'ını PV santralleri oluşturmuştur (TEİAŞ, 2022). Hem şebeke hem de ev ölçeğinde PV panellerinin %62.4'ü multi-Si, %33.0'ı mono-Si özelliğindeyken, ev ölçekli PV'lerin oranı %0.5'ten küçüktür (Frischknecht ve diğ., 2020b: Kurşun, 2022). Tamamlanmakta olan proje miktarının, 1-1.5 GW arasında olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye'de, 11.427 elektrik üretim tesisi bulunmaktadır ve bunun 9353'ünü güneş enerjisini kaynak olarak kullanan lisanssız ve lisanslı küçük elektrik üreticileri oluşturmaktadır (TEİAŞ, 2022).

Ülkemizde güneş enerji santrallerinin kurulması ve enerji üretimi için, devlet ya da devlet destekli kurumlar tarafından gerçek kişilerin faydalanabileceği teşvikler uygulanmaktadır. Kırsal Kalkınma Yatırımlarını Destekleme Programı (KKYDP) kapsamında, kırsal bölgelerde yapılan çeşitli başvurulara (teknoloji yenileme ve/veya modernizasyon, yeni tesis, tamamlama ve kapasite arttırımı) üç milyon Türk Lirası (TL) tutarında projeye kadar %50 oranında hibe desteği sağlamaktadır. Yenilenebilir Enerji Yatırımları Finansmanı (TurSEFF) ile enerji yatırımları finanse edilmektedir. Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu tarafından, kırsal kalkınma programı kapsamında küçük ve orta büyüklükteki işletmelere, AB pazarına açılmasında destek olunmaktadır. 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanun'un 14. Madde 'sine göre, lisanssız yürütülebilecek faaliyetler kapsamında kurulan çatı ve cephe uygulamaları, YEK'e dayalı ve kurulu gücü azami 10 kW (10 kW da dahil) olan üretim tesisinden, ürettikleri elektrik enerjisini tedarik şirketlerine satan gerçek kişiler, gelir vergisinden muaf tutulmaktadır.

Bununla birlikte, taahhüt edilen "2053 Net Sıfır Emisyon Binalar' hedefi kapsamında, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği değişikliği ile binalarda yenilenebilir enerji zorunluluğu getirilmesi hedeflenmiştir. Buna göre, 1 Ocak 2023 tarihi itibari ile, bir parseldeki toplam inşaat alanı 5.000 m^2'den büyük yapılar, kullandığı enerjinin en az %5'ini güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kaynaklardan karşılanması, 1 Ocak 2025'ten itibari ile ise bu hedefin 2.000 m^2 üzeri tüm binalara yaygınlaştırılması ve kullanılan enerjinin en az %10'nun YEK'den sağlanması planlanmaktadır. 2053 yılı itibariyle ise, tüm binaların kendi enerjisinin YEK kaynaklarından sağlanması hedeflenmektedir.

10, 15 ve 20 MW kapasiteli arazi tipi PV projeleri için, 36 ilde YEKA ihaleleri uygulanırken, çatı üstü PV'lere yönelik ihaleler henüz yapılmamaktadır. Bu uygulamalarının yanında, portföy

standart uygulamalarının hayata geçirilmesi, tarife garanti süresinin ve satın alma rakamlarının artırılması, kamu çatılarına PV kurma zorunluluğu ve çatı üstü ihale programlarının etkinleştirilmesi, düşük faizli kredi gibi destekleri ile yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşılabileceği öngörülmektedir (Kılıç ve Kekezoğlu, 2022).

Türkiye'de, ticari ve endüstriyel çatı üstü PV pazarındaki başvuru sayısı geçen yıl 2.000 projeyi aşarak, yıllık 1.000 MW'ın üzerinde bir kurulu kapasiteye ulaşmıştır (SolarPower Europe, 2023c). 2023 yılında, güneş kurulu gücünün 10 GW'ı aşması ile, PV modül üretim pazarı da genişlemeye başlamıştır. Ağırlıklı olarak, malzeme tedariğinin Çin ve Avrupa'dan sağlanması ile birlikte, yeni PV üretim tesislerinin pazara dahil olması, yabancı firmaların ilgisi, yeni politika ve teşvik düzenlemeleri ticari faaliyetleri artırmıştır. Türkiye'de, yıllık toplam modül üretim kapasitesine sahip ve 12 GW'ın üzerinde olan 30'dan fazla modül üreticisi bulunmaktadır. PV kurulumları için gerekli olan sistem bileşenlerinin (çerçeve, cam, bağlantı elemanları gibi) üretimi de giderek gelişmektedir. Güneş enerjisi alanında faaliyet gösteren şirket sayısının, bin civarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu şirketlerin kapsamı, güneş modülü, inşaat, kablo ve invertör üretim şirketleri, işletme ve bakım şirketleri, akıllı şebeke, e-mobilite, blok zinciri uygulamaları, enerji yönetimi ve izleme, enerji depolama çözümleri, enerji verimliliği ve danışmanlık hizmetleri gibi alanları içermektedir (SolarPower Europe, 2023c).

Türkiye'nin 70 ilini kapsayan bir çalışmada, optimum açılı çatı tiplerinin üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Buna göre, yıllık 148 TWh'lik bir çatı üstü güneş enerjisi üretim potansiyelinin olduğu ve bunun mevcut kurulu güneş enerjisi kapasitesinin yaklaşık on katı olduğu belirtilmiştir. İstanbul, toplamda 10.4 GW'lık çatı üstü güneş enerjisi potansiyeli açısından ilk sırada yer almasına rağmen, 11.4 TWh üretim potansiyeli ile Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlere göre geride kalmaktadır (Alparslan ve Yıldırım, 2023).

2.3. ÇATI ÜSTÜ PV'LERİN ŞEHİRLERE ENTEGRE EDİLMESİ

Güneş PV'lerinin şehir alanlarına entegre edilmesi, şehirlerin iklim ve enerji planlamasını yönlendirmeye yardımcı olmaktadır. Çatı üstü PV santralleri de, akıllı şehirler çerçevesinde destek görevi görerek, binalarda yenilenebilir enerjinin uygulanmasına yönelik önemli bir fırsat yaratmaktadır. PV modülleri, bina çatıları olarak tasarlanabilmektedir ve çeşitli bina bileşenlerinin gereksinimlerini karşılamak için binalara enerji üretim üniteleri olarak

uygulanabilmektedir. Bina cephesi ve çatıları için yapı malzemesi olarak, yeni binalara giderek daha fazla entegre edilmekte (Kwak ve diğ., 2022) ve mevcut binaların güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır (Gremmelspacher ve diğ., 2021; Torres-Rivas ve diğ., 2022). Özellikle şehirlerde, kamu binaları, yeni yapılar, uygun apartman çatıları ve ulaşım bileşenlerinin PV kurulumu ile değerlendirilmesi hem enerji hedeflerine ulaşmada hem de son kullanıcıların elektrik üretim maliyetlerinin ucuzlamasında yararlar sağlayabilir.

2.3.1. Çatı Üstü PV'lerin Raylı Sistemlere Entegre Edilmesi

Raylı sistemler, PV modüllerinin entegre edilmesine olanak tanıyan birçok yapı bileşenlerini içermektedir. Bu sistemlerin karbonsuzlaştırılması, elektrifikasyonun yenilenebilir projeler veya yenilenebilir elektrik tedariki yoluyla sağlanmasına dayanmaktadır. Şehirlerde hızla büyüyen metro ağlarının bileşenlerine (durak, istasyon çatıları vs.), PV modülerinin entegre edilmesi üzerine projeler yaygınlaşırken, kullandıkları elektrik karışım payında güneş enerjisinin arttırılması yönünde de adımlar atılmaktadır. El Seoud tarafından yapılan bir simülasyon çalışmasında, Kahire'nin hızlı transit ağında kullanılan geleneksel elektrik enerjisi kaynağı yerine, güneş enerjisi kullanımının dikkate alınması gereken potansiyel bir kaynak olduğu vurgulanmıştır (El Seoud ve Samer, 2019). Jian ve Min tarafından yapılan bir çalışmada, kentsel demiryollarında güneş enerji uygulanmasının fizibilitesi, gerekliliği ve avantajları araştırılmıştır. Şebekeye bağlı bir PV sisteminin, kentsel demiryoluna uygulanmasının uygun olacağı belirtilmiştir (Jian ve Min, 2018). Hindistan'da, merkezi hükümete ait bir metro şirketi, sisteme yenilenebilir elektrik sağlamak için 2014'ten beri çatı üstü PV'leri kullanmaktadır (IRENA ve Giz, 2018).

Ülkemizde, güneş enerjisinin ulaşımda kullanılması ile ilgili çeşitli kurumlar tarafından adımlar atılmıştır. Bunlar arasında, PV modüllerinin otobüs ve durak çatılarına yerleştirilmesi, cadde aydınlatılması amacıyla kullanılması, hizmet binalarının çatısı ile açık otoparklara yerleştirilmesi gibi uygulamalar yer almaktadır. Özellikle, raylı sistem ve bileşenleri, çeşitli kurulum alternatifleri bulunmasından dolayı çatı üstü PV'lerin entegre edilmesi kapsamında değerlendirilmektedir. Bursa'da yapılan bir proje kapsamında, 30 adet Bursaray istasyonunun çatı ve üst örtülerine yıllık yaklaşık 2 MW kapasiteli bir PV santrali kurulmuştur. Halihazırda Acemler Bursaspor ve Organize Sanayi istasyonlarında üretime başlanmıştır. Geri kalan istasyonların da üretim için devreye alınması ile, elde edilen elektrik enerjisinin %47'si istasyonun iç ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılacaktır (BBB, 2022). Bir diğer uygulama ise, Adana ilinin Ulaşım Daire Başkanlığı Raylı Sistem Müdürlüğü binalarına ve 12 metro

istasyonunun çatısına yerleştirilen yaklaşık 2 MW kapasiteli PV santralidir (ADB, 2024). İstanbul'da yapılan bir proje kapsamında, Metro İstanbul A.Ş. tarafından bir tramvay durağına 8.4 kW gücünde kurulan PV santrali, 2017 yılında faaliyete geçmiştir. Bu çalışma ile elde edilen elektrik enerjisi, durağın iç ihtiyacında kullanılmaktadır. İstanbul, günlük 1.654.777 yolcu taşıyan geniş bir metro ağına sahiptir (İETT, 2019). 2017 yılı toplu taşıma yolculukları içerisindeki payın %25'ini raylı sistem ağı oluşturmaktadır. Bu günlük yolculukların %63'ü metro ile gerçekleştirilmiştir (İBB, 2017). 2030 yılında, İstanbul'da metro uzunluğunun 776 kilometre olması planlanmaktadır. Bu nedenle, metro sistemlerinde yeni enerji ve yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesiyle, daha düşük karbonlu, enerji tasarrufu ve emisyon azaltılmasında öncülük etmek mümkündür. Ancak, bu geçişlerin uzun vadede çevresel olarak sürdürülebilir olması önemlidir.

PV pazarı büyüdükçe, gelişimleri ve uygulamaları gittikçe artmaktadır. Al-Otaibi ve arkadaşları okul binasının çatısına entegre edilen ikinci nesil bir PV modül uygulamasını deneysel olarak araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu modüller için %75 ila %85'e yakın bir performans faktörü göstermiştir (Al-Otaibi ve diğ., 2015). Bir başka araştırma, Kapsalis ve Karamanis tarafından PV modüllerinin çatılar üzerindeki etkisini yıllık olarak değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Sonuçlar, çatı üstü PV modüllerinin, binanın enerji performansını önemli ölçüde etkilediğini ve mevsimsel stratejiler için ürettikleri enerjiyi artıracak etkin bir tasarıma ihtiyaç olduğunu göstermiştir (Kapsalis ve Karamanis 2015). Mevcut ve gelecekteki performanslarının yanında, son yıllarda bu uygulamaların çevre üzerindeki olası etkilerini anlamak ve bu etkilerin mümkün olduğunca azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla, enerji üretim sistemlerinin yaşam döngüsü kapsamında farklı aşamalarının (ham maddelerin elde edilmesi, üretim, ulaşım, kullanım ve yaşam ömrü sonu) çevresel etkileri ele alınmaktadır.

2.4. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME

YDD, farklı elektrik üretim sistemlerinin olası çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Quek ve diğ., 2019). YDD, bir ürün, süreç veya faaliyetin yaşam döngüsü boyunca tüm aşamalarıyla ilişkili potansiyel çevresel etkileri ele alan bir metodolojidir. YDD, Uluslararası Standartlar Organizasyonunun (ISO), ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına (ISO, 2006a, 2006b) göre amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanması olmak üzere dört ana adımdan oluşmaktadır.

Bu aşamalar çerçevesinde,

- Çalışma hedeflerinin ve uygulama kapsamının tanımı yapılmaktadır.
- Sistem girdi (malzeme, enerji ve doğal kaynaklar) ve çıktıları (havaya, suya ve toprağa emisyonlar) dikkate alınarak bir envanter oluşturulmaktadır.
- Bu envanterle ilişkili potansiyel etkiler değerlendirilmektedir.
- Çevresel açıdan en uygun stratejileri belirlemek için elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır. Böylece, analiz edilen sistem beşikten mezara yaklaşımı kullanılarak detaylı olarak incelenebilmektedir.

2.4.1. Çatı üstü PV'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Literatür İncelemesi

PV uygulamalarının enerji ve çevresel performansı, metodolojik bir çerçeve olan YDD kullanılarak geniş çapta değerlendirilmiştir. Çalışmaların çoğunun odak noktası, küçük ölçekli güneş PV uygulamalarıdır. GHG emisyonu (Alsema ve Wild-Scholten 2001; Fthenakis ve diğ., 2008; Constantino ve diğ., 2018), enerji geri ödeme süresi (EPBT) (Alsema 2012; Bhandari ve diğ., 2015), net enerji oranı (NER) (Fthenakis ve Raugei, 2017) yaygın olarak araştırılan parametreler arasındadır. Ekotoksisite, ozon tabakasının incelmesi, ötrofikasyon ve insan sağlığı gibi diğer etki kategorileri üzerine daha az çalışma bulunmaktadır (Yu ve diğ., 2017; Jia ve diğ., 2020; Santoyo-Castelazo ve diğ., 2021; Alam ve Xu, 2023).

2000 yılından günümüze kadar, silikon bazlı PV modüllerinin çatı üstü uygulamaları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ek-1'de çatı üstü PV uygulamaların çevresel etkilerini değerlendirilen ve 2000-2024 yılları arasında yayınlanan çalışmalara ait bilgiler listelenmiştir. Bu bilgiler, PV konumu ve alanı, metodoloji seçimleri (hücre teknoloji, envanter, sistem sınırı, fonksiyonel birim), teknik özellikler (modül verimliliği, güneş ışınımı, yaşam ömrü, modül gücü, sistem kurulu kapasitesi), çevresel etkiler ve değerlendirme metodunu içermektedir.

Çalışmalarda, çoğunlukla 1 kilowatt saat (kWh) elektrik üretimi fonksiyonel birim olarak kullanılmaktadır. Kapsam/sistem sınırı ile ilgili olarak, en yaygın değerlendirilen yaşam döngüsü aşamaları (i) üretim (ii) ulaşım (iii) kullanım/işletme (iv) ve (v) kullanım ömrü sonu (söküm veya hizmet dışı bırakma, ulaşım, atık yönetimi veya bertarafı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım) aşamalarıdır. Çatı üstü PV uygulamalarında, sistem dengesi bileşenleri

(BOS) de sistem sınırına dahil edilmektedir. BOS'lar genellikle kabloları, invertörleri, destek yapılarını ve konektörleri içermiştir.

Kim ve diğ. (2006) tarafından, ince film PV'nin (a-Si, CdTe ve CIS) yaşam döngüsü boyunca GHG emisyonlarını ele alan çalışmaların sistematik bir incelemesi yapılmıştır. Buna göre, çatı üstü kurulumlarda, a-Si, CdTe ve CIS'in GHG emisyonu sırasıyla 21, 14 ve 27 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır (2400 kWh/m^2/yıl, 30 yıllık kullanım ömrü).

Kannan ve diğ. (2006) tarafından, Singapur'da faaliyet gösteren ve şebekeye bağlı bir çatı üstü mono-Si güneş PV sistemi için (2.7 kWp) EPBT ve GHG emisyonu araştırılmıştır. PV sisteminin EPBT ve GHG emisyon oranları, 1635 kWh/m^2/yıl güneş ışınımı altında sırasıyla 6.74 yıl ve 217 g CO_2 eşd./kWh olduğu bulunmuştur. Ek olarak, enerji ihtiyacını azaltmak amacıyla PV modüllerinin üretiminde destekleyici yapılar için alternatif malzeme kullanılması, teknolojinin iyileştirilmesi ve PV modüllerinin verimliliğinin artırılması yönünde önerilerde bulunulmuştur.

Pacca ve diğ. (2007) multi-Si ve a-Si modülünü kullanarak, 33 kW'lık bir çatı üstü PV kurulumunun yaşam döngüsü kapsamında NER, EPBT ve GHG emisyonlarını değerlendirmişlerdir. a-Si'nin EPBT'sinin (3.2 yıl) multi-Si'ye göre (7.5 yıl) daha kısa olduğu gözlenmiştir. a-Si için hesaplanan GHG emisyonu (34.3 g CO_2 eşd./kWh), multi-Si için hesaplanandan (72.4 g CO_2 eşd./kWh) önemli ölçüde düşüktür.

Lu ve Yang (2010) tarafından, Hong Kong'daki 22 kWp'lik şebekeye bağlı bir çatı sisteminin EPBT ve sera gazı geri ödeme süresi (GPBT) araştırılmıştır. Silikonun saflaştırılması ve işlenmesi aşaması, gömülü enerji yüzdesinin %46'sını temsil etmiştir. Mono-Si PV sisteminin EPBT'si 7.3 yıl olup, yerel elektrik santrallerinin kaynak bileşimi dikkate alındığında GPBT'nin 5.2 yıl olduğu tahmin edilmiştir.

Sumper ve diğ. (2011), İspanya'da 200 kW'lık çatı üstü PV sistemi üzerinde bir YDD gerçekleştirmiştir. Daha önceki literatürde, EPBT ve GHG emisyon oranlarının değişim aralıklarının oldukça geniş olduğu bulunmuştur. EPBT'nin ömrü 1.7 ila 9 yıl arasında değişirken, GHG emisyon oranı 22 ila 180 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir. Bununla birlikte, güneş ışınımının 1408'den 1930 kWh/m^2/yıl'a artışı ile, multi-Si PV sisteminin EPBT'sinin 4.94'ten 3.67 yıla düştüğü gözlenmiştir.

Yu ve Halong (2015) tarafından, 1.2 MW'lık düz çatıya monteli bir PV sisteminin YDD'si yapılmıştır. Sistemin çeşitli hava kirletici emisyonları dışında, çevresel açılardan iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur. 30 yıllık kullanım ömrü boyunca, 40,345.84 ton CO_2 eşd. emisyon azaltımı sağlanarak, küresel ısınmanın etkilerinin azaltılabileceği belirtilmiştir.

52.7 kWp'lik çatı üstü PV sisteminin çevresel etkileri ise, Eskew ve diğ. (2018) tarafından rapor edilmiştir. Sistemin GHG emisyonu, 0.079 kg CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır ve kullanım ömrü boyunca 1.00E+06 kg CO_2 eşd.'lik bir etkiyi önleyeceği tahmin edilmiştir.

Constantino ve diğ. (2018) tarafından, toplam 1.1 MWp kurulu güce sahip on santralin iki yıllık işletme süresi boyunca üretim verileri değerlendirilerek, EPBT ve GHG emisyonu hesaplanmıştır. Buna göre, çatı üstü PV'lerin EPBT'si 2.91-4.04 yıl arasında değişirken, GHG emisyonu 58.38-73.33 g CO_2 eşd./kWh aralığında değişmiştir.

Jones ve Gilbert (2018), elektrik dağıtım ağı düzeyinde çatı üstü PV üretiminden kaynaklanan GHG emisyonlarını araştırmışlardır. Daha yüksek enerji dönüşüm verimliliğine rağmen, mono-Si modüllerinin CO_2 emisyonları, multi-Si'ye göre %31 daha yüksek bulunmuştur. Modül türü ve yıllık PV verimi için, 2015 referans yılı sonuçlarındaki farklılık 21 g CO_2 eşd./kWh ile 108 g CO_2 eşd./kWh arasındadır.

Martinopoulos ve diğ. (2020) tarafından, Avrupa genelinde 4 kWp kapasiteye sahip bir PV sisteminin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri, yatırılan enerjinin geri dönüşü ve EPBT'si hesaplanmıştır. Konut ölçekli PV'ler, yaşam döngüleri boyunca düşük çevresel etkiye sahip olmalarına rağmen, bunun kurulum yeri ve yerel elektrik karışımına bağlı olarak değişebileceğine dikkat çekilmiştir. EPBT, 1.64-5 yıl arasında değişirken, çoğu durumda 11 yıldan az olarak hesaplanmıştır.

Biswas ve diğ. (2021) tarafından, Hindistan'nın tropikal bölgesinde bir eğitim kurumunun çatısına kurulan ve şebekeye bağlı bir çatı üstü PV santralinin (1 MWp) ekolojik ayak izi hesaplanmıştır. Sistemin birim elektrik üretimi başına ekolojik ayak izi, 1.59×10^{-5} gha/kWh olarak hesaplanmış olup, şebeke elektriğine kıyasla yaklaşık olarak %95 emisyon azaltma potansiyeli olduğu belirtilmiştir.

Kouloumpis ve diğ. (2020) tarafından, Yunanistan'da aynı bölge bulunan 500 kW'lık yere monteli PV ve her biri 10 kW kapasiteli beş adet çatıya monte PV santraline ait veriler

toplanmıştır. Yere monteli PV santrali için GHG emisyonu, 42.7 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanırken, çatıya monte PV santrali için 54.2–54.5 g CO_2 eşd./kWh aralığında değişmiştir. Çatıya monte PV'lerin, karasal ekotoksisite potansiyeli haricinde, yere monte PV santraline göre daha yüksek etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.

Santoyo-Castelazo ve diğ. (2021) tarafından, Meksika'da bir binaya kurulan ve 3 kWp'lik kurulu güce sahip şebekeye bağlı farklı kristalin silikon teknolojilerini içeren (mono-Si, a-Si ve CIGS) PV sisteminin, potansiyel çevresel etkileri analiz edilmiştir. Buna göre, etki kategorilerinin çoğunda mutli-Si PV daha düşük çevresel yük sergilerken, Küresel ısınma potansiyeli (GWP), 47.156 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Çevresel yüklerin çoğu, güneş PV modüllerinin üretiminden kaynaklanmıştır.

Ali ve diğ. (2022) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, mevcut 120 adet PV santralinin operasyonel verileri dikkate alınarak GHG emisyonu hesaplanmıştır. GHG emisyonları, bölgeye göre önemli ölçüde değişiklik göstermiştir ve 25.2 ila 88.5 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir. Kullanım ömrü sonu sürecinin sisteme dahil edilmesi, ozon tükenmesinde %2, asitleşmede %16 düşüş sağlamıştır. Tüm kategorilerde, kullanım ömrü sonunun dahil edilmesinin olumlu etkisine işaret edilmiştir.

Alam ve Xu (2023) tarafından, Toronto, Ontario'da 3 kWp kapasiteli, şebekeye bağlı eğimli çatı üstü mono-Si PV santrali değerlendirilmiştir. GHG emisyonu, 79 g CO_2 eşd./kWh olarak tahmin edilmiştir. Duyarlılık analizi, modül ve montaj sistemi alanında %10'luk bir artışın, ozon tabakasının incelmesi ve kanserojen etkilerini sırasıyla %8.1 ve %2.8 artıracağını göstermiştir.

Roy ve Pearce (2024) tarafından, 7.4 kWp kapasitesinde bir çatı üstü PV santrali ile 3.5 MWp kapasitesindeki şebeke ölçekli PV santralinin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Çatı üstü PV santralinin, %21 ila %54 oranında daha az girdi enerjisine ihtiyaç duyduğu, bunun da %18 ila %59 daha az GHG emisyonu yaydığı ve kWp başına %1 ila %12 arasında değişen miktarda daha az su tükettiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, optimum şartlar altında yönlendirilmiş çatılarda bile, önemli ölçüde daha düşük EPBT'ye sahip olduğu gözlenmiştir.

Çalışmaların sonuçlarına göre, farklı güneş ışınımları, sistem kapasiteleri, modül türü ve verimlilikleri dikkate alındığında, çatı üstü güneş PV'lerinin EPBT'si konuma bağlı olarak, 0.83-11 yıl aralığında değişmiştir. Yaşam ömrü boyunca üretilen GHG emisyonları ise, 14.6-165 g CO_2 eşd./kWh aralığındadır. PV endüstrisi olgunlaştıkça, GHG emisyonları ve EPBT

değerleri Ek-1'de özetlendiği gibi azalmaktadır. Mevcut karşılaştırma, sistemlerin GHG emisyonları açısından önemli farklılıklar olabileceğini göstermektedir.

Uygulamalarda en fazla değerlendirilen hücre teknolojisi silikon bazlıdır. Birçok çalışma, silikon bazlı modül türlerinin çevresel performansını ortaya koymuştur ve çeşitli PV malzemelerinin YDD sonuçlarını farklı konumlar için özetlemiştir. Mevcut ve gelişmekte olan PV'lerin malzeme, üretim süreçleri ve elektriksel özellikleri farklılık göstermektedir (Rabaia ve diğ., 2021). Ludin ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, silikon, ince film, boyaya duyarlı güneş hücresi (DSSC), perovskit ve kuantum noktaya duyarlı güneş hücresi (QD) PV teknolojileri üzerine yapılan YDD çalışmaları analiz edilmiştir. Sonuçlar, mono-Si PV teknolojisinin, diğer güneş PV teknolojileriyle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji tüketimi, EPBT ve GHG emisyon oranına sahip olduğunu göstermiştir.

PV hücre teknolojisindeki ilerlemeler, EPBT'de gelişmelere yol açmıştır. Bu önceki çalışmalarda doğrudan karşılaştırılmayan montaj sistemleriyle de bağlantılıdır (Roy ve Pearce, 2024). Silikon teknolojisi için, saflaştırma ve kristalizasyon süreçlerindeki yüksek enerji tüketimi, EPBT artışına neden olmaktadır. DSSC, perovskite ve QD gibi gelişmekte olan hücre teknolojileri, düşük işleme sıcaklığı, az hammadde gerektirmesi ve basit üretim tekniği sebebiyle, geleneksel teknolojilere göre çeşitli avantajlara sahiptir. Böylece, enerji kullanımı ve EPBT azalmaktadır (Ludin ve diğ., 2018).

Modül verimliliğinin artırılması, GHG emisyonlarının azalmasına katkı sağlamıştır (Pacca ve diğ., 2007). Daha yüksek verimliliğe sahip modüller, aynı miktarda güneş enerjisinden daha az yapısal malzeme ile daha fazla elektrik üretebilmektedir (Ludin ve diğ., 2018). Reichel ve arkadaşları (2022) üç farklı lokasyonda üretilen ve iki farklı güneş modülü tasarımına sahip PV'lerin CO_2 emisyonlarını değerlendirmiştir. Çift cam modüllerin, cam arka tabaka modüllerine göre daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu ve AB ile Almanya'daki üretimin, Çin'deki üretime göre daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir (Reichel ve diğ., 2022). Farklı malzemelerin EPBT ve GHG emisyonlarına ilişkin araştırma sonuçlarından da görülebileceği gibi, CdTe gibi ince film malzemeleri daha düşük karbon emisyonuna ve daha hızlı geri ödeme süresine sahiptir. Geleneksel kristalin silikon hücrelerin, güneş takip sistemleri veya binaya entegre PV sistemler kullanılarak EPBT'leri azaltılabilmektedir (Yao ve Zahou. 2023).

PV modüllerinin üretimi, çalışmalarda en yaygın değerlendirilen aşamadır. Üretim aşaması, hücre teknolojilerinin türüne bakılmaksızın çeşitli çevresel etkilerin önemli bir kısmından sorumludur ve yaşam döngüsü boyunca sıcak nokta olarak tanımlanmaktadır. Üretim aşamasındaki GHG emisyonları, malzeme üretiminden veya üretim sürecinin kendisinden kaynaklanabilmektedir. Kristalin silikon güneş hücreleri için, silikonun üretimi ve işlenmesi enerji yoğun süreçlerdir (Muteri ve diğ., 2020). İnce film ve organik güneş hücre üretim süreci, silikon işleminden daha az enerji gerektirse de, malzemelerde yer alan enerji, en önemli GHG emisyon kaynağıdır. Elektrik tüketiminin, kristalin silikon, ince film ve organik hücreler de dahil olmak üzere tüm güneş hücre nesilleri üzerinde önemli etkisi vardır.

Çevresel etki sonuçları, çalışmanın amacı, fonksiyonel birim, ana girdi malzemelerinin üretimi için varsayımlar, kurulum yeri (cephe, çatı veya zemin), yıllık ışınlama, hücre teknolojisi, modül verimliliği ve bozulma oranı, PV'nin ömrü, BOS, beklenen yıllık elektrik üretimi, verilerin zaman çerçevesi, yaşam döngüsü aşamaları, YDA metodu, YDA yazılım aracı (SimaPro, GaBi gibi), veri tabanları (Ecoinvent, gibi), modellenen üretim yeri ve elektrik kaynağı (Frischknecht ve diğ., 2011; Ludin ve diğ., 2018; IEA PVPS 2020), montaj yapısı, çerçeve (olan veya olmayan), bağlantı türü (şebeke veya izole) (Constantino ve diğ., 2018) gibi birçok faktörden etkilenmektedir.

Çalışmalar, sürdürülebilir modül tasarımlarını teşvik etmek için güncel envanterlerin, farklılaştırılmış elektrik verim hesaplamalarının ve güncel elektrik karışım modellerinin önemini vurgulamaktadır. Hücre teknolojisindeki gelişmeler ve ilerlemeler ile, son yıllarda PERC gibi gelişmiş PV modüller incelenmeye başlanmıştır (Luo ve diğ., 2018; Brivio ve diğ., 2024). PERC hücre teknolojisi, bu çalışmanın kapsamını oluşturduğundan, Bölüm 2.4.2'de detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2.4.2. PERC Hücrelerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Literatür İncelemesi

Literatürde mevcut çalışmaların çoğu, geleneksel silikon bazlı hücre teknolojisinin YDD kapsamında değerlendirilmesine odaklanmıştır. PERC modül üretimi ve uygulamalarının, çevresel etkilerine odaklanan oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır. Tablo 3'te, PERC hücre teknolojisi ve uygulamalarının etkilerini, YDD kapsamında ele alan çalışmalar özetlenmiştir.

Luo ve diğ. (2018), çok kristalli silikon levhalardan yapılan Al-BSF ve PERC modüllerinin, çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Lunardi ve diğ. (2018), yükseltilmiş metalurjik dereceli

silikon (UMG-Si), güneş dereceli silikon (SGS) ve elektronik dereceli silikondan (EGS) yapılan Al-BSF ve PERC modüllerinin çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Ji ve diğ. (2021), Çin'deki gerçek üretim verilerini kullanarak 158.75 mm, 166 mm ve 210 mm boyutundaki silikon levhalarla hazırlanan tek yüzlü ve çift yüzlü PERC modüllerinin YDD'sini karşılaştırmıştır.

Müller ve diğ. (2021) mevcut envanter verilerini kullanarak, hem cam-arka tabaka hem de çift cam modül tasarımına sahip p-tipi mono-Si PERC modülünün, çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Bununla birlikte, üretimin Çin, Almanya ve AB'de yapıldığını varsayarak, üç lokasyon için değerlendirmiştir. Bu çalışma, tam hücre formatını kullanırken, Friedrich ve diğ. (2020) yarım hücre formatını kullanmıştır.

Khan ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada, p-tipi PERC PV (M6 levha Cz-Si) sisteminin GWP'si, üretim yerinin güncel elektrik karışımı, kurulum yeri ve kullanım ömrü dikkate alınarak araştırılmıştır. Müller ve arkadaşlarının aksine, bu çalışmada GWP'nin azaltılması için gelişmiş senaryolar kullanılmıştır.

Brivio ve diğ. (2024) ise, yere monteli PV (84 MW) ve konut tipi çatı üstü PV (3 kW) santralinin, 1 kWh'lik elektrik üretmesi sonucu oluşan çevresel faydalarının karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Bu amaçla, PERC hücre teknolojisi değerlendirilmiştir. Aynı zamanda, PV bileşenlerinin (mono-Si külçe, levha, hücre ve modül) üretiminde kullanılan enerji karışımının, YDD sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Çin ve Avrupa üretim lokasyonları araştırılmıştır.

Jia ve diğ. (2021) çalışması silikon levhaların, tek ve çift yüzlü PERC hücresinin yaşam döngüsü GHG emisyonlarına, yaklaşık %47 ila %51 oranında katkı yaptığını göstermektedir. Lunardi ve diğ. (2018) EGS ve mono-Si üretim aşamalarının, toplam yaşam döngüsü GHG emisyonlarının %70'ine katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Khan ve diğ. (2024), üretim lokasyonunun elektrik karışımı, veri toplama yılı, kurulum lokasyonu ve PV'nin ömrüne bağlı olarak, aynı PV sistem konfigürasyonlarının GWP'sinin, 54.8 ile 6.6 g CO_2 eşd./kWh arasında değişebileceğini belirtmiştir. Bu kapsamlı analiz, üretim lokasyonunun stratejik planlaması yoluyla, yaklaşık %62'lik bir GWP azaltma potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir. Çin, Almanya ve Norveç üretim lokasyonları için üretilen elektrik, toplam GWP'nin sırasıyla yaklaşık %36, %31 ve %3'ünü oluşturmuştur.

Tablo 3: PERC PV modülünün YDD'sine ilişkin çalışmalar.

Referans	Ülke (Üretim/Kurulum)	Kurulum tipi	Hücre Teknoloji	Envanter	Sistem sınırı	Modül verimliliği (%)	Işınlama (kWh/m^2/yıl)	Yaşam ömrü (yıl)	Modül gücü (Wp)	Fonksiyonel birim	Kurulum kapasitesi	Çevresel Etkiler	Metot	GHG (g $CO_{2\ eşd.}$/ kWh)	EPBT
Lunardi ve diğ., 2018	Çin Kurulum: Avrupa	-	mono-Si AL-BSF PERC	Ecoinvent IEA PVPS 2015 Literatür	Beşikten mezara (BOS, ulaşım ve geri dönüşüm hariç)	18.0-19.1 (PERC) 16.5-17.1 (Al-BSF)	1700	25	-	1 kWh	-	+	Birden fazla	19.8-26.0	1.5-1.3
Luo ve diğ., 2018	Singapur	Çatı entegreli	multi-Si Al-BSF PERC (mono-facial, bi-facial) G-G ve G-BS modül tasarımı	Ecoinvent v3.3, IEA PVPS 2015	Beşikten mezara BOS, (Ulaşım ve kullanım ömrü sonu hariç)	15.9 (Al-BSF) 16.7 (mono-facial) 16.2 (bi-facial)	1580	30 (G-G) 25 (G-BS)	238-244	1 kWh	-	-	-	30.2 (Al-BSF) 29.2 (mono-facial) 20.9 (bi-facial)	1.1 (Al-BSF) 11.08 (mono-facial) 1.01 (bi-facial)
Jia ve diğ., 2021	Çin	Yere monte	PERC (mono-facial, bi-facial)	Endüstri Ecoinvent v3.5	Beşikten Mezara (BOS hariç)	20.13-20.24	1573	25-30	340-500	1 kWh	-	+	Birden fazla	26.5-27 19.3-20.0	-
Friedrich ve diğ., 2021	Çin, Avrupa, Norveç Kurulum: Avrupa	-	mono-Si, PERC	Endüstri Ecoinvent v3.6	Kullanım için hammade tedariği, BOS (Kullanım ömrü sonu hariç)	20.1	1331	30	-	1 kWh	-	-	-	16.5 (Norveç) 23.2 Avrupa) 45.3 (Çin)	-
Müller ve diğ., 2021	Çin, Almanya ve Avrupa Kurulum: Avrupa	-	mono-Si, PERC	Endüstri Ecoinvent v3.7	Beşikten mezara (BOS ve bakım hariç)	19.8 (G-BS) 19.4 (G-G)	1391	30 25.4 (G-BS) 29.9 (G-G)	366	per kWp kWh	-	+	E.F 3.0	13–30	-
Khan ve diğ., 2024	Çin, Almanya ve Norveç Kurulum: Avrupa	-	PERC	Ecoinvent v3.8 Literatür	Beşikten mezara (Kullanım ömrü sonu hariç)	20.11	1331	25, 30, 40		1 kWh	-	GHG	-	24.0-54.8 (Çin) 13.6-31.1 (Almanya) 6..6- 23.1 (Norveç)	-
Brivio ve diğ., 2024	Çin Avrupa Kurulum: İtalya	Yere mnte Çatı üstü	PERC (mono-facial)	Endüstri Ecoinvent v3.8 Literatür	Beşikten mezara	21.16	1819	30	460	1 kWh	84 MW 3 kW	+	E.F 3.0	17.4 21.7	-
Bu çalışma	Çin Avrupa Türkiye Kurulum: İstanbul	Çatı üstü	mono-Si PERC	Endüstri Ecoinvent v3.7 Literatür	Beşikten mezara	21.16		25	450	1 kWh	1956.15 kWp	+	E.F 3.0		

Luo ve diğ. (2018), geleneksel modül yapısına sahip Al-BSF, geleneksel ve çerçevesiz çift cam modül yapısına sahip PERC hücresinin, GHG emisyonunu sırasıyla 30.2, 29.2 ve 20.9 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplamıştır. GHG emisyonunun büyük bir kısmı, silikon ve levha üretimi sırasında yayılmıştır. Al-BSF'den PERC hücre teknolojisine geçişin, GHG emisyonlarında %3.3'lük bir azalma sağlayabileceği gösterilmiştir.

Müller ve diğ. (2021), Çin, Almanya ve AB'de üretilen cam-arka tabaka modülünün GHG emisyonu sırasıyla 810 kg CO_2 eşd./kWp, 580 kg CO_2 eşd./kWp ve 480 kg CO_2 eşd./kWp olarak hesaplanmıştır. Çift cam modülün ise sırasıyla 750 kg CO_2 eşd./kWp, 520 kg CO_2 eşd./kWp ve 420 kg CO_2 eşd./kWp'lik emisyonla ilişkili olduğu gözlenmiştir. Üretilen elektriğin karbon yoğunluğu, üretim lokasyonuna ve elektrik verimi hesaplama yöntemine bağlı olarak, 13 ile 30 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir (BOS hariç). Tüm etki kategorileri ve üretim lokasyonlarına göre çift cam modül tasarımı, düşük modül verimliliği nedeniyle biraz daha yüksek referans akışına rağmen, daha düşük etki göstermiştir.

Brivio ve diğ. (2024) ise, bir PV sisteminin 1 kWh'lik elektrik üretime yönelik en büyük katkının silikon tedarik zincirinden, özellikle de yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan silikon levhaların üretilmesine yönelik Czochralski (Cz) prosesinden geldiğini ortaya koymaktadır. Modül montajının ve özellikle silikon levha üretiminin, daha yeşil elektrik karışımına sahip bir ülkede yapılmasının iklim değişikliği kategorisinde %30 oranında iyileşmeye yol açabileceği belirtilmiştir. Modüllerin yanı sıra, invertördeki elektronikler de özellikle kaynak kullanımı, mineral ve metal kategorisinde çevresel etkilerin önemli bir kısmından sorumlu olmuştur.

İncelenen vaka çalışmalarında, PV üretim aşamalarından kaynaklanan insan toksisitesi açısından farklılıklar bulunmaktadır. Silikon bazlı hücrelerin kanser olan ve kanser olmayan insan toksisitesi, EGS, mono-Si, PERC hücre üretimi, modül montajı ve kurulumu arasında neredeyse eşit olarak paylaşılmıştır (Lunardi ve diğ., 2018). Jia ve diğ. (2021) en önemli kanser etkisinin, alüminyum çerçevelerden kaynaklandığını, ardından da silikon plakaların geldiğini belirtmiştir (Jia ve diğ., 2021). Alüminyum çerçeve üretimi, tek yüzlü silikon bazlı güneş hücresi etkilerinin %45'ini ve çift yüzlü silikon bazlı güneş hücresi etkilerinin %34'ünü oluşturmaktadır. Alüminyum çerçevelerin kanserojen etkisi, birincil alüminyumun tedarik zincirindeki boksit sindiriminden elde edilen kırmızı çamurun bertarafından kaynaklanabilirken (Zhang ve diğ., 2017), silikon levhaların etkisi çoğunlukla kömür bazlı elektrik tüketiminden kaynaklanabilmektedir (Jia ve diğ., 2021).

PERC hücre ve modül üretimi, toplam tatlı su toksisitesi etkilerinin %70'inden sorumluyken, silikon levhalar %60-70'ine katkıda bulunmuştur (Lunardi ve diğ., 2019). Jia ve arkadaşlarına göre ise bu etki, esas olarak silikon levha üretiminden kaynaklanmıştır (47%-57%) (Jia ve diğ., 2021). Lunardi ve diğ. (2018) tarafından en yüksek abiyotik tükenme etkisinin, modül montajından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunu, PERC hücre, levha, EGS ve mono-Si takip etmiştir. Modül üretimi aşamasında kullanılan cam ve alüminyum gibi malzemeler, hücre imalatı aşamasında ise bakır ve gümüş gibi metallerin tüketilmesi önemli abiyotik tükenme etkisi kaynaklarıdır. Bir diğer önemli ADP etki kaynağının, gümüş bazlı metalizasyon macunu olduğu belirtilmiştir (Lunardi ve diğ., 2018; Jia ve diğ., 2021).

Silikon bazlı PV modül üretimi sırasındaki enerji tüketiminin, çevresel etkilerin ve oluşan GHG emisyonlarının azaltılabilmesi için, sürekli olarak teknik atılımların yapılması kritik öneme sahiptir. Bu amaçla geleneksel hücre teknolojilerinin yerini alan PERC hücre teknolojisinin, daha iyi anlaşılması, farklı uygulama çalışmalarının değerlendirilmesi ve yaşam döngüsü boyunca her aşamayı dikkate alan kapsamlı analizlerin yapılmasına ihtiyaç vardır.

2.4.3. Çatı Üstü PV'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-Türkiye

Ülkemizde, fosil yakıtlardan (Atilgan ve Azapagic, 2015) ve YEK'den elde edilen elektriğin (Demir ve Taşkın 2013; Atilgan ve Azapagic, 2016), yerel koşullar altında şebeke ölçekli yere monteli bir PV santralinin (Kurşun, 2022) yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri incelenmiştir. Uzak bölgelerdeki sulama sistemlerinde, güneş enerjisi kullanılması ve dizel pompalamaya göre ekonomik üstünlüğü (Şenol ve diğ. 2012), coğrafi bilgi sistemleri (GIS) aracılığıyla güneş PV'lerine yönelik uygun konumun belirlenmesi (Colak ve diğ., 2020), ısıtma için fosil kaynaklar yerine güneş enerjisi kullanan konutların çevresel etkilerinin iyileştirilmesi (Adam ve diğ., 2016) gibi güneş enerjisi uygulamalarının farklı yönlerini inceleyen çalışmalar yapılmıştır.

Kutlu ve diğ. (2022) tarafından, Ankara'da çatı üstü PV potansiyeli ilk kez araştırılmıştır. Helioskop yazılımı kullanılarak, farklı verimliliklere ve boyutlara sahip beş modül; mono-Si PERC (M1), yarım kesim mono-Si PERC (M2), çift yüzeyli mono-Si PERC (M3), çift yüzeyli yarım kesim mono-Si PERC M4) ve ince film (M5)) modellenmiştir. Ele alınan PERC modüllerinin gücü, 330 Watt'tır. Konut, kamu ve ticari binalara yönelik, toplam PV potansiyeli sırasıyla 1.15 TWh/yıl, 55 GWh/yıl ve 26.8 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Konutlarda, M2 ve

M5 en iyi sonucu gösterirken, kamu ve ticari binalarda M2 ve M3 modülleri en iyi performansı göstermiştir.

Caglayan (2023) tarafından, bir süt çiftliğinin yıllık ortalama 45.327 kWh'lik enerji talebini karşılamak amacıyla, şebekeye bağlı 216 kWp'lik bir çatı üstü PV santralinin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Yıllık elektrik üretim miktarı 315.152 kWh olan santralin, yıllık 127.419 ton karbondioksit (tCO_2) emisyon salımının engelleneceği tahmin edilmiştir. Aktas ve Ozenc (2024) tarafından ise, Siirt ilindeki bir üniversiteye 416 kWp güç sağlamak için kurulan şebeke bağlantılı bir çatı üstü PV santralinin teknik, ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır. Çatı üstü PV uygulamasının, yaklaşık 6852 tCO_2 emisyonunun azaltılmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Üçtuğ ve Azapagic (2018) tarafından, multi-Si PV ve lityum iyon bataryasından oluşan bir hibrit çatı üstü PV sisteminin çevresel etkileri, yaşam döngüsü boyunca ilk kez araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı illerdeki bireysel çatı üstü PV kurumlumları, ulusal düzeyde değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, hibrit sistemden kaynaklanan çevresel etkilerin şebeke elektriğine kıyasla 1.6 ila 82.6 kat arasında değişmekle birlikte, daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte bu çalışmalar, PERC PV modülüne yönelik bir değerlendirmeyi içermemiştir.

PV sektör ve uygulamalarının hızlı genişlemesi göz önüne alındığında, bu sistemlerin yaşam döngüsü kapsamında sıcak noktalarının belirlenmesi ve ülke koşullarında değerlendirilmesi önemlidir. Yeni hücre teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla, yüksek verimliliğe sahip hücre teknolojileri artık PV uygulamalarına dahil edilmektedir. Bu çalışma ile, raylı sistem bileşenlerine entegre edilecek olan ve PERC hücre teknolojisinin kullanıldığı bir çatı üstü PV uygulamasının, mevcut şebeke elektriği yerine kullanılmasıyla, enerji tüketimi ve çevresel etkilerin azaltımına olan katkısı yaşam döngüsü metodolojisi kapsamında ilk kez değerlendirilmiştir.

3. YÖNTEM

Çalışma kapsamında incelenen çatı üstü PV santralinin çevresel etkilerinin analizi, YDD metodolojisi aşamaları takip edilerek yapılmıştır. Bu amaçla, ISO 14040-44 standartları, IEA tarafından yayınlanan PV sistemlerine yönelik yaşam döngüsü envanteri ve PERC modül teknolojisine yönelik vaka çalışması özelinde hazırlanmış kılavuzlardan yararlanılmıştır (ISO, 2006a, 2006b, IEA PVPS, 2020; IEA PVPS, 2024).

3.1. AMAÇ VE KAPSAM TANIMLANMASI

Amaç ve kapsam tanımında, fonksiyonel birim, sistem sınırı, referans akışı, varsayımlar ve sınırlamalar dahil olmak üzere ayrıntılı bilgilerin verilmesi ve değerlendirme çerçevesinin oluşturulması sağlanmaktadır (Yu ve Halong 2015). Bu tez çalışmasının amacı, i) raylı sistem yerleşkesinde bulunan bir atölye binasının çatısına entegre edilmesi planlanan PV santralinin çevresel etkilerini tahmin etmek, ii) uygulamanın sıcak noktalarını belirlemek iii) şebeke elektriği ile karşılaştırarak uygulamanın çevresel faydalarını gözlemlemek ve ıv) alternatif senaryolar ile karşılaştırarak uygulamanın etkilerini değerlendirmektir.

3.1.1. Uygulama Sahası

Uygulamanın yapılacağı atölye binası, İstanbul'un Ümraniye ilçesi Parseller Mahallesinde inşa edilen Behiç Erkin Yerleşkesinde bulunmaktadır. Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan İstanbul (41° Kuzey ve 28° Doğu koordinatlarında), ekonomik ve endüstriyel açıdan en gelişmiş mega şehir olmasının yanı sıra ulaşım, üretim ve lojistik açısından da önemli bir merkezdir. Kuzeyde Karadeniz ile güneyde Marmara Denizi arasında stratejik bir konuma sahip olup, İstanbul Boğazı ile Avrupa ve Asya kıtaları arasında bağlantı görevi görmektedir. İlde, %66'sı otomobil, %15'i kamyonet, %12'si motosiklet, %3'ü kamyon, %2'si minibüs, %1'i traktör, %1'i otobüs ve %1'i özel amaçlı olmak üzere 5 milyon 406 bin 820 adet motorlu taşıt bulunmaktadır (TÜİK, 2023).

İstanbul genelinde kent içi raylı sistem uzunluğu 328.70 kilometreye (km) ulaşmıştır. Sistemin 215.15 km uzunluğundaki 18 hattı, Metro İstanbul Anonim Şirketi (A.Ş) tarafından işletilmekte

olup, günlük 2.5 milyonu aşan bir yolcu sayısına hizmet vermektedir (Metro İstanbul, 2023). İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Anadolu Yakası Raylı Sistem Şube Müdürlüğü'nün kullanımında olan yerleşke, 154.8 dönümlük alana sahiptir. 78 dönümlük kapalı alanı ve 560 m^2'lik operasyon alanı bulunmaktadır. Yerleşke, kontrol merkezleri, tren park alanları, trafo yapıları, bakım atölyesi ve idari tesisleri içerisinde barındırmaktadır. Metro hatlarının (M5, M8 ve M12) kontrol merkezi olarak, 2022 yılından beri hizmet vermeye devam etmektedir. Şekil 14'te, yerleşke alanı ve uygulamanın yapılacağı atölye binasının üstten görünüşü gösterilmektedir (Koordinatlar; 41°02'07.3"K, 29°09'05.1"D).



Şekil 14: Uygulamanın yapılacağı atölye binasının üstten görünüşü ve depolama sahası (Google Earth, 2024).

3.1.2. Çatı Üstü PV Santrali Proje Bilgileri

Tablo 4'te çatı üstü PV santrali projesine ait teknik bilgiler, Tablo 5'te ise kurulum için gerekli olan bileşenler ve özellikleri özetlenmiştir. 1956.15 kWp kurulu gücüne sahip çatı üstü PV santrali, şebekeye bağlıdır ve atölye binasının düz çatısına kurulması planlanmaktadır. Buna göre, 10.868 m^2 çatı alanına entegre edilecek uygulama için, 4347 adet PV paneli, 16 adet invertör, montaj yapısı, ekipmanlar ve 39123 metre DC kablosu kullanılacaktır. Öngörülen sistem ömrü, güneş panellerinin ömrüne karşılık gelen 25 yıldır.

Tablo 4: Çatı üstü PV santrali projesine ait teknik bilgiler.

Proje Bilgileri	**İlgili Değerler**
Trafo Kurulu Gücü (kVA)	9720
Sözleşme Gücü (kWe)	9720
Panel Gücü	450W
Proje Kurulu Gücü	1600 kWe AC / 1956.15 kWp DC
Kullanılabilir Çatı Alanı (m^2)	10.868
Yıllık Üretim Toplamı (kWh)	2.254.966
Sistem Ömrü	25 yıl

Tablo 5: Kurulum için gerekli olan bileşenler ve özellikleri.

Malzemeler/Hizmetler	**Miktar**	**Birim**
Güneş paneli	4347	Adet
DC Ekipmanları		
DC Solar Kablo Tedarik ve Montajı	39123	Metre
DC Kablo Tavası ve Bağlantı Ekipmanları	1	Set
DC Kablo Spiralleri ve Ekipmanları	1	Set
MC4 Solar Konnektör	1	Set
İnvertör	16	Adet
AC Ekipmanları		
AC Kablo Tedarik ve Montajı	1	Set
AC Kablo Tavası ve Ekipmanları	1	Set
GES ADP Panosu	1	Adet
Uyarı Levhaları ve Etiketlemeler	1	Set
Kablo Spiralleri ve Geçiş Boruları	1	Set
Konstrüktif Elemanlar		
Taşıyıcı Konstrüksiyon ve Panel Bağlantı Elemanları	1956.15	kWp
Topraklama ve Koruma Ekipmanları		
Galvanizli Şerit	1	Set
Topraklama Çubuğu	1	Set
Ölçüm ve İzleme Sistemi		
SCADA Sistemi	1	Adet
Yatırımcı İzleme Sistemi	1	Adet
Çift Yönlü Sayaç	2	Adet

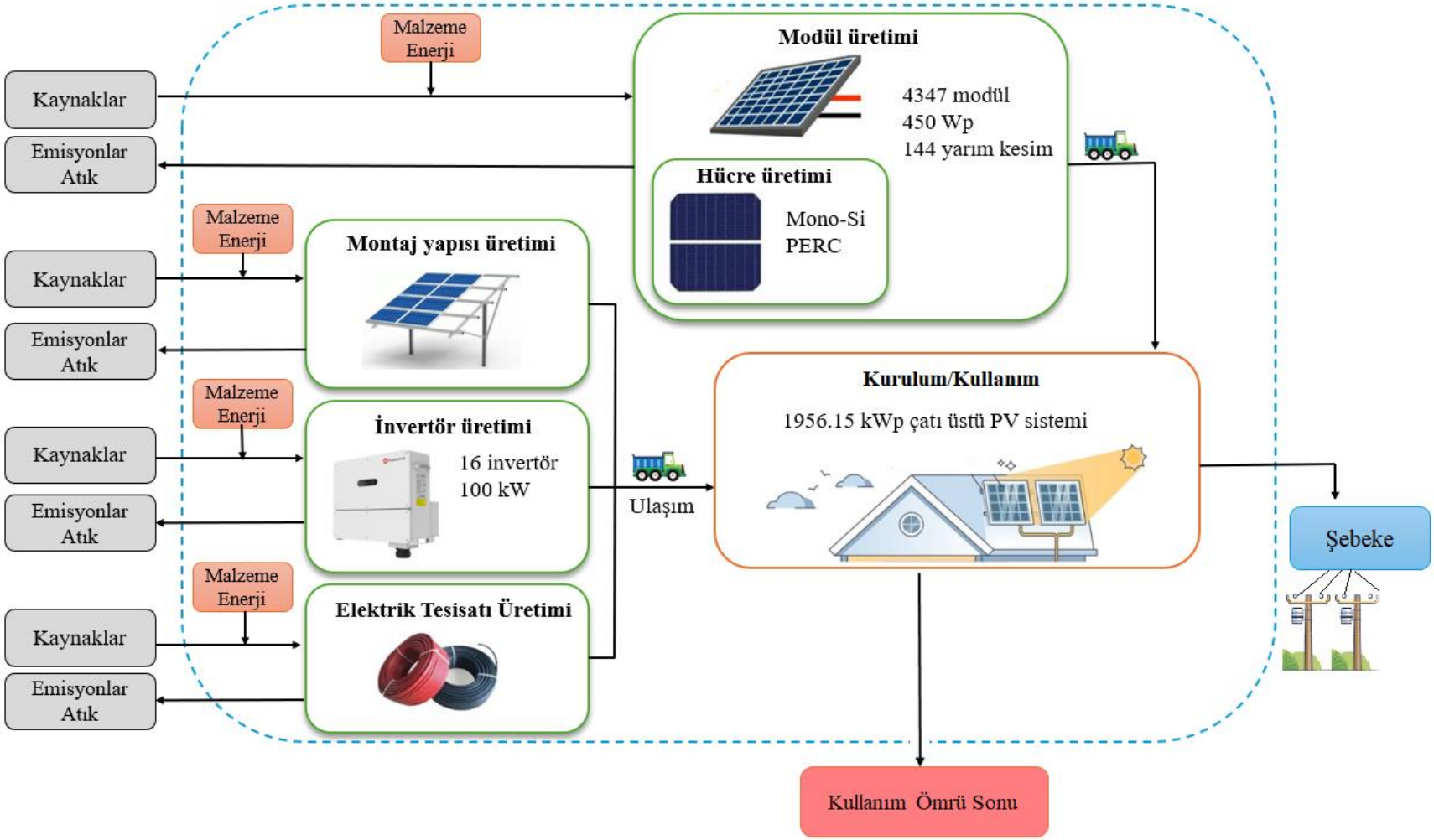
3.1.3. Sistem Sınırı

Çalışmanın kapsamı beşikten mezara olmak üzere; ham maddelerin çıkarılması ve işlenmesi, PV modülü ve sistem dengesi bileşenlerinin (montaj yapısı, invertör ve elektrik ekipmanı) üretimi, ulaşım, kurulum, kullanım ve kullanım ömrü sonu/atık yönetimi aşamalarını içermiştir. Şekil 15'te, çalışmanın detaylı sistem sınırı gösterilmektedir. Her bir bileşenin üretim aşaması, sistem sınırları içerisinde değerlendirilmektedir. Kullanım aşaması, PV sistemlerinin tüm ömrü boyunca elektrik üretimini değerlendirmek için dikkate alınmıştır. Modüllerin ve bileşenlerin bakımı, mevcut çalışmaya dahil edilmiştir. Kullanım ömrü sonunda, bileşen yönetiminin rolünü daha iyi anlaşılması için sistem sınırı içerisinde ele alınmıştır.

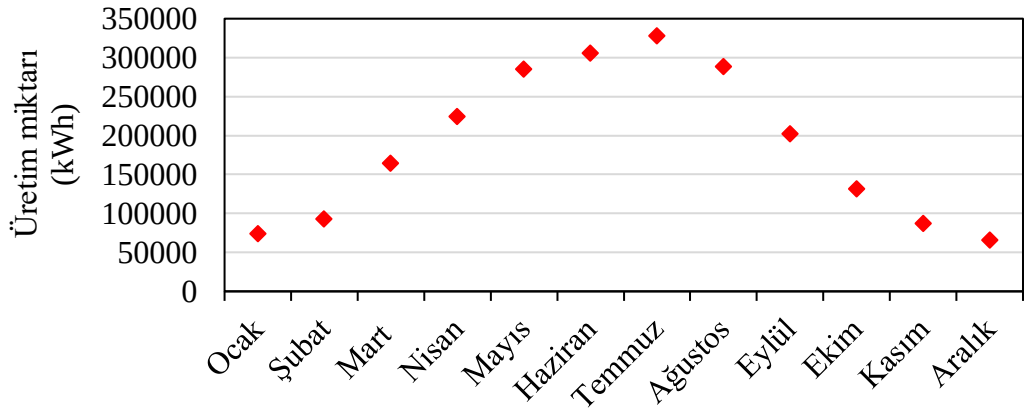
3.1.4. Fonksiyonel Birim

Fonksiyonel birim, sistem sınırına hangi süreçlerin dahil edileceğine, ne kadar malzeme ve enerjiye ihtiyaç duyulacağına karar vermek için bir temel sağlamasından dolayı, YDD çalışmalarının sonuçlarını ve yorumlarını önemli ölçüde etkileyen bir unsurdur (Hauschild ve diğ., 2018). Bu çalışmada fonksiyonel birim, çatı üstü PV santrali tarafından üretilen 1 kWh elektrik olarak tanımlanmıştır.

Envanterin oluşturulması ve etki değerlendirme hesaplamaları, kWh başına elektrik üretimi esas alınarak yapılmıştır. Bu amaçla, santralin 25 yıllık işletme aşamasında ürettiği enerji hesaplanmıştır. Şekil 16'da, sistem tarafından üretilmesi tahmin edilen elektriğin aylara göre değişimi gösterilmektedir. Kurum tarafından tahmin edilen elektrik üretimi esas alınarak, sistemin devreye alınmasından bu yana yıllık elektrik üretimi toplamının 2.254.966 kWh olacağı, yaşam süresi boyunca üretilen toplam elektriğin ise yaklaşık 45.099.320 kWh olacağı tahmin edilmiştir. Modül verimliliğinin, yirmi yıl sonunda yaklaşık %80 düşeceği öngörülmüştür. Metro yerleşkesinin bulunduğu Ümraniye ilçesinin, yaklaşık 1400-1450 kWh/m^2/yıl güneş radyasyonuna sahip olduğu ve aylara göre ortalama güneşlenme süresinin 3 (Aralık ayı) ile 10.84 saat (Temmuz) arasında değiştiği (GEPA, 2024a) kabul edilmiştir. Üretilen elektriğin, atölye binasının ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılması planlanmaktadır.



Şekil 15: Çalışmada ele alınan sistem sınırı.



Şekil 16: Çatı üstü PV santrali tarafından üretilmesi tahmin edilen elektriğin aylara göre değişimi.

3.2. ENVANTER ANALİZİ

3.2.1. PERC PV modül üretimi

Silikon bazlı PERC hücre teknolojisine sahip bir PV modülünün üretim aşamaları Şekil 17'de gösterilmektedir (Bartie ve diğ., 2021). Üretim aşamaları sırasıyla;

- Kuvarsın (SiO_2) pota rafinasyonu ile karbotermik indirgenmesi yoluyla metalurjik dereceli silikon (MG-Si) üretimi,
- Siemens prosesi kullanılarak güneş dereceli silikon (SG-Si) üretimi,
- Cz prosesi ile monokristalin silikon külçe kristalizasyonu ve testereyle levha kesimi
- PERC tasarımına sahip hücrelerin üretilmesi,
- Modül montajı ve
- Kullanım ömrü sonu/atık yönetimini içermektedir.

Mono-Si özelliğine sahip PERC PV modülünün, tedarik zincirindeki ilk aşamalarının (metalurjik dereceli silikon üretiminden hücre üretimine kadar) envanteri, Müller ve diğ. (2021) tarafından yayınlanan verilerden tedarik edilmiştir. Ek 2.1'de, MG-Si üretimi envanter verileri, Ek-2.2'de, Polisilikon üretimi envanter verileri, Ek-2.3'te, Cz silikon üretimi envanter verileri, Ek-2.4'te, levha üretimi envanter verileri, Ek-2.5'te, metil alüminyum seskiklorür üretimi envanter verileri, Ek-2.6'da trimetilalüminyum üretimi envanter verileri, Ek-2.7'de, TMAI saflaştırması için envanter verileri ve Ek-2.8'de metalizasyon pasta/arka tabaka üretim envanter

verileri paylaşılmıştır. Arka plan verileri için Ecoinvent v3.7 veri tabanı kullanılmıştır. Referans ara ürünler kalın harflerle işaretlenmiştir.

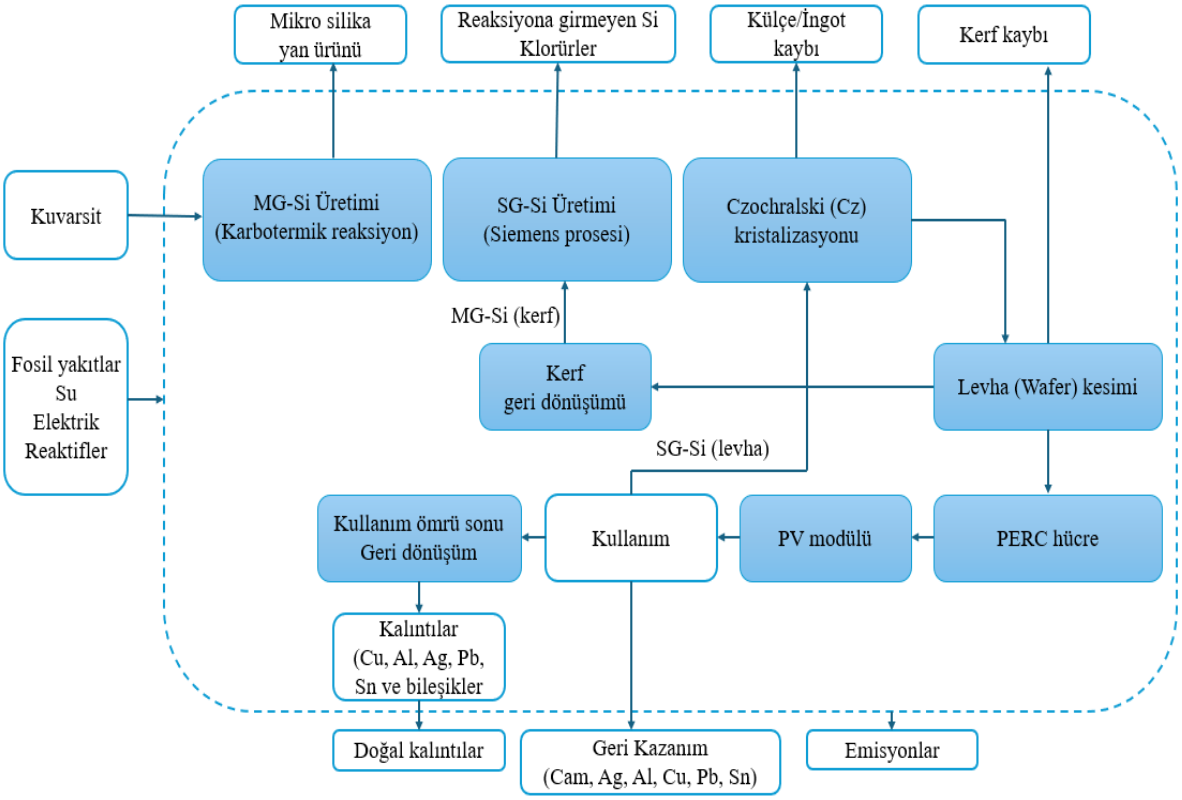
3.2.2. PERC PV Modülü Özellikleri

Uygulamada kullanılması planlanan tek yüzlü PERC PV modülünün teknik özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. Hücre üretimi ve modül montajına ilişkin veriler, IEA tarafından 2024 yılında yayınlanan PERC PV modülüne ait güncel envanterden tedarik edilmiştir (IEA PVPS, 2024). Mevcut çalışmada, bir PERC hücresi ve modülünü üretmek için enerji tüketimi değerleri belirli bir üreticiden gelmektedir ve en son yayınlanan çalışmalar (Müller ve diğ., 2021) ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında, ele alınan proje bilgilerine göre uygulanacak olan PV modülünün gücü 450 W'dır (Tablo 4). Modül gücünün 450 W olduğu varsayılarak, hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

PERC modülü, 2.17 m^2 alana ve %21.16 verimliliğe sahip yarım kesim hücreye dayalı yüksek verimli bir modüldür. Modül, 137.78 cm^2 alana sahip 144 adet yarım kesilmiş M6 hücresinin (166 mm x 83 mm) bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Hücre üretimine ait veriler ise, 170 µm kalınlığında 210 mm x 210 mm levha boyutunun kullanıldığı, %22.5 verimliliğe sahip tek yüzlü PERC hücrelerinin üretimine ilişkindir. Yarım kesilmiş hücreler, bir lazer kesici ile ikiye bölünmüş tipik silikon güneş hücre özelliğindedir.

Gelişmiş silikon hücre tasarımını kullanan ve yapı itibarıyla tipik bir mono-Si PV hücresinden farklı olmayan PERC hücreler, hücrelerin arka kısmında yer alan ve hücrenin verimliliğini artırabilen bir malzeme katmanı olan arka yüzey pasifleştirme katmanının entegrasyonu ile farklılık göstermektedir (Shravan ve Chunduri, 2019). Şekil 18, standart bir Alüminyum Arka Yüzey Alanı (Al-BSF) hücresi ve tek yüzlü PERC hücresinin yapısını göstermektedir. PERC hücre tasarımı ile arka yüzeydeki rekombinasyon azaltılmıştır ve arka yüzey yansıması geliştirilmiştir (Blakers, 2019).

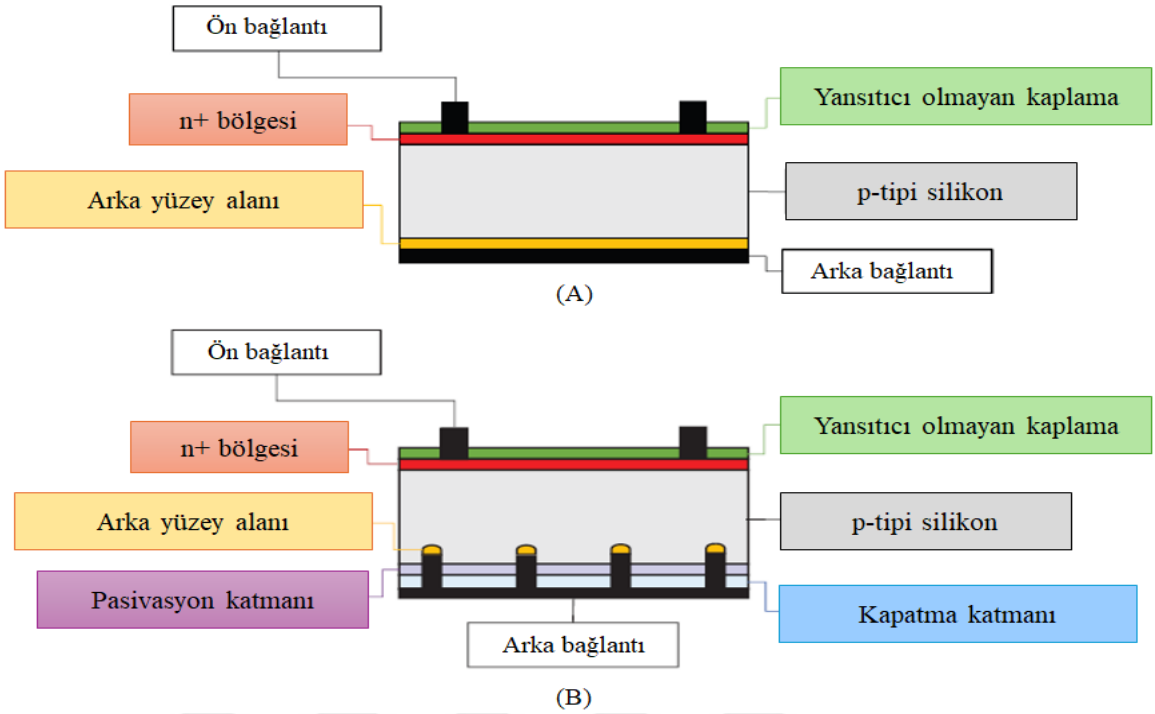
Firmanın verdiği bilgilere dayanarak, PV panel üretim pazarının çoğunluğunu temsil eden Çin, üretim lokasyonu olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, üretim lokasyonunun Türkiye olarak tercih edilmesi durumunda, sonuçların karşılaştırılması amacıyla bir değerlendirme çalışması da yapılmıştır ve Bölüm 2.5.1 'de detaylı olarak anlatılmıştır. Ek-2.9'da PERC hücre üretimi envanter verileri ve Ek-2.10'da cam-arka tabaka modül montajı envanter verileri paylaşılmıştır.



Şekil 17: mono-Si PERC PV üretim süreçleri ve yaşam döngüsü (Bartie ve diğ., 2021).

Tablo 6: Tek yüzlü PERC PV modülünün temel özellikleri**.**

Parametre	
Modül	
Modül tipi	Mono-Si PERC hücre
Modül gücü (W)	460
Modül verimliliği (%)	21.16%
Modül boyutu (m^2)	2.17
Hücre sayısı (adet)	144 half-cut M6
Sistem ömrü	25 yıl
Üretim yeri	Çin
Cam kalınlığı (mm)	3.2
Hücre	
Hücre verimliliği (%)	22.5
Hücre alanı (cm^2)	137.78
Yonga/ Wafer kalınlığı (µm)	170
Sistem ömrü	25 yıl



Şekil 18: Al-BSF hücresinin (A) ve tek yüzlü PERC hücresinin (B) yapısı (Farrell ve diğ., 2020).

3.2.3. Sistem Dengesi Bileşenleri

Sistem dengesi bileşenleri, modül montaj yapısı, invertör, kablo, bağlantı kutuları, AC dağıtım panosu, paratoner ve topraklama gibi bileşenleri içermektedir. Bu çalışmada, invertör, montaj yapısı ve elektrik kurulumu olmak üzere üç ana bileşen analize dahil edilmiştir ve teknik özellikleri Tablo 7'de sunulmuştur.

İnvertör, düşük voltajlı DC'yi alternatif akım (AC) gücüne dönüştürmektedir. Çatı üstü PV santrali için gerekli olan invertör miktarı, ilk kurulum için 16 adettir. İnvertör için gerekli olan üretim envanteri, Ecoinvent 3.7 veri tabanından tedarik edilmiştir. Veri tabanında, 2.5 kW, 50 kW ve 500 kW olmak üzere üç kapasitede invertör üretim envanteri mevcuttur. Firmanın paylaştığı bilgilerine dayalı olarak, uygulama için 100 kW kapasitede invertör kullanılacaktır. Bu amaçla, 500 kW kapasitesine sahip invertör, orantılı olarak 100 kW'ye ölçeklendirilmiştir. Ek-3.1'de detaylı invertör üretim envanteri verilmiştir.

Montaj yapısı, panelin eğimli veya düz bir çatıya montajı için gerekli yapısal bileşenlerini içermektedir. Bu çalışmada, montaj yapısı ile ilgili üretim envanteri Ecoinvent 3.7 veri tabanından alınmıştır. Ek-3.2'de montaj yapısının üretim envanteri verilmiştir.

Elektrik kurulumu için gerekli olan bileşenler, PV modülü ile diğer bileşenler ve şebeke arasındaki tüm yardımcı elemanları (paratoner, PV modül alanındaki kablolar, sigorta kutusu, PV modülünden invertöre giden kablolar ve invertörden elektrik sayacına giden kablolar gibi) içermektedir. Bu çalışmada, elektrik kurulumu için üretim envanteri, 3kWp'lik binaya entegre bir PV sisteminin kurulumu için gerekli bileşenlerin üretimini temsil etmektedir. Elektrik kurulumu üretim envanteri Ek-3.3'de verilmiştir. Tüm sistem bileşenlerinin, Türkiye'de üretildiği varsayılmıştır. İnvertörün beş yıllık yaşam ömrü dikkate alınarak, sistemin ömrü boyunca beş değiştirme gerçekleştirileceği kabul edilmiştir.

Tablo 7: Ana sistem dengesi bileşenleri ve özellikleri.

Bileşenler	Özellikler	Miktar	Kaynak
 İnvertör	Miktar	16 adet	Ecoinvent v3.7
	Çıkış Gücü	100 kW	
	Toplam Ağırlık	90 kg	
	Verimlilik	98.8%	
	Kullanım ömrü	5 yıl	
 Montaj yapısı	Miktar	9432.99 m^2	Ecoinvent v3.7
	Malzeme	Alüminyum	
	Kullanım ömrü	25 yıl	
 Elektrik tesisatı	Miktar	39123 metre	Ecoinvent v3.7
	Malzeme	Bakır	
	Kullanım ömrü	5 yıl	

3.2.4. Ulaşım

PV santralini oluşturan ana bileşenlerin fabrikadan kurulum sahasına nakliyesi sırasında kullanılan araçların, dizel veya benzin tüketimi dikkate alınmıştır. Uygulamada kullanılacak modüller, Çin'de üretilmiştir. Modüllerin Çin'de bulunan üretim fabrikasından, Türkiye'de bulunan kurulum noktasına gönderildiği varsayılmıştır. Ambalajlama da dahil olmak üzere,

bitmiş modüller gemi veya kamyon ile taşınmaktadır. Sistem dengesi bileşenlerinin Türkiye'de birçok üreticisi olduğundan, yerel üreticilerden tedarik edildiği varsayılmıştır. PV modül ve bileşenlerinin üretimi tek bir lokasyondan gerçekleştiğinden, sadece bitmiş ürünlerin nakliyesi dikkate alınmıştır.

Hesaplamalar, PV'lerin YDD'sini inceleyen raporlardaki ortak nakliye modelleme yaklaşımıyla tutarlı olarak, paketlenmiş modüllerin ağırlığına (ton kilometre (tkm)) dayanmıştır. Ek-4.1'de, Çin'de üretilen PV modülünün kurulum sahasına olan nakliyesine ait bilgiler, Ek-4.2'de ise, BOS'un nakliyesine ait bilgiler verilmiştir. Projenin kendi varsayımlarına dayalı olan nakliye için mesafe hesaplamaları, Google Earth kullanılarak yapılmıştır.

3.2.5. Kurulum/Kullanım Aşaması

Kurulum; montaj yapısı, invertör, elektrikli ekipmanın ve şebeke bağlantısını yapmak için kabloların yerinde entegrasyonunu içermektedir. Kullanım aşamasında ise, maksimum işletme süresi için bakım dikkate alınırken, sistemde beklenmeyen arızalardan kaynaklanabilecek olumsuz etkiler göz ardı edilmiştir. PV panellerin temizliğinde altı ayda bir musluk suyunun kullanıldığı varsayılmıştır (Wernet ve diğ., 2016; Zahedi ve diğ., 2022).

3.2.6. Kullanım Ömrü Sonu

PV modüllerinin kullanım ömrü sonuna ilişkin envanter verileri, IEA'nın kılavuzuna dayanmaktadır (Frischknecht ve diğ., 2017; Müller ve diğ., 2021; IEA PVPS, 2020). Buna göre, polimerler ve silikon bileşenleri yakılıp çöpe atılırken, cam, çerçeve ve kablolar geri dönüştürülmektedir. Ek-5.1'de, cam-arka tabaka PERC modüllerinin kullanım ömrü sonu aşamasına ilişkin envanter verileri verilmiştir. Veriler, cam-arka tabaka modüllerinin malzeme içeriğine göre uyarlanmıştır. Arka plan verileri için, Ecoinvent v3.7 veri tabanı kullanılmıştır.

3.3. ÇEVRESEL ETKİ ANALİZİ

Çevresel etkiler, Çevresel Ayak İzi Kategori Kuralları (EF) orta nokta göstergeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Tablo 8'de etki kategorileri ait bilgiler verilmiştir (JRC, 2011). Bu çalışmada, on altı etki kategorisi ele alınırken, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişte PV teknolojilerinin rolü göz önünde bulundurularak, iklim değişikliği etki kategorisi ayrı olarak değerlendirilmiştir. İklim değişikliği etki kategorisi, IPCC 2013 yöntemi ile hesaplanırken, diğer on beş etki kategorisi EF 3.0 ile hesaplanmıştır.

Tablo 8: EF etki kategorileri ve ilgili etki kategorisi göstergeleri ve karakterizasyon modelleri.

Etki kategorisi	Gösterge	Birim	Metot	Seviye*
İklim değişikliği	Küresel Isınma Potansiyeli Olarak Işınımsal Zorlama (GWP100)	kg CO_2 eşd.	IPCC'nin 100 yıllık temel modeli	I
Ozon tabakasının incelmesi	Ozon tüketme potansiyeli (ODP)	kg CFC-11 eşd.	WMO değerlendirmesinde olduğu gibi 1999 sabit durum ODP'leri	I
İyonize radyasyon	İyonize radyasyon potansiyeli (IRP)	kBq U-235 eşd.	Dreicer ve arkadaşları tarafından geliştirilen insan sağlığı etki modeli. 1995	II
Fotokimyasal ozon oluşumu	Troposferik ozon konsantrasyonu artışı (POCP)	kg NMVOC eşd.	ReCiPe'de uygulandığı gibi	II
Partikül Madde, solunabilir inorganikler	İnsan sağlığı üzerindeki etkisi (PM)	Hastalık insidansı	UNEP tarafından önerilen PM yöntemi	I
İnsan toksistesi, kanserojen olmayan	İnsan toksistesi (HTP-kanser olmayan)	CTUh	USEtox	II/III
İnsan toksistesi, kanserojen	İnsan toksistesi (HTP-kanserojen)	CTUh	USEtox	II/III
Asidifikasyon	Asidifikasyon potansiyeli (AP)	mol H+ eşd.	Birimkli aşım	II
Tatlı su ötrofikasyonu	Tatlı su son bölmesine ulaşan besin maddelerinin oranı (FEP)	kg P eşd.	ReCiPe'de uygulandığı şekliyle EUTREND modeli kompartman (P)	II
Deniz ötrofikasyonu	Denizlere ulaşan besinlerin oranı ve kompartman (MEP)	kg N eşd.	ReCiPe'de uygulandığı şekliyle EUTREND modeli kompartman (P)	II
Karasal ötrofikasyon	Karasal ötrofikasyon potansiyeli (TEP)	mol N eşd.	Birimkli aşım	II
Tatlısı ekotoksisitesi	Tatlısı ekotoksisitesi potansiyeli (FETP)	CTUe	USEtox	II/III
Arazi kullanımı	Toprak kalitesi endeksi	Boyutsuz (Pt)	LANCA modeline dayalı toprak kalite endeksi	III
Kaynak kullanımı, enerji taşıyıcıları	Abiyotik kaynak tükenmesi-fosil yakıtlar (ADP-fosil)	MJ	CML 2002	III
Kaynak kullanımı, mineral ve metaller	Abiyotik kaynak tükenmesi (ADP-nihai rezerv)	kg Sb eşd.	CML 2002	III

*ILCD seviyelerine göre [36]: "Seviye I" (tavsiye edilen ve tatmin edici), "Seviye II" (tavsiye edilen ancak iyileştirmeler yapılan), "Seviye III" (tavsiye edilen ancak dikkatle uygulanması gereken).

3.4. ALTERNATİF SENARYOLARIN OLUŞTURULMASI

Çevresel etkiler, farklı senaryolar oluşturularak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, üretim lokasyonu, modül teknolojisi, şebeke elektriği, güncel elektrik karışımı ve diğer enerji kaynakları dikkate alınarak mevcut durum ile karşılaştırma yapılmıştır.

3.4.1. Senaryo 1: Üretim Lokasyonu

Bu çalışmadaki temel senaryo, PV modülünün Çin'de üretilmesi ve Türkiye'ye nakliyesini içermiştir. Ele alınan temel senaryo, çatı üstü PV santralinin gerçek bileşimini temsil etmektedir. Üretim lokasyonu farklılıklarını karşılaştırmak amacıyla, Senaryo 1a; Türkiye ve Senaryo 1b; Avrupa (Almanya) olmak üzere iki farklı lokasyon analize dahil edilmiştir.

Bölgesel bir yaşam döngüsü envanteri oluşturmak amacıyla, Ecoinvent v3.7'yi temel alan AB ve Türkiye orta gerilim elektrik karışımları, tüm PV modül üretim süreçlerinde ve seçilen ara ürünler (TMAI, gümüş macunu, alüminyum alaşımı ve güneş camı üretimi) için kullanılmıştır. Tablo 9'da, üç farklı üretim lokasyonu için orta gerilim elektrik karışımı süreç özellikleri verilmiştir. Bu elektrik karışımları, Türkiye ve Avrupa için, Ecoinvent v3.7'nin 2017 yılı elektrik karışım verilerine dayanmaktadır. Çin üretim lokasyonu için ise, Ecoinvent v3.7'nin 2014 yılı verileri kullanılmıştır. Seçilen ara ürünler de dahil olmak üzere, tüm PV modül üretiminin, AB veya Türkiye'deki tek bir üretim yerinde gerçekleştiği varsayıldığından, nakliye yalnızca bitmiş modüller için modellenmiştir. Avrupa ve Türkiye'deki modül üretim noktasından başlayan ve kurulum sahasında sonlanan ulaşım senaryosuna ait bilgiler sırasıyla Ek-4.3 ve Ek-4.4'te verilmiştir.

3.4.2. Senaryo 2: Şebeke Elektriği

Bu bölümde, temel senaryo ile geleneksel şebekeden elektrik üretiminin çevresel performansının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Temel senaryo için seçilen üretim lokasyonunun elektrik karışımı, 2017 yılını temsil etmektedir. 2023 yılı elektrik karışım payları (Şekil 5) ve gelecekteki tahmini elektrik karışımları (Tablo 1) dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla, SimaPro v9.2 yazılımı kullanılarak 2023, 2025, 2030 ve 2035 yılları için elektrik karışım senaryoları oluşturulmuştur.

Çatı üstü PV santrali tarafından üretilen 1 kWh'lik elektriğin, 2017 (senaryo 2a), 2023 (senaryo 2b), 2025 (senaryo 2c), 2030 (senaryo 2d), 2035 (senaryo 2e) yıllarına ait elektrik karışımları

içeren geleneksel şebeke elektriği ile elde edilmesiyle oluşabilecek çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.

Tablo 9: Üç farklı üretim lokasyonu için orta gerilim elektrik karışım sürecinin tanımı.

Üretim lokasyonu	Senaryo	Birim	Kullanılan proses	Kaynak
Çin	Temel senaryo	kWh	Elektrik [CN], orta gerilim	Ecoinvent 3.7
Türkiye	Senaryo 1a	kWh	Elektrik [TR], orta gerilim	Ecoinvent 3.7
Avrupa	Senaryo 1b	kWh	Elektrik [RER], orta gerilim	Ecoinvent 3.7

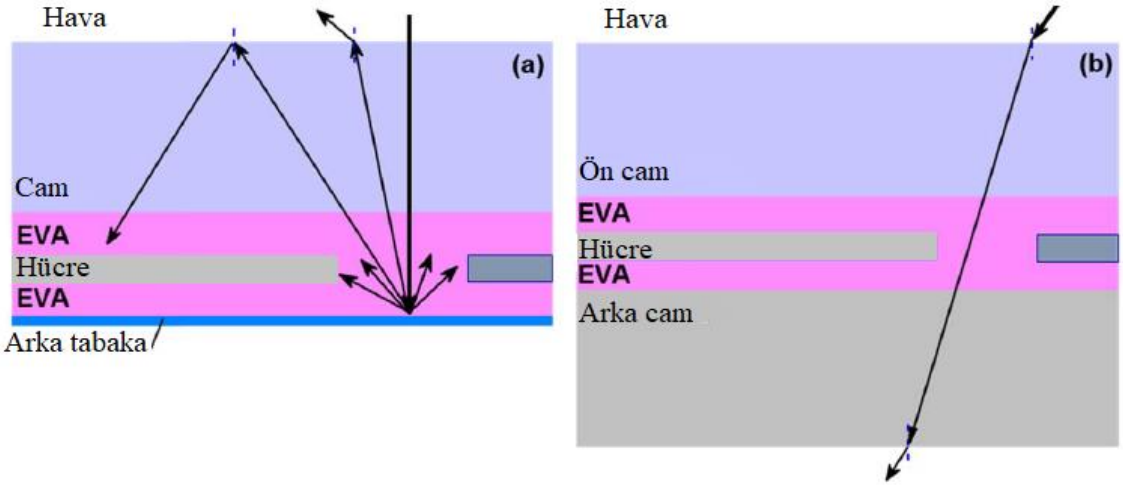
3.4.3. Senaryo 3: Diğer Enerji Kaynakları

Türkiye'de, kömür ve doğal gazın mevcut elektrik karışımlarındaki payı oldukça yüksektir (Şekil 5). Güneş enerjisinde olduğu gibi, rüzgâr enerjisinden elde edilen elektriğin payı da son yıllarda giderek artmaktadır (Tablo 1). Bu amaçla, çatı üstü PV santrali tarafından üretilen 1 kWh elektriğin yol açtığı çevresel etkiler, bir kömür santrali (senaryo 3a), linyit (senaryo 3b) doğal gaz santrali (senaryo 3c), hidrolik-rezervuar (senaryo 3d), hidrolik-akarsu (senaryo 3e) ve rüzgar türbininden (senaryo 3f) elde edilen aynı miktarda elektriğin yol açtığı çevresel etkiler ile karşılaştırılmıştır. Diğer enerji kaynaklarından, 1 kWh'lik elektrik üretiminin değerlendirilmesi için Ecoinvent v3.7 veri tabanı kullanılmıştır.

3.4.4. Senaryo 4: Farklı Modül Türü

Senaryo 4'te, standart Al-BSF hücre teknolojisine dayalı (Şekil 14) bir kurulumdan, PERC teknolojisine geçişin çevresel faydalarını değerlendirmek için, mevcut proje kapsamında iki hücre teknolojisi arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bununla birlikte, temel senaryoda kullanılan PERC modülünün, yeni modül tasarımlarından biri olan çift cam (cam/cam) özelliğinde bir modül ile değiştirilmesinin etkiler üzerindeki etkisi de ele alınmıştır. Şekil 19, iki farklı modül tasarımının şematik tasarımını göstermektedir.

Tablo 10 'da farklı silikon PV teknolojisi ve modül tasarımına sahip PV modüllerinin özellikleri verilmiştir. Al-BSF hücre teknolojisine ait PV modülüne ilişkin envanter IEA raporundan temin edilmiştir (IEA PVPS, 2020). Çift cam modül tasarımına sahip PERC modülünün, üretim verileri Müller ve diğ. (2021)'den tedarik edilerek, bu çalışmanın malzeme bilgisine göre uyarlanmıştır. Her üç modülünde, temel senaryo kapsamında Çin'de üretildiği varsayılmıştır.



Şekil 19: İki farklı modül tasarımının şematik gösterimi (a) geleneksel cam/arka tabaka modülü (b) çift cam modülü (Luo ve diğ., 2018).

Tablo 10: Silikon AL-BSF ve PERC hücre teknolojisine ait PV modüllerinin özellikleri.

	Mevcut Senaryo	Senaryo 4
Hücre teknolojisi	PERC	AL-BSF
Modül yapısı	Cam/arka tabaka	Cam/arka tabaka
Çerçeve	Var	Var
Modül verimliliği	%21.16	%15.9

3.5. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ

EPBT, güneş PV sisteminin tüm yaşam döngüsünde kullanılan aynı miktarda enerjiyi üretmesi için gereken süre olarak tanımlanmaktadır (Ludin ve diğ., 2018). Bu hesaplamalar için, geri dönüşümden elde edilen enerji de dahil olmak üzere ham maddelerin çıkarılması, üretim, nakliye ve kullanım ömrü sonu süreçleri değerlendirilmektedir (Fthenakis ve diğ., 2017). EPBT, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Eskew ve diğ., 2018):

$$\text{EPBT} = \frac{Emat+Emanuf+Etrans+Einst+Eeol}{\left(\left(\frac{Eagen}{nG}\right)-Eo\&m\right)}$$

Burada;

Emat: PV sistemini oluşturan malzemeleri üretmek için birincil enerji talebi (MJ)

Emanuf: PV sistemi üretmek için birincil enerji talebi (MJ)

Etrans: Yaşam döngüsü boyunca kullanılan malzemelerin taşınması için birincil enerji talebi (MJ)

Einst: Sistemi kurmak için birincil enerji talebi (MJ)

Eeol: Kullanım ömrü sonu yönetimi için birincil enerji talebi (MJ)

Eagen: Yıllık elektrik üretimi (MJ)

Eo&m: İşletme ve bakım için yıllık birincil enerji talebi (MJ)

nG: Şebeke verimliliği, talep tarafındaki ortalama birincil enerjiden elektriğe dönüşüm verimliliğini ifade etmektedir.

3.6. HASSASİYET ANALİZİ

Hassasiyet analizi, varsayımların ve parametrelerin çalışmanın sonucu üzerindeki etkisini anlamaya ve yapılacak değişikliklerin önemini vurgulamaya yardımcı olan önemli YDD bileşenlerinden biridir (ISO, 2006). Elektrik kaynağı seçilen üç lokasyona göre önemli ölçüde değiştiğinden, duyarlılık analizi PV modülünün üretim yeri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, PERC PV modülünün üretim yerindeki bir değişikliğe, yani farklı bir elektrik karışımı kullanımına olan duyarlılığı hakkında değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca, modül tasarımının cam-arka tabakadan çift cama değişimi ve şebeke elektriğinin kullanımını da araştırılmıştır.

3.7. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Sistemin yaşam döngüsüne göre modellenen alternatif senaryolar, çeşitli varsayımlara dayalı olduğundan belirsiz sonuçlara yol açabilmektedir. Sonuçlarla ilgili belirsizlik düzeyini anlamak için, alternatif senaryolar belirsizlik analizi kapsamında değerlendirilmektedir. Belirsizlik analizleri, farklı modül tasarımı ve üretim lokasyonu kapsamında gerçekleştirilmiştir. Böylece, birbirine yakın olan toplam çevresel etkilerin ve önceliklerin analiz edilerek, sistem için uygun olan senaryonun tercih edilmesi kapsamında değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada seçilen çevresel etki kategorilerine ilişkin belirsizliği tahmin etmek için, SimaPro v9.2 yazılımında bulunan Monte Carlo analizi kullanılmıştır. Analiz, 1000 çalışma ve %95 güven aralığı ile gerçekleştirilmiştir.

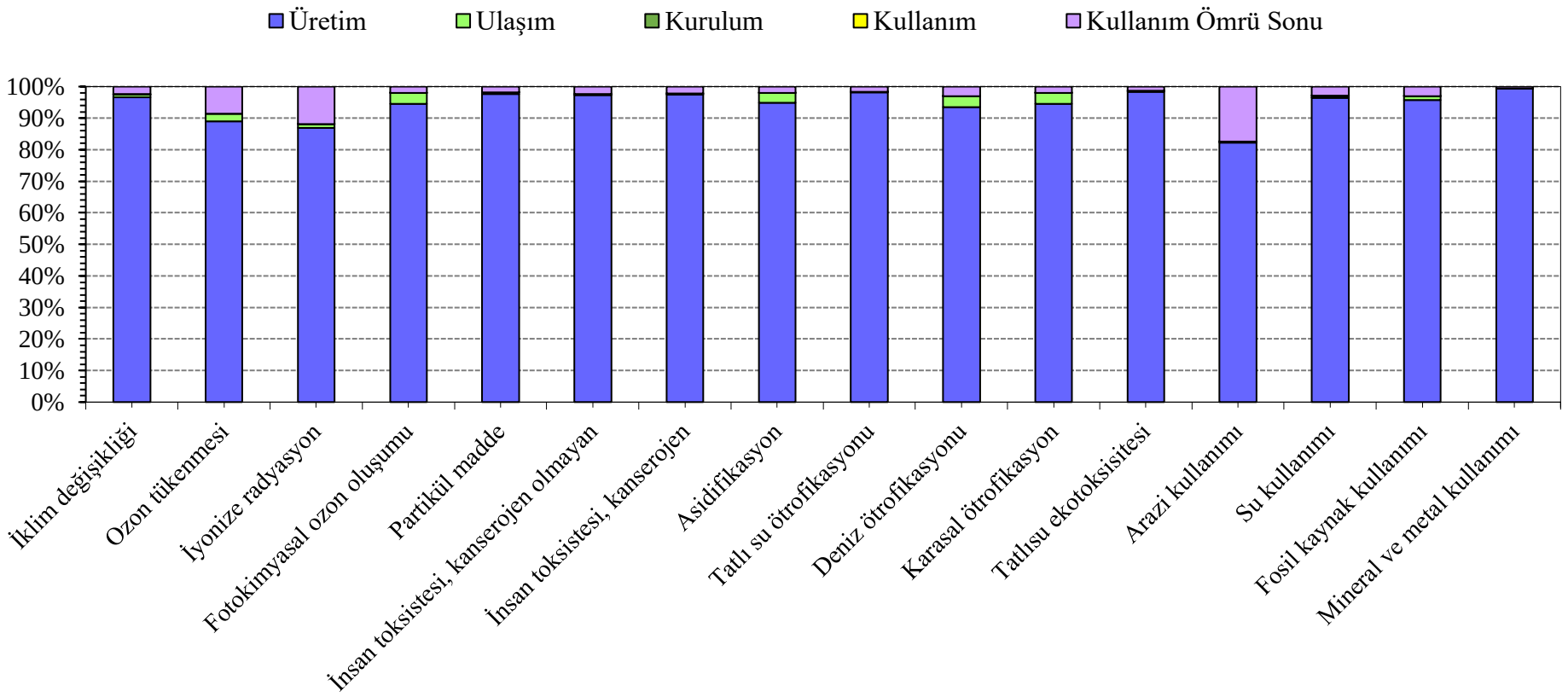
4. BULGULAR

4.1. ÜRETİLEN kWh ELEKTRİK BAŞINA ÇEVRESEL ETKİLER- TEMEL DURUM SENARYOSU

Çalışmada ele alınan 1956.15 kWh'lik kapasiteye sahip çatı üstü PV santralinin, 1 kWh'lik fonksiyonel birim ve 25 yıllık yaşam ömrü dikkate alınarak üretim (modül ve sistem dengesi bileşenleri), ulaşım, kurulum, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarının çevresel etkileri temel durum senaryosuna göre hesaplanmıştır. Temel durum senaryosu, kurum tarafından paylaşılan proje bilgileri kapsamında oluşturulmuştur. Buna göre, modüller Çin'de üretilerek Türkiye'ye nakliye edilmiştir. BOS bileşenlerinin ise, Türkiye'de üretildiği kabul edilmiştir. Kurulum, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamaları için mümkün olduğunca yerel koşullar dikkate alınmıştır. EF 3.0 yöntemi kullanılarak, on altı adet çevresel etki kategorisi değerlendirilmiştir.

Ek-6.1'de, dört ana aşamaya göre ölçülen her bir çevresel etkinin kWh başına karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Buna göre, sırasıyla 1 kWh başına toplam iklim değişikliği (GWP); 55.1 g CO_2 eşd., ozon tükenmesi (ODP); 3.7E-06 g CFC11 eşd., iyonize radyasyon (IRP); 3.00 kBq U-235 eşd., fotokimyasal ozon oluşumu (POCP); 0.17 g NMVOC eşd., partikül madde (PM); 3.9E-06 disease inc., insan toksisitesi (HTP)-kanserojen olmayan; 1.9E-06 CTUh, insan toksisitesi-kanserojen; 7.6E-08 CTUh, asidifikasyon (AP); 0.33 mol H+ eşd., tatlı su ötrofikasyonu (FEP); 0.03 g P eşd., deniz ötrofikasyonu (MEP); 0.06 g N eşd., karasal ötrofikasyon (TEP); 0.71 mol N eşd. , tatlı su ekotoksisitesi (FETP); 2649.9 CTUe, arazi kullanımı (LU); 715.3 Pt, su kullanımı (WU); 18.2 m^3 depriv., fosil kaynak kullanımı (ADP-fosil); 570.2 MJ, mineral ve metal kullanımı (ADP-nihai); 0.0050 g Sb eşd. olarak ölçülmüştür.

Şekil 20'de, beş ana aşamanın yüzde katkıları gösterilmektedir. Üretim aşaması, ana katkı yapan aşama olarak belirlenmiştir ve on altı etki kategorisine olan katkısı %82.2- %99.0 aralığında değişmiştir. Kullanım ömrü sonu aşaması, ikinci etki kaynağıdır (%0.5-%17.5). Bu esas olarak, geri dönüşüm sürecindeki enerji tüketimi, polimer ve silikon bileşenlerinin yakılması ve düzenli depolanma sonucu oluşan emisyonlar sebebiyledir.



Şekil 20: Beş ana aşamanın çevresel etki kategorilerine olan yüzde katkıları.

Üçüncü çevresel etki kaynağı, modül ve diğer sistem bileşenlerinin kurulum sahasına nakliyesi sırasında kullanılan, gemi ve kamyonların fosil yakıt tüketimini içeren ulaşım aşamasıdır (0.01%-%3.5). Kurulum aşaması, 0.0002%-%0.5 arasında değişen bir katkı oranına sahipken, güneş enerjisinin kullanılmasıyla temiz enerji dönüşümü ile ilgili olan kullanım aşaması, PV santralinin gerektirdiği bakım faaliyetlerine karşılık gelen daha küçük bir katkısı (%0.004-0.03) ile neredeyse ihmal edilebilir bir etki göstermiştir.

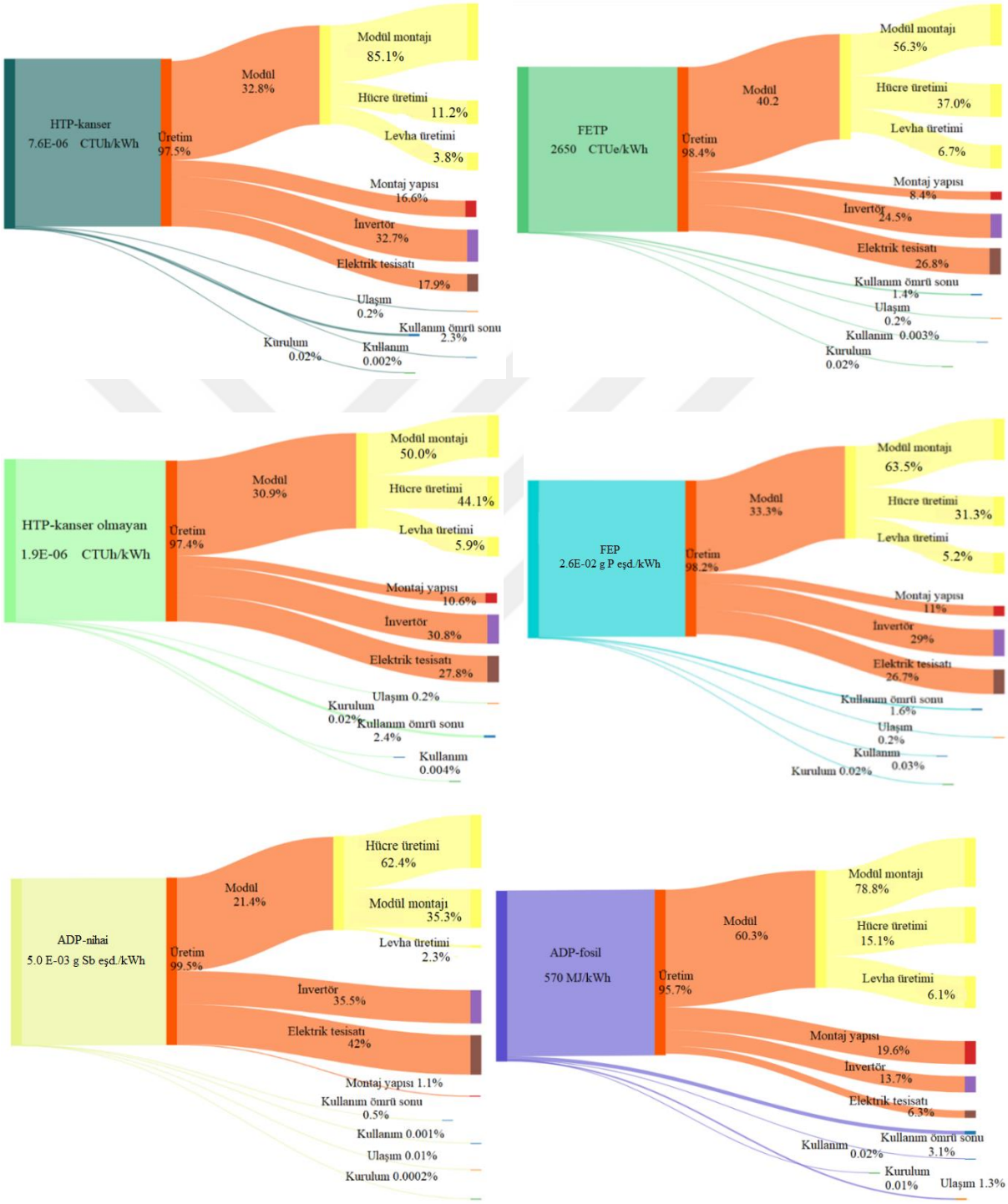
Üretim aşaması, ADP-nihai (~%99.5), FETP (~%98.4), FEP (%98.2), PM (~%97.6), HTP-kanser olmayan (~%97.4), HTP-kanser (~%97.5), GWP (~%96.7), WU (~%96.5) ve ADP-fosil (~%95.8) etki kategorilerine %95'in üzerinde katkı yaptığı tahmin edilirken, kullanım ömrü sonu aşaması için en büyük katkı kaynakları LU (~%17.5), IRP (~%11.8) ve ODP (~%8.5) ile ilgilidir. Ulaşım aşamasının en büyük katkısı ise, POCP (%3.5)'ye olmuştur.

Analiz edilen tüm göstergelerin, aynı ölçümle ifade edildiği normalizasyon sonuçları Ek-6.2'de gösterilmektedir. Normalizasyon yolu ile, her bir etki kategorisi ağırlıklandırarak ve toplanarak tek bir sayısal puan oluşturulmaktadır. Böylelikle, farklı etki kategorilerinin sonuçları karşılaştırılabilmektedir veya birleştirilebilmektedir. ADP-nihai ve FETP, diğer etkilerden açıkça daha yüksek miktara sahiptir. Bunu sırasıyla, FEP, ADP-fosil, HTP-kanserojen olmayan ve GWP takip etmektedir.

4.1.1. Üretim Aşaması Sıcak Noktaları

YDD sonuçları dikkate alındığında, üretim aşaması çevresel etkiler açısından en baskın kirletici kaynaktır. Potansiyel etkilerin ana kaynaklarını belirlemek için, şematik bir Sankey diyagramı kullanılarak üretim aşaması sıcak noktalarına ayrıştırılmıştır. Böylelikle, sistemin farklı süreçleri veya alt süreçlerinin, daha detaylı değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla üretim aşaması, dört ana üretim süreci olan; (i) modül üretimi (ii) invertör üretimi (iii) montaj yapısının üretimi ve (iv) elektrik tesisatının üretimi olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 21'de, HTP-kanser olmayan, HTP-kanser, FETP, ADP-fosil, ADP-nihai ve FEP etki kategorilerinin her birine ait Sankey diyagramları gösterilmektedir. Bu etki kategorileri, PV teknolojilerinin YDD kapsamında değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan çevresel etkilerdir (Hsu ve diğ., 2012; Louwen ve diğ., 2015; Frischknecht ve diğ., 2015; Lunardi ve diğ., 2018) ve bu sebeple daha detaylı incelenmiştir.



Şekil 21: HTP-kanser olmayan, HTP-kanser, FETP, ADP-fosil, ADP-nihai ve FEP etki kategorilerinin her birine ait Sankey diyagramları ve sıcak noktalarının ayrıştırılması.

Güneş modülü üretim süreçleri, toksik maddeler, kimyasallar ve ağır metaller gibi çeşitli tehlikeli maddeleri içermektedir (Lunardi ve diğ., 2017). Bu maddelerin, insan ve ekoloji üzerinde olan etkisinin değerlendirilmesi için, HTP-kanser olmayan, HTP-kanser ve FETP etki kategorileri incelenmiştir. ADP'ler (fosil ve nihai), modül ve bileşenlerin üretilmesi sırasında yenilenemeyen kaynakların (kömür ve petrol gibi) kullanılması ve yıllık çıkarma oranları ile kaynak rezervleri arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir (Van Qers ve Guinée, 2016). FEP, tatlı sularda aşırı biyokütle büyümesine ve buna bağlı olarak oksijenin tükenmesine yol açan besin maddelerini ifade etmektedir (JRC, 2011). Burada, en çok katkıda bulunan besin maddesi fosfor (P) ele alınmıştır. GWP ise, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişte PV teknolojilerinin rolü göz önüne alındığında en yaygın değerlendirilen çevresel etki kategorisidir. Şekil 22'de GWP'ye ait Sankey diyagramı ayrı olarak gösterilmiştir. Diğer çevresel etki kategorileri olan ODP, IRP, POCP, PM, AP, MEP, TEP, LU ve WU'ya ait Sankey diyagramları ise Ek-6.3 ve Ek-6.4'te gösterilmektedir.

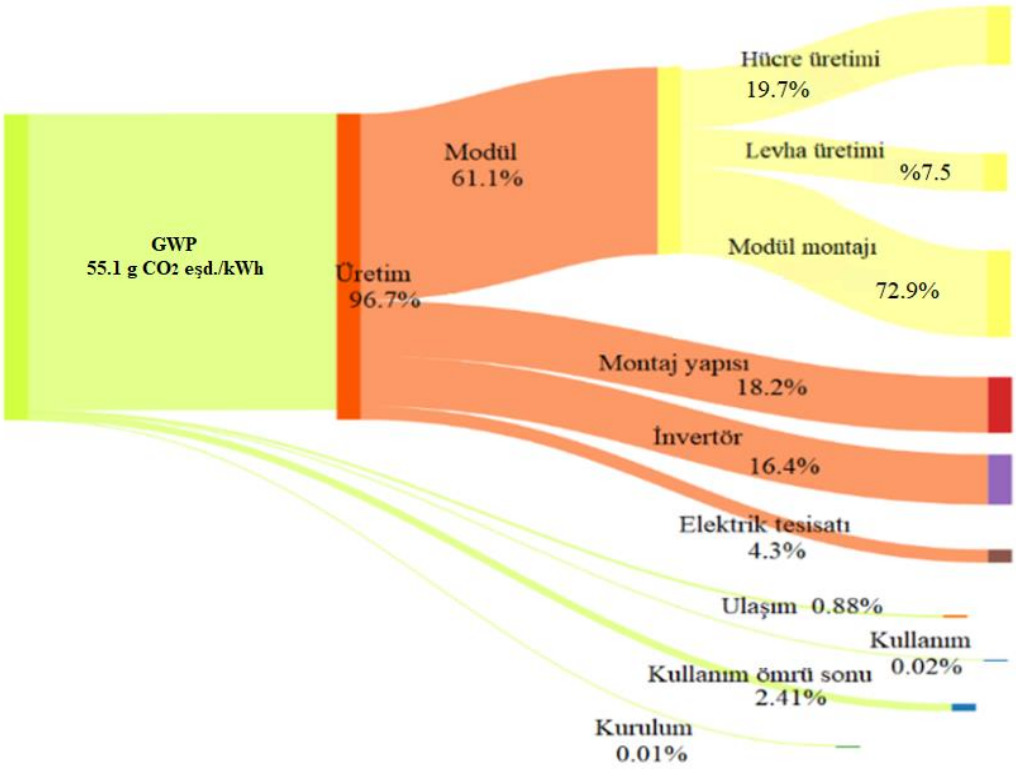
Modül üretimi, üretim aşamasının en önemli sıcak noktasını temsil etmektedir. Modül üretim aşaması, HTP-kanser, HTP-kanser olmayan, FEP, FETP, IRP, LU ve ADP-nihai etki kategorisi hariç, ölçülen diğer çevresel etkilerin çoğuna ana katkı sağlayan aşama (yaklaşık %60'ın üzerinde) olarak belirlenmiştir. Çevresel yüklerin ikinci kaynağı, GWP, ODP, IRP, HTP-kanser olmayan, HTP-kanser, FEP, LU, WU ve ADP-nihai etki kategorilerinde inverterlerin üretimi ile ilgiliyken (~%16.0-%35.5), montaj yapısının üretimi POCP, PM, AP, TEP ve MEP etki kategorilerini (~%14.7-%18.0) etkilemiştir. Elektrik tesisatının üretimi ise, yalnızca FETP (%26.8) etki kategorisinde ikinci kaynak olmuştur.

Modül üretimi, belirlenen on altı çevresel etki kategorisi arasında en yüksek dört katkıyı sırasıyla PM (~%65.1), POCP (~%63.4), ODP (~%63.1) ve MEP (~%62.8)'e yapmıştır. İnvertörlerin üretimi ile ilgili ana katkılar, ADP-fosil (~%35.5), IRP (~%35.1), HTP-kanser olmayan (~%32.7) ve HTP-kanser (~%30.8) etki kategorilerine iken, montaj yapısı üretimi için PM ve AP (~%18.0) olarak belirlenmiştir. Elektrik tesisatı üretiminin en yüksek katkısı ise, HTP-kanser olmayan (~ %27.8), FETP (~ %26.8) ve FEP (~ %26.7) etki kategorileri ile ilişkilendirilmiştir. Dört aşamanın GWP etki kategorisine olan katkıları ise, modül üretimi (~ %61.1), montaj yapısı üretimi (~%18.2), invertör üretimi (~ %16.4), ve elektrik tesisatı üretimi (~ %4.3) olarak sıralanmıştır.

Ek-6.5'te, üretim aşamasını içeren bileşenlerin normalizasyon sonuçları gösterilmektedir. Buna göre, diğer kategorilerden açıkça daha yüksek olumsuz etkiye sahip olan FETP ve ADP-nihai'ye katkı yapan üç ana üretim aşaması modül, invertör ve elektrik tesisatı olarak belirlenmiştir.

Modül üretimi; (i) modül montajı; (ii) hücre üretimi ve (iii) levha üretimi olarak, üç alt üretim süreci kapsamında daha detaylı incelendiğinde, modül montaj aşaması ADP-nihai ve WU etki kategorileri hariç diğer tüm kategorilerde en yüksek katkıyı yapan (~ %50.0-%92.8) aşama olmuştur. Hücre üretimi, tüm etki kategorilerine ikinci en yüksek katkıyı yaparken (~ %4.7-%62.4), en düşük katkıyı levha üretiminin (~ %2.3-%7.5) sergilediği gözlenmiştir.

Modül montajı, belirlenen çevresel etki kategorileri arasında en yüksek dört katkıyı, ODP (~%92.8), LU (~%88.8), HTP-kanser (~%85.1) ve IRP (~%79.3)'ye yapmıştır. Hücre üretimi, ADP-nihai (~%62.4), WU (~%51.9), HTP-kanser olmayan (%44.1) ve FETP (~%37.0) en yüksek katkıyı yaparken, levha üretimi GWP (~%7.5), MEP (~%7.5) PM (~%7.0) ve AP (~%41) etki kategorilerine en yüksek katkıyı sağlamıştır. Şekil 22'ye göre, GWP etki kategorisi için ise sırasıyla modül montajı (~ %72.9), hücre üretimi (~%19.7) ve levha üretimi (~ %7.5) olarak paylaşılmıştır.



Şekil 22: GWP etki kategorisine ait Sankey diyagramı ve sıcak noktalarının ayrıştırılması.

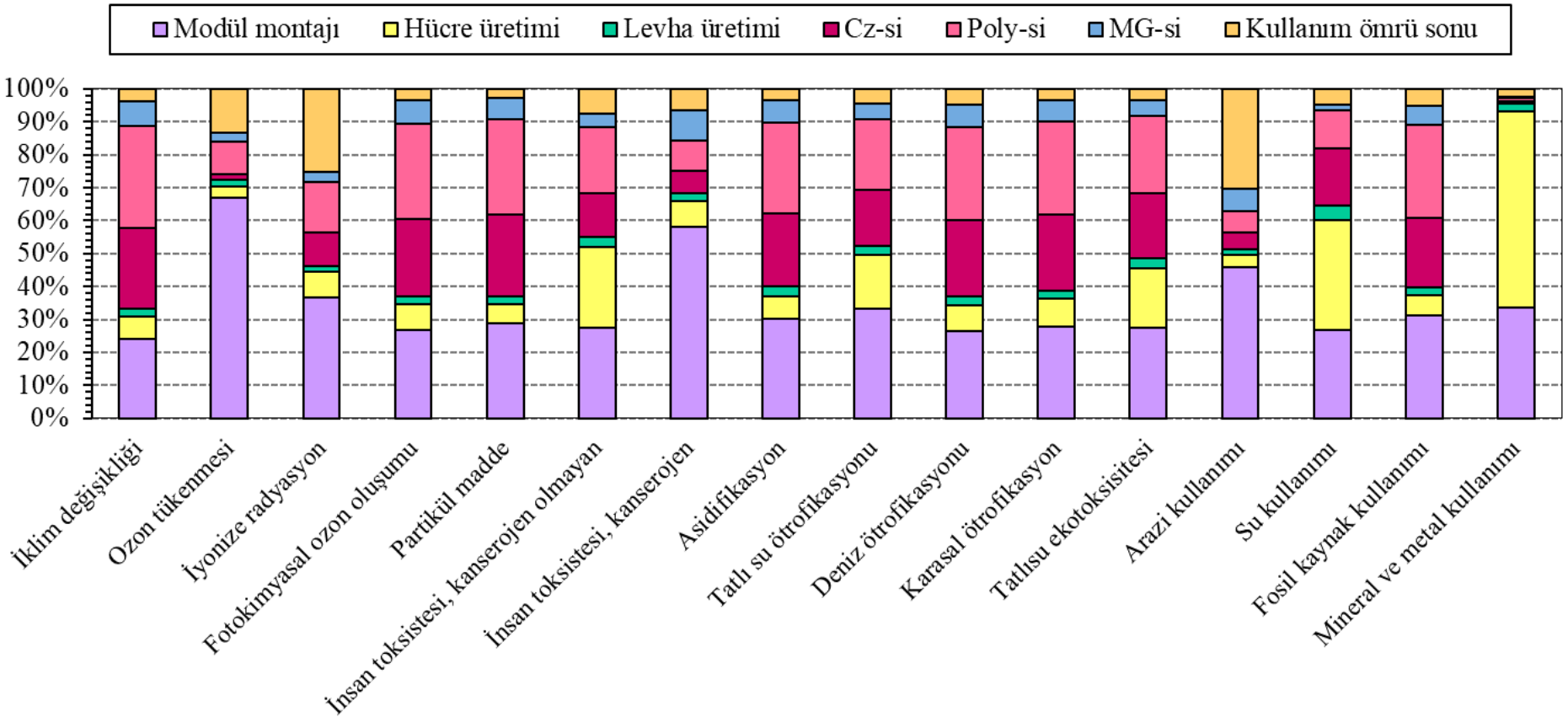
4.1.2. PERC Modül Üretiminden Kaynaklanan Sıcak Noktalar

Şekil 23'te, PERC modülüne ait ana üretim aşamalarının her bir etki kategorisine olan katkısı yüzdesel olarak gösterilmektedir. Modül montajı, Czochralski silikon (Cz-Si) ve polisilikon (poly-Si) üretim aşaması, etki kategorilerinin çoğuna ana katkı yapan aşamalar olarak belirlenmiştir.

GWP sonuçları, en önemli etkilerin poly-Si, Cz-Si ve modül montajından kaynaklandığını ve sırasıyla %31, %25 ve %24'ünü temsil ettiğini göstermektedir. Yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle, poly-Si ve Cz-Si üretim aşamaları en yoğun GWP emisyonlarına sebep olan adımlardır. Temel senaryoya göre üretim lokasyonunu temsil eden Çin, karbon yoğun olan kömür bazlı bir elektrik karışımına sahiptir. Çin'deki madencilik süreci, tesis işletimi ve kömür taşımacılığı göz önüne alındığında, elektrik kaynağı olarak kömürün varsayılan kullanımı, büyük miktarda GHG emisyonuna sebep olmaktadır. Şekil 24, modül montaj aşaması bileşenlerinin etki kategorilerine olan katkısı yüzdesel olarak gösterilmektedir. Modül montaj aşaması için en önemli sıcak nokta alüminyum çerçeve (Al alaşımları) üretimidir (yaklaşık %30).

HTP-kanser olmayan etki kategorisi dikkate alındığında, en önemli etkiler modül montajı (28%), hücre üretimi (24%) ve poly-Si (%20) üretim aşamasından kaynaklanmıştır. HTP-kanser etki kategorisi için ise, modül montajı %58'lik bir pay ile en önemli katkı yapan aşama olmuştur. Modül montajı sırasında alüminyum çerçeve (alüminyum alaşımları) üretimi, insan toksisitesi üzerinde önemli katkıya sahiptir (HTP-kanserojen; %67) (Şekil 24). Ek-6.6'da hücre üretim aşaması bileşenlerinin etki kategorilerine olan katkısı yüzdesel olarak gösterilmektedir. Hücre üretimi sırasında, kurşun, arsenik ve cıva gibi elementlerin havaya emisyonuna sebep olan gümüş bazlı macun (ön tarafı oluşturmak için kullanılan iletken metal macun), elektrik ve modüller için cam üretim prosesleri, en önemli sıcak noktalardır.

FEP'ye, en yüksek dört katkı yapan aşama sırasıyla modül montajı (%33), poly-Si (21%), Cz-Si (17%) ve hücre üretimi (%16) olmuştur. Silikon saflaştırma ve hücre üretim süreçleri sırasında, nitrojen oksitler, fosfatlar ve nitrat emisyonları hava ve suya yayılmaktadır. Hücre üretimi sırasında, gümüş bazlı macun gibi metalle ilgili malzemelerin tedarik zinciri, bu kategori içinde en yoğun sıcak noktayı oluşturmaktadır. Metal eritme sürecinin pirometalurji veya hidrometalurj aşamalarında, çeşitli asitler kullanılmaktadır, bu da FEP ve AP üzerinde önemli etkiye sebep olabilir.



Şekil 23: PERC modülüne ait ana üretim aşamalarının her bir çevre etki kategorisine olan yüzdesel katkısı.

Modül montaj aşamasında ise, enkapsülen, arka tabaka ve alüminyum çerçeve üretimi, bu etki kategorisine katkıda bulunan başlıca sıcak noktalardır. Bu malzemelerin üretimi ve yaşam döngüsü sırasında, fosfat ve nitrojen oksitler yayılabilmektedir (Lunardi ve diğ., 2018).

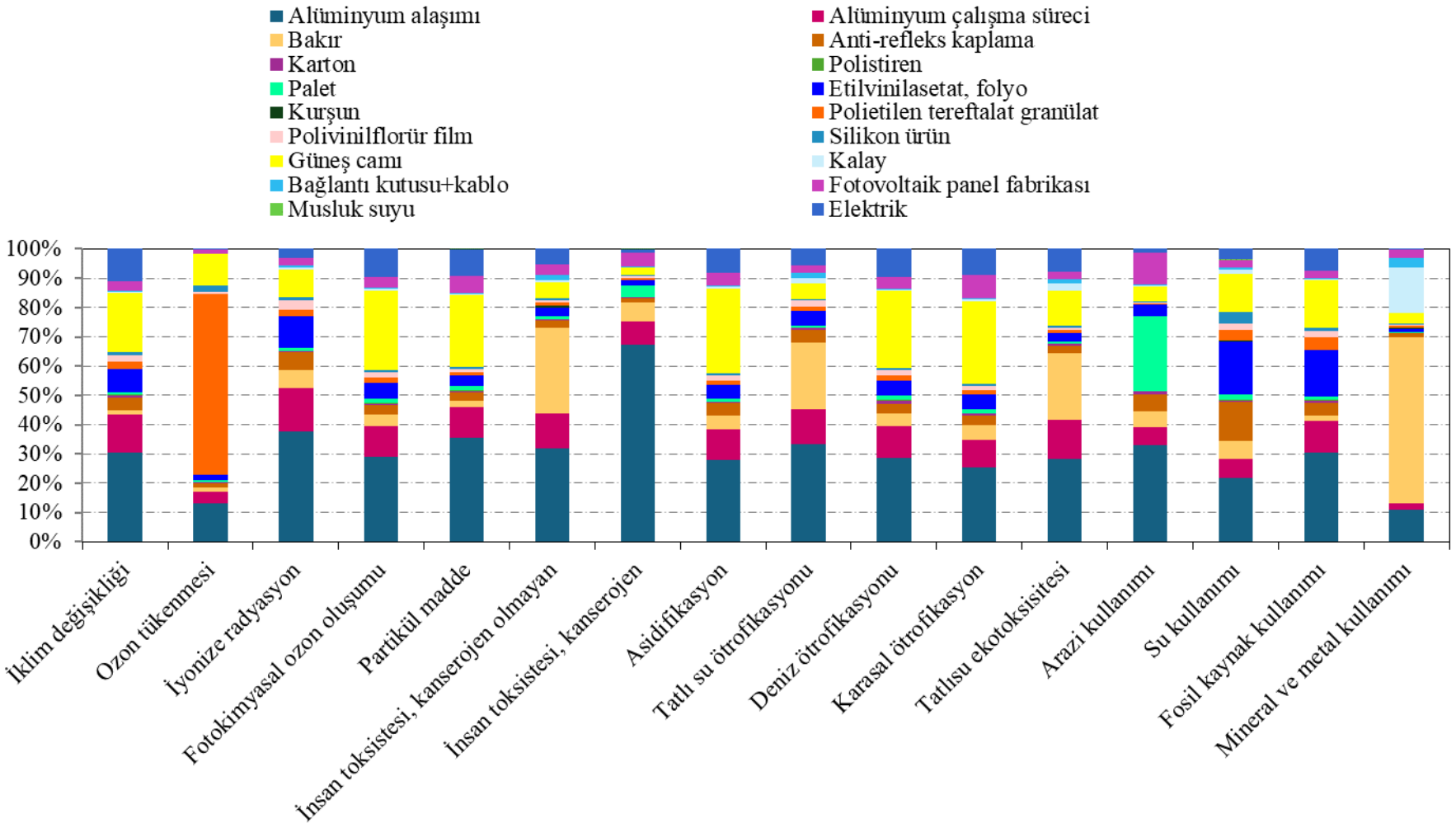
FETP etki kategorisine olan katkılar esas olarak, modül montajı (%27) aşamasından kaynaklanmıştır. Bunu sırasıyla poly-Si (%24), Cz-Si (%20) ve hücre üretimi (%18) takip etmiştir. Alüminyum alaşımı ve bakır, bu kategoride modül montajından gelen en önemli sıcak noktalardır. Hem FEP hem de FETP etki kategorilerinde alüminyum alaşımının sıcak nokta olmasında, birincil alüminyum tedarik zincirinde, boksit sindiriminden kaynaklanan kırmızı çamurun bertaraf edilmesinin de etkisi olabilir. Bakır, cam ve kâğıt kullanımı da luFETP sonuçlarını artırabilmektedir.

ADP fosil, modül montajı (%31), poly-Si (%28) ve Cz-Si (%21) olmak üzere üç aşamanın etkisini paylaşmaktadır. ADP-nihai ise, hücre üretimi (%60) ve modül montajı (%34) aşamalarından en yüksek etki yükünü almıştır. Bu etkiler, temel olarak yenilenemeyen kaynakların (esasen metaller) kullanımından kaynaklanmaktadır. Hücrelerde bakır ve gümüş gibi metallerin, modül montaj aşamasında ise alüminyumun ve bakır kullanılması, diğer malzemelere kıyasla daha yüksek etkilere sebep olabilir.

Diğer çevresel etki kategorileri olan, ODP, IRP, POCP, PM, AP ve MEP, TEP ve WU için, üç ana katkı yapan aşama modül montajı, poly-Si ve ve Cz-Si'dir. LU için, modül montajından (%46) sonra hücre üretim aşamasının önemli katkısı (%36) olmuştur. ODP, IRP ve LU hariç, kullanım ömrü sonu aşamasının diğer etki kategorisine olan katkısı ihmal edilebilir düzeydedir (neredeyse 5%în altında).

4.1.3. Sistem Dengesi Bileşenlerinin Üretiminden Kaynaklanan Sıcak Noktalar

Bölüm 3.1.1'de, sistem dengesi bileşenlerinin çevresel etki kategorilerine olan yüzdesel katkılarına değinilmiştir. Ek-6.7'de, invertör, montaj yapısı ve elektrik tesisatı üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Buna göre, montaj yapısı, invertör ve elektrik tesisatı için GWP sırasıyla 9.7 g CO_2 eşd./kWh, 8.7 g CO_2 eşd./kWh ve 2.3 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. GWP etkisi, büyük ölçüde modül montaj yapısı ve invertör üretilmesi sırasında kullanılan alüminyum ve bakır üretiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 24: Modül montaj üretim aşamasının her bir çevresel etki kategorisine olan yüzdesel katkısı.

İnsan toksisitesi ile ilgili etkiler incelendiğinde, HTP-kanser olmayan (kanser) etkisi invertör, elektrik tesisatı ve montaj yapısı üretimi için sırasıyla 5.6E-07 (2.4E-08), 5.1E-07 (1.3E-08) ve 1.9E-07 (1.2E-08) olarak hesaplanmıştır. HTP-kanser olmayan etkisi için, en önemli sıcak nokta bakır üretimiyken, HTP-kanser etkisi için çelik ve bakır girdileri iki sıcak nokta olarak ön plana çıkmaktadır. İnvertörlerin, DC bağlantı kondansatörü ve bara gibi bileşenlerinin üretimi sırasında, özellikle bakır metalinin kullanımı, çevresel etkisi açısından ağırlaştırıcı bir faktördür (Baudais ve diğ., 2023). Bakırın çıkarılması ve işlenmesi ile invertör ve bileşenlerin üretimi, insan toksisitesi ve metal tükenmesine önemli katkılar yapmaktadır (Eskew ve diğ., 2018).

FEP'e en çok katkıda bulunan sistem dengesi bileşenleri, invertör (0.0074 g P eşd./kWh) ve elektrik tesisatıdır (0,0069 g P eşd./kWh). FETP etki kategorisi için ise, elektrik tesisatı (698 CTUe/kWh) ve invertördür (640 CTUe/kWh). Her iki etki kategorisine en çok katkıda bulunan başlıca madde bakırdır. Üretim aşamasında bakır cevherinin yoğunlaştırılması, toksik metaller (bakır, çinko, gümüş, nikel) açısından zengin atıklar oluşturmaktadır. Bu atıklar, genellikle atık havuzları olarak bilinen barajların arkasında depolanmaktadır ve bu da uzun süreler boyunca çevreye sızmasına sebep olabilir. Bu, çoğunlukla bakırdan yapıldıkları için elektrik tesisatının katkısını açıklamaktadır. Hurda bakır ve atık plastik dahil olmak üzere, atık elektrik kablolarının yakılması işlemleri de elektrik tesisatının sebep olduğu ekotoksisite kaynaklarıdır (Wernet ve diğ., 2016).

Montaj yapısının üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin tümünde, sıcak nokta alüminyumdur. ADP-fosil ve ADP-nihai için, montaj aşamasının ikinci en yüksek katkı yapan sıcak noktası ise yüksek yoğunluklu polietilendir. Montaj yapısının üretimi, ADP-fosil etkisine en yüksek katkıyı yapmıştır (107 MJ). Alüminyum üretimi sırasında, fosil kaynakların kullanımı bunun başlıca nedenidir. Boksit rafinasyonu, alümina indirgeme ve ergitme, birincil alüminyum üretiminde en yoğun enerji kullanan üç işlemdir. Bu adımlar sırasında, tüketilen ana enerji kaynakları kömür, petrol ve doğal gazdır. Bu da montaj yapısının, daha yüksek GHG emisyonu katkısına sebep olmuş olabilir.

ADP-nihai etkisine, sistem dengesi bileşenlerinden en fazla katkıyı elektrik tesisatı üretimi (0.0021 g Sb eşd./kWh) yapmıştır. İkinci en büyük bileşen ise, invertördür (0.0018 g Sb eşd./kWh). Her iki sistem dengesi bileşeni için sıcak nokta üretim sırasında bakırın kullanılmasıdır. Sistem dengesi bileşenlerinin üretimi sırasında, bakır ve gümüş gibi metallerin

ve montaj yapısı aşamasında alüminyumun kullanılması, diğer malzemelere kıyasla çevresel etkilere daha fazla katkı yapmıştır.

4.1.4. Ulaşımdan Kaynaklanan Sıcak Noktalar

Ulaşımın modellenmesi temel olarak; (i) modül ve sistem dengesi bileşenlerinin üretim fabrikasından kurulum sahasına taşınması ve (ii) kullanılmış modüllerin kurulum sahasından düzenli depolama veya geri dönüşüm için bertaraf sahasına taşınmasını içermiştir. Modül ile ilişkili ulaşım yükleri, kütlesi ve tedarikçi konumuna bağlı olarak daha uzun seyahat mesafesi nedeniyle diğer bileşenlere göre daha fazladır. Sistem dengesi bileşenleri, modüllerden önemli ölçüde daha hafiftir ve bu nedenle bunlara karşılık gelen ulaşım yükleri daha azdır. Bu çalışmada, sistem dengesi bileşenlerinin Türkiye'de üretildiği ve kurulum sahasına nakliye edildiği varsayılmıştır. Bu sebeple, yol açacağı çevresel etkilerin yükü daha azdır.

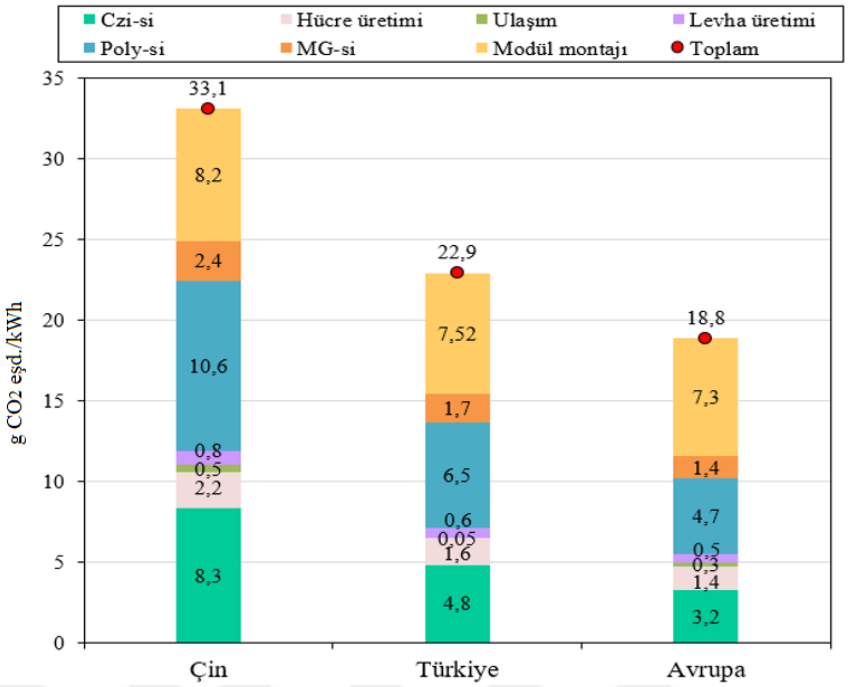
Temel senaryoya göre ulaşım, Çin'deki üretimden kaynaklanan çevresel etkilerin üçüncü kaynağıdır ve 0.01%-%3.5 oranında çevresel etkilere katkısı olmuştur. Tüm modül ve sistem dengesi bileşenleri için düşünüldüğünde, okyanus ötesi gemi taşımacılığı çevresel etkilere en yüksek katkı yapan sıcak noktayı oluşturmaktadır. Ulaşım etkileri, çoğunlukla gemi ve kamyonların dizel emisyonlarından ve dizel üretiminden kaynaklanmıştır.

4.2. ALTERNATİF SENARYOLARIN SONUÇLARI

4.2.1. Üretim Lokasyonunun Etkisi

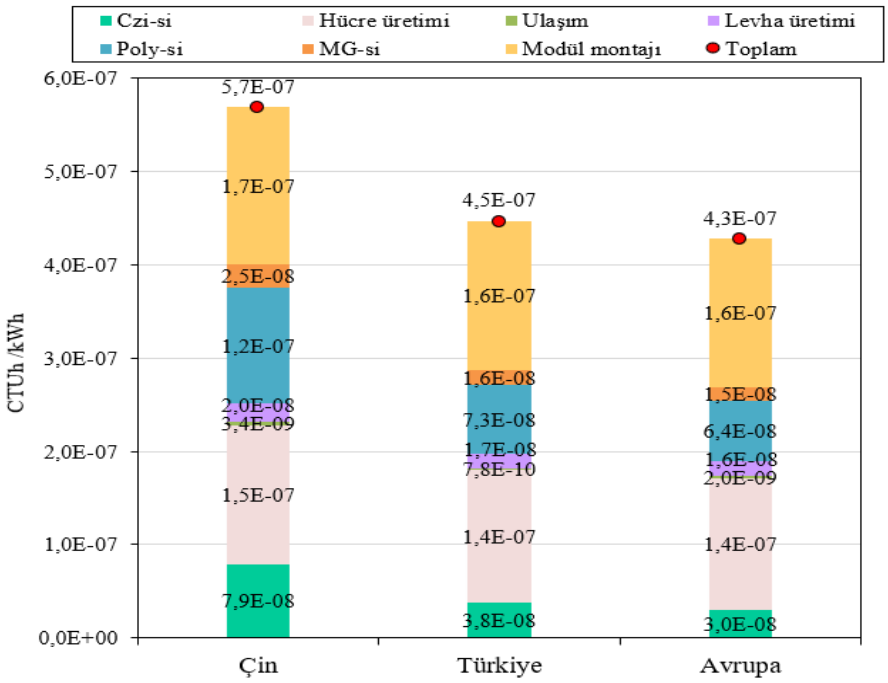
Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modüllerinin, kWh başına GWP sonuçları Şekil 25'te gösterilmektedir. Buna göre, Çin, Türkiye ve Avrupa'da üretilen modüllerin toplam GWP etkisi sırasıyla 33.1 g CO_2 eşd../kWh, 22.9 g CO_2 eşd../kWh ve 18.8 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Türkiye ve AB'deki modül üretimi, Çin'e kıyasla sırasıyla ~%30.8 ve ~%43.2 daha az GHG emisyonuna sebep olmuştur. Her üç lokasyondaki modül üretim süreçlerinin, nihai GHG emisyonlarına göreceli katkılarına bakıldığında, yüksek elektrik gereksinimleri nedeniyle modül montajı, poly-si ve Cz-si üretimi en yoğun emisyona neden olan adımlardır.

Ulaşım aşaması için, Çin'de üretilen modülün Türkiye'ye nakliyesinin gemi taşımacılığı ile sağlanması, en önemli katkıyı yaparken, ulaşım her üç lokasyondaki üretim için %1'in altında bir paya sahiptir. Sonuçlar, Avrupa'da üretilen modüllerin karbon yoğunluğunun Çin ve Türkiye'den daha düşük olduğunu göstermektedir.



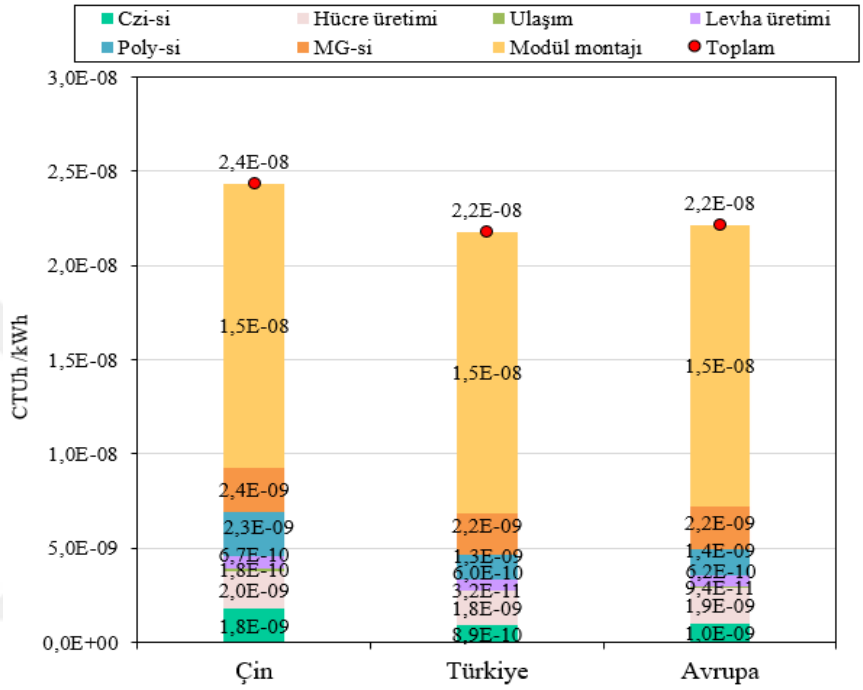
Şekil 25: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g CO_2 eşd./kWh cinsinden GWP sonuçları.

Şekil 26 ve Şekil 27'de, sırasıyla HTP-kanser olmayan ve HTP-kanser sonuçları her üç lokasyona göre gösterilmektedir.



Şekil 26: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUh/kWh cinsinden HTP-kanser olmayan sonuçları.

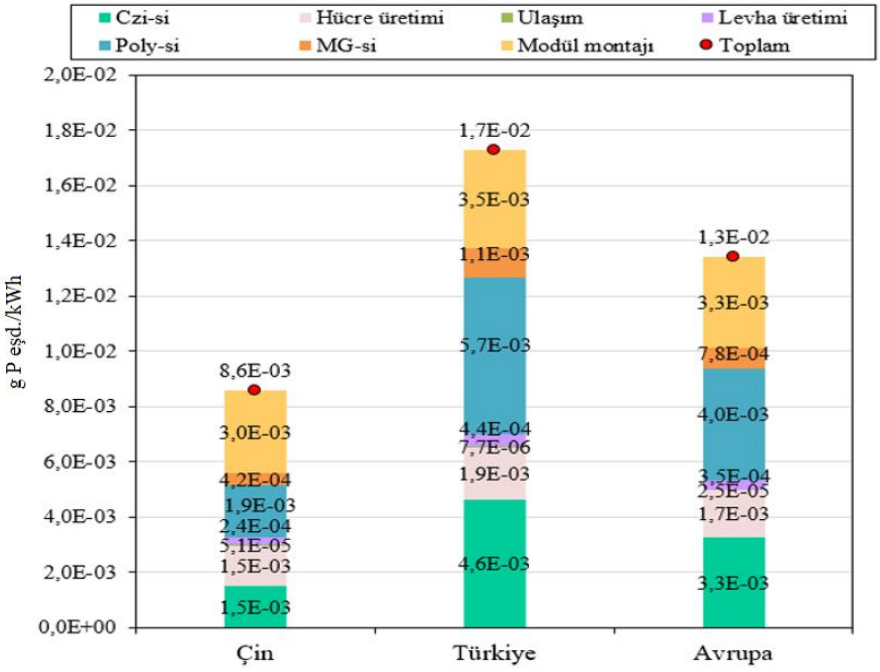
En yüksek toplam HTP-kanser olmayan etkisi, 5.7E-07 CTUh/kWh olarak Çin üretiminde ölçülmüştür. Türkiye ve Avrupa üretimde yakın olmakla birlikte, sırasıyla 4.5E-07 CTUh/kWh ve 4.3E-07 CTUh/kWh olarak hesaplanmıştır. HTP-kanser için ise, her üç lokasyonda sırasıyla 2.4E-08 CTUh/kWh, 2.2E-08 CTUh/kWh ve 2.2E-08 CTUh/kWh olarak ölçülerek birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



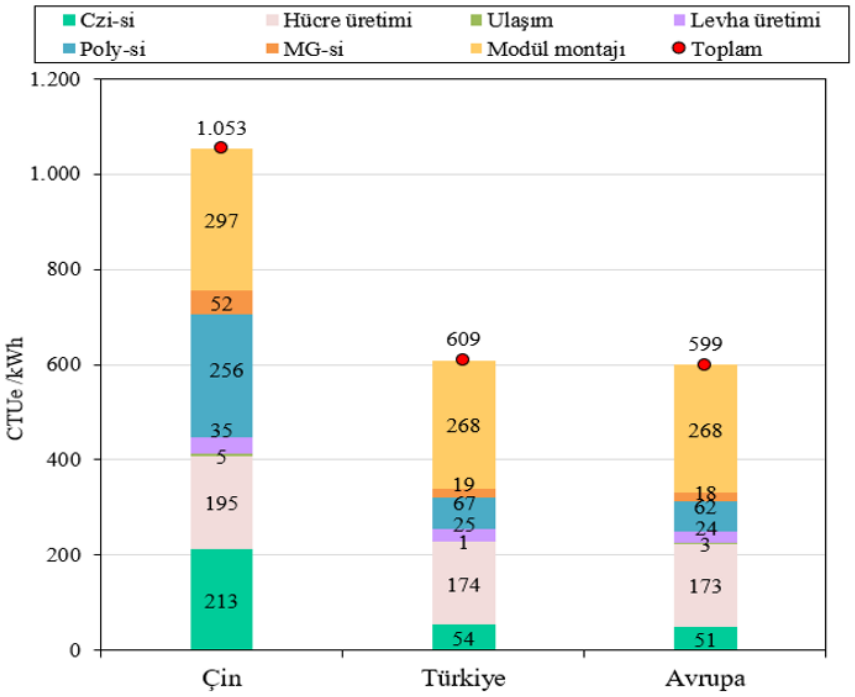
Şekil 27: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUh/kWh cinsinden HTP-kanser sonuçları.

Şekil 28, PERC modüllerinin kWh başına FEP sonuçları her üç lokasyon için gösterilmektedir. Türkiye üretim lokasyonu, en yüksek FEP etkisine sahip lokasyon olarak ölçülmüştür (1.7E-02 g P eşd./kWh). Bunu sırasıyla, Avrupa (1.3E-02 g P eşd./kWh) ve Çin (8.6E-03 g P eşd./kWh) takip etmiştir. Türkiye, AB ve Çin'deki üretime kıyasla sırasıyla ~%23.5 ve ~%49.4 daha yüksek FEP etkisine sahiptir.

Şekil 29'da, her üç lokasyonda gerçekleştirilen modül üretimine ait CTUe/kWh cinsinden FETP sonuçları gösterilmektedir. Çin üretimi, en yüksek FETP etkisine sebep olmakla birlikte (1053 CTUe/kWh), Türkiye (609 CTUe/kWh) ve Avrupa (599 CTUe/kWh) benzer bir etki göstermiştir. Çin, diğer lokasyonlara göre yaklaşık %42.2 oranında daha yüksek FETP'ye sahiptir.

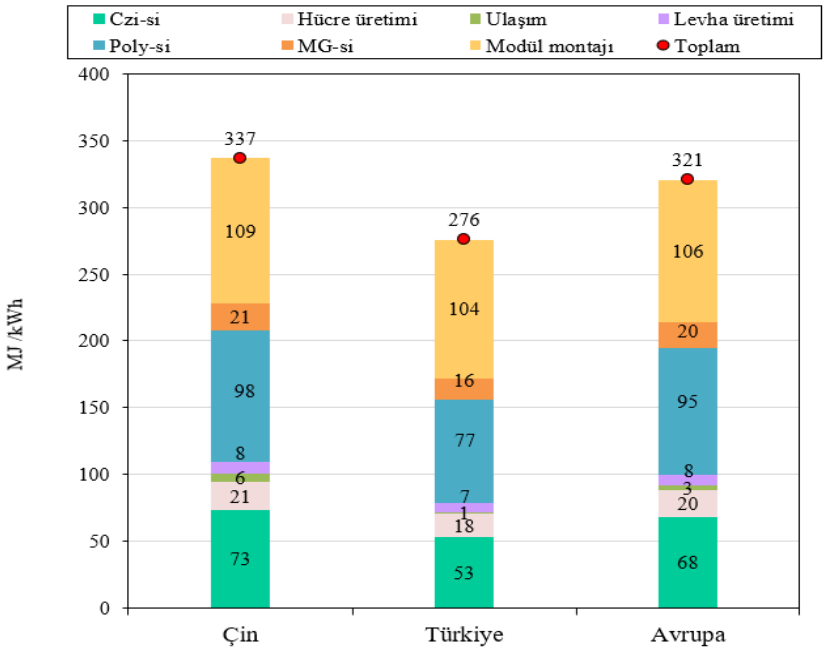


Şekil 28: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g P eşd./kWh cinsinden FEP sonuçları.

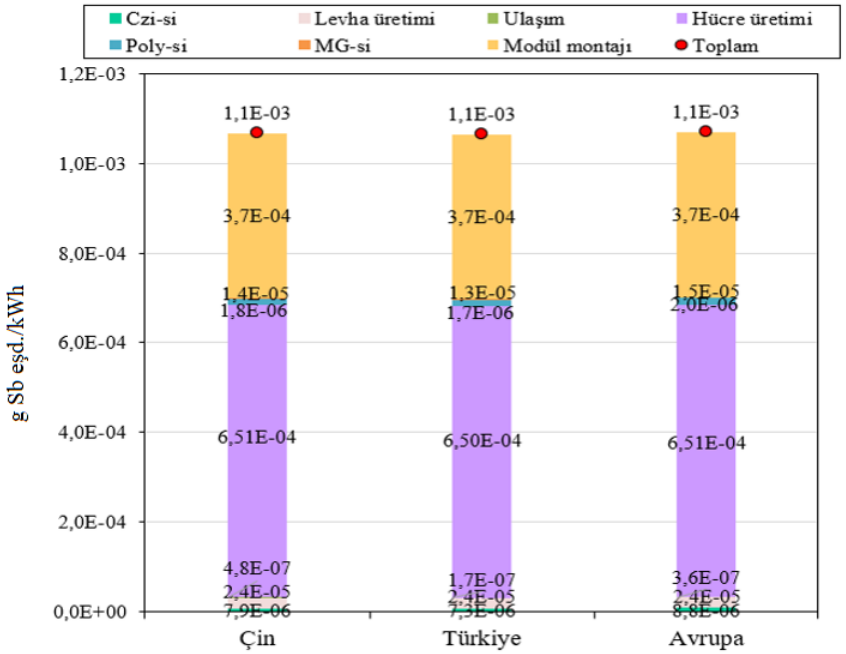


Şekil 29: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için CTUe/kWh cinsinden FETP sonuçları.

Şekil 30'da, üç farklı lokasyona göre PERC modül üretimi için MJ/kWh cinsinden ADP-fosil sonuçları gösterilmektedir. Çin ve Avrupa modül üretimi, Türkiye'ye göre sırasıyla %18.1 ve %14.1 oranında daha yüksek ADP-fosil etkisine sebep olmuştur. Şekil 31'de, ADP-nihai için, her üç lokasyona ait üretim sonuçları oldukça benzerdir.

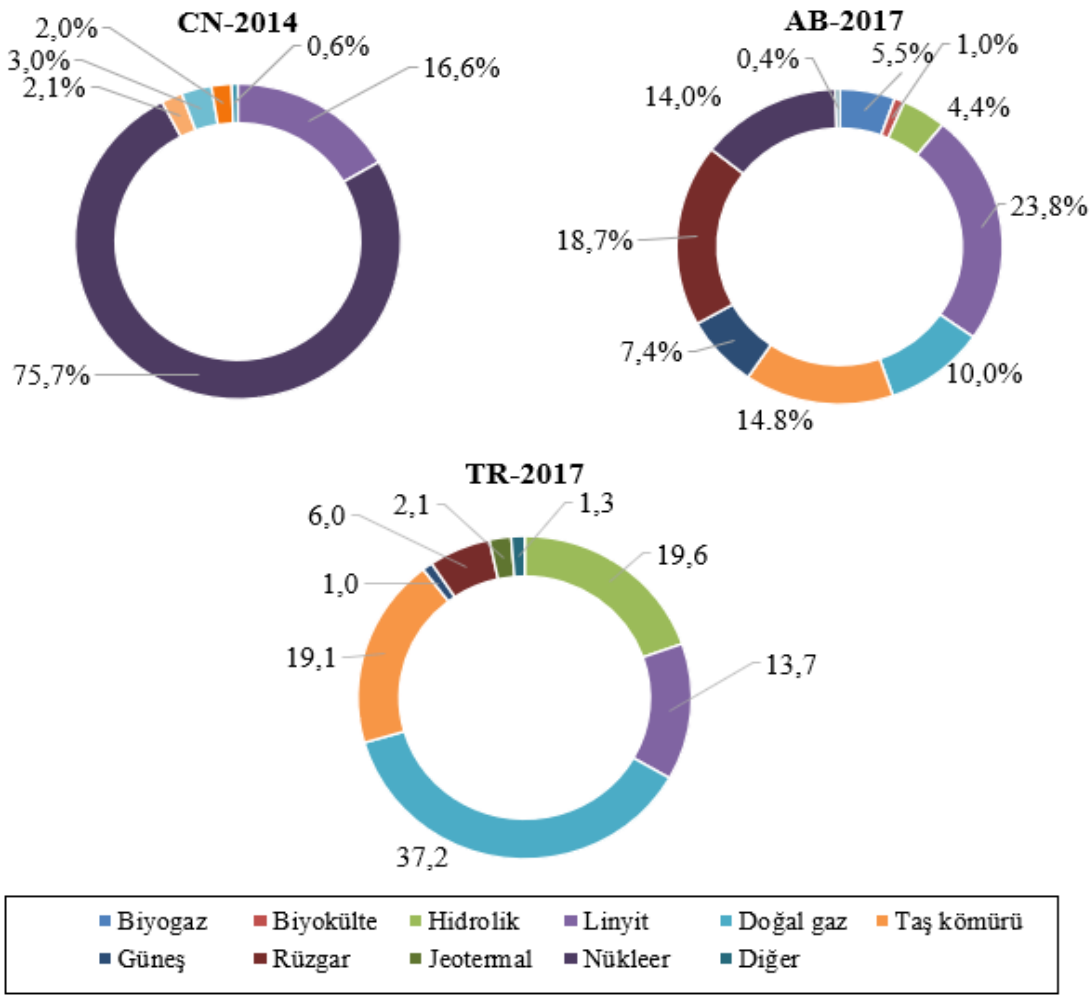


Şekil 30: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için MJ/kWh cinsinden ADP-fosil sonuçları.



Şekil 31: Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için g Sb eşd./kWh cinsinden ADP-nihai sonuçları.

Ek-6.8 ve Ek-6.9'da, PERC modül üretiminin her üç lokasyona göre diğer çevresel etki kategorilerine olan katkıları gösterilmiştir. Emisyonların büyük bir kısmı, üretim sırasındaki elektrik tüketiminden kaynaklandığından, üretim lokasyonuna ait elektrik karışımı, PV sistemlerinden kaynaklanan etkilerin değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Şekil 32'de, bu çalışmada seçilen her üç lokasyon için elektrik üretim payları gösterilmektedir. Her üç lokasyon da kendine özgü bir elektrik karışımına sahiptir.



Şekil 32: Çin, Türkiye ve Avrupa elektrik karışımlarının Ecoinvent v3.7'ye göre payları.

Çin'in, 2014 yılı elektrik karışımının yaklaşık dörtte üçü kömüre dayanmaktadır. YEK'ler arasında, hidroelektrik en büyük paya sahiptir (%16.6) ve bunu rüzgar (%3.0) takip etmektedir. Avrupa elektrik karışımı, yaklaşık yarısının YEK'den üretildiği bir teknolojiye sahiptir. Rüzgar (%18.7), güneş (7.4%) ve biyogaz (%5.5) olmak üzere, yüksek oranda YEK payı içermektedir. Linyitin payı %23.9 iken, taş kömürü %14.8'bir paya sahiptir. Türkiye 2017 yılı elektrik üretiminin, en büyük payı doğalgazdan gelmektedir (%37.2). Bunu hidrolik enerji (%19.6) ve

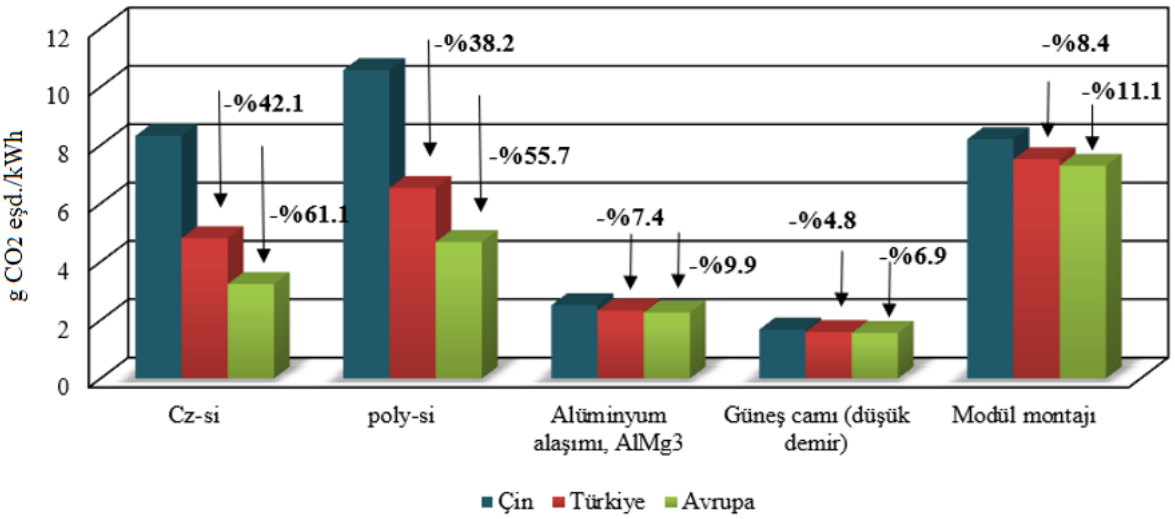
taşkömürü (%19.1) takip etmektedir. YEK payı ise, rüzgar (%6), güneş (%1) ve jeotermal enerjiden (%2.1) karşılanmaktadır.

Çin'de üretilen modüller, FEP, ODP, IRP, LU ve WU etki kategorilerinde, Türkiye ve Avrupa'da üretilenden daha düşük etkiye sahiptir. Modülün Avrupa'da üretilmesi, IRP ve ODP açısından (diğer lokasyonlarla oldukça yakın olmakla birlikte) daha fazla etkiye sebep olmuştur. IRP'ye ilişkin sonuçlar da, Avrupa elektrik karışımında nükleer enerji payının yüksek olması etkili olmuştur. Diğer etki kategorileri açısından, Avrupa'daki modül üretiminin etkisi, su kullanımı hariç olmakla birlikte Çin'den, ADP-nihai hariç olmak birlikte, Türkiye'den daha düşüktür.

Her bir çevresel etki kategorisi için sonuçlardaki farklılıklar, temel olarak seçilen lokasyonlara ait elektrik karışımlarının farklı bileşiminden kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin arazi ve su kullanımına yönelik daha yüksek etkisi, elektrik karışımında doğal gazın ve hidroelektrik oranının fazla olması etkili olmuştur. Doğal gaz ve baraj teknolojileri ile hidroelektrik, kömüre göre daha fazla doğal arazi dönüşümünü gerektirmektedir. Genel olarak, güneş enerjisi ve rüzgâr gibi yenilenebilir teknolojiler diğer enerji kaynaklarına göre daha az doğal araziye ihtiyaç duymaktadır (Yilan ve diğ., 2020). FEP'e yönelik Türkiye ve Avrupa'da hesaplanan daha yüksek değerlerde, linyit kömürü ve doğalgazın yüksek payı önemlidir. Linyit madenciliği aşamasında meydana gelen fosfatların tatlı suya emisyonu ve doğal gazda yakıtın yanması ve nakliyesinden kaynaklanan NO_X emisyonları bu etkinin çoğunluğuna katkıda bulunur (Atilgan ve Azapagic, 2015). PV modüllerinde bulunan mutlak mineral ve metal miktarı, her üç lokasyon içinde aynı şekilde modellenmesinden dolayı, ADP-nihai sonuçları benzerdir. Çin elektrik karışımında, taşkömürü payının yüksek olması (%75.7), GWP, PM, AP, MEP ve TEP açısından daha yüksek sonuçların alınmasında etkili olmuştur.

Modül montajı, poly-Si ve Cz-Si aşamaları, modül üretiminde yoğun elektrik gereksinimi olan aşamalardır ve bu çalışmada modül üretiminden kaynaklanan çevresel etkileri belirleyen ana aşamalar olarak ön plana çıkmıştır. Modül montajı aşamasında, alüminyum alaşımı ($AlMg_3$) ve güneş camı (düşük demirli) üretim aşamaları sıcak noktalardır. Şekil 33'de, bu sıcak noktaların üretiminin her üç lokasyonun elektrik karışımına göre hesaplanan GWP sonuçları gösterilmektedir. Cz-Si ve poly-Si aşamalarının GWP'sinin, üretim yerinin Türkiye olarak değiştirilmesiyle sırasıyla %41.2 ve %61.1'e, Avrupa olarak değiştirilmesiyle sırasıyla %38.2 ve %55.7'ye düşürülebileceği gözlemlenmiştir. Alüminyum ve güneş camı üretim aşamaları da

kaynaklanan GWP yükü yakın olmak birlikte, en düşük GWP Avrupa elektrik karışımına bağlı üretimde hesaplanmıştır. Modül montaj aşamasında ise, Türkiye ve Avrupa elektrik karışımının tercih edilmesiyle, Çin'e göre sırasıyla %8.4 ve %11.1 azalma sağlanmıştır.



Şekil 33: Üç farklı lokasyonda üretilen Cz-Si, poly-Si, $AlMg_3$, cam ve modül montajı aşamalarının GWP değişimi.

Çin elektrik karışımını baz alan temel durum senaryosu, çoğu etki kategorisinde en yüksek etkiyi göstermektedir. Oluşturulan Türkiye ve Avrupa senaryosu ile, elektrik karışımlarının ülkeler özelinde değişimiyle, temel durum senaryosunun çevresel etkilerinde azalmalar sağlanabileceği gözlenmiştir. Avrupa senaryosu, daha fazla yenilenebilir enerji kaynağı içerdiğinden, ODP ve POCP hariç tüm etki kategorilerinde temel durumun etkilerini azaltmaktadır. Çin senaryosu, elektrik karışımında nükleer enerjinin payının düşük olması nedeniyle, IR için daha düşük bir etki göstermiştir.

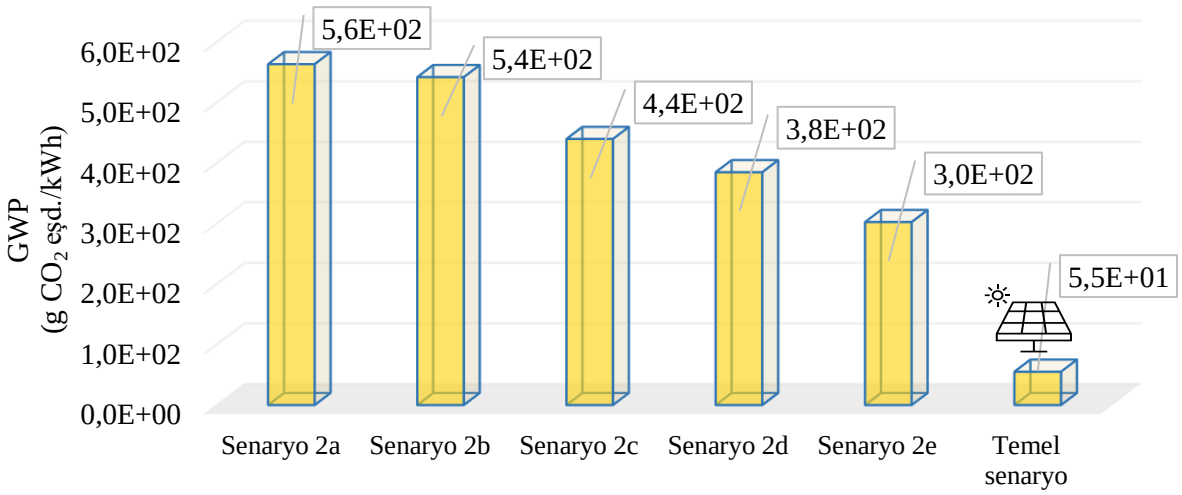
Çin, Türkiye ve Avrupa elektrik karışımlarının, YDD modeline ön plan elektriği olarak dahil edilmesi, silikondan modüle PV üretimi dikkate alındığında üretim yeri seçiminin GWP üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Üretime yönelik elektrik karışımının, yenilenebilir kaynaklara dönüştürülmesiyle hem GWP hem de diğer çevresel etkilerde azalmalar sağlanabilmektedir.

Çalışmada kullanılan Çin ve Türkiye'ye ait elektrik karışım verileri, büyük ölçüde fosil yakıtlara dayalıdır ve veri kaynağı Ecoinvent v3.7'yi temsil etmektedir (Şekil 32). Üretim yerinin çevre üzerine olan etkisinin daha doğru değerlendirilebilmesi için, güncel yıllara ait elektrik karışım verilerinin dikkate alınması önemlidir. Bununla birlikte, alüminyum gibi özel

aşamalara özgü elektrik karışımlarındaki gelişmelerin ve bunun PV sistemlerinin GWP'si üzerindeki etkisinin daha fazla izlenmesi tavsiye edilmektedir.

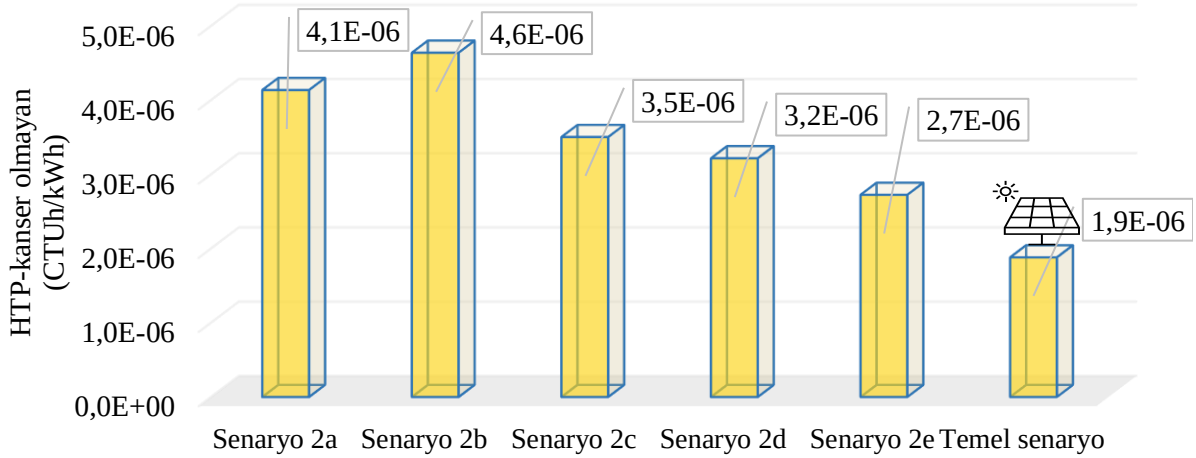
4.2.2. Şebeke elektriği

Bu bölümde, çalışmada ele alınan çatı üstü PV santrali tarafından üretilen 1 kWh'lik elektriğin, eşdeğer miktardaki şebeke elektriği (2017, 2023, 2025, 2030 ve 2035 yılları) etkileriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 34, temel senaryo ve farklı yıllara göre şebeke elektriğinden kaynaklanan GWP sonuçlarını göstermektedir. Temel senaryonun GWP etkisi, 5.5E+01 CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, temel senaryo ile aynı yılı temsil eden senaryo 2a'dan %90.2 daha düşüktür. Şebeke elektriğinin gelecek yıllarını içeren senaryo 2b, senaryo 2c, senaryo 2d ve senaryo 2e ye göre kıyasla sırasıyla %89.9, %87.5, %85.5 ve %81.7 olmak üzere daha düşük GWP katkısını sürdürmektedir.

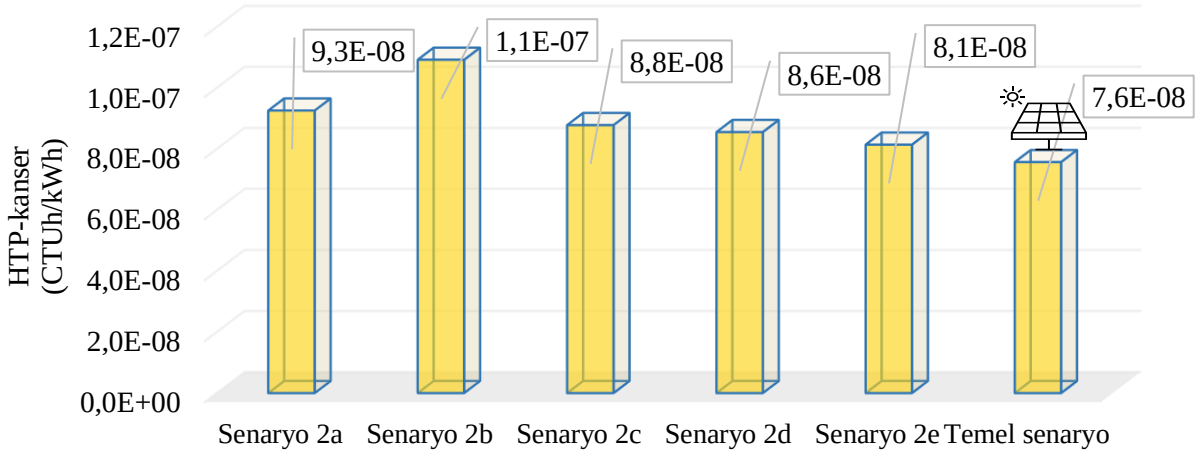


Şekil 34: GWP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.

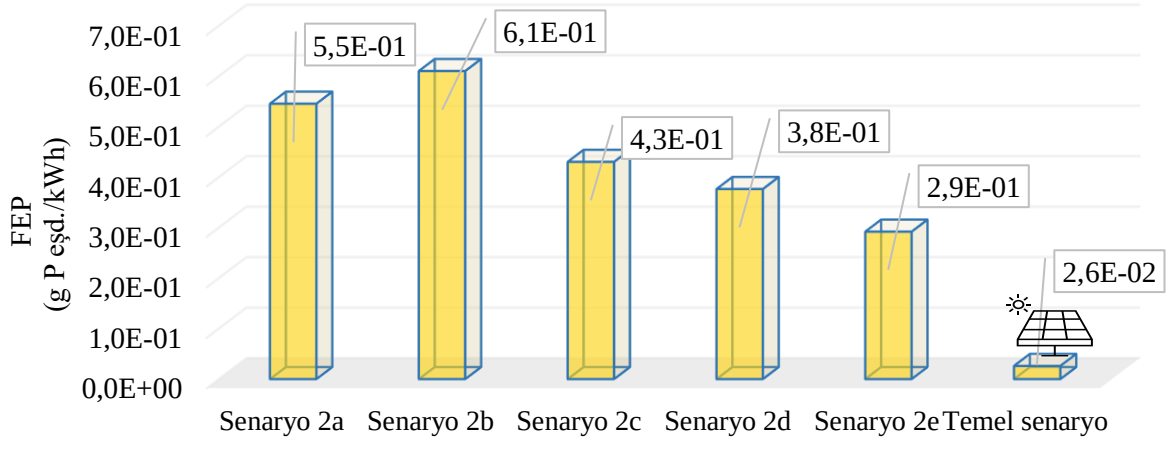
Şekil 35 ve Şekil 36'da insan toksisitesiyle ile ilişkili etki kategorilerine ait sonuçlar gösterilmektedir. Temel senaryo ile karşılaştırıldığında, HTP-kanser olmayan etkisi, senaryo 2a'ya göre %53.7 daha düşük iken, HTP-kanser etkisi ise %18.7 daha düşüktür. Şebeke elektrik karışımında yıllara göre tahmin edilen değişiklik, 2035 yılında da şebekeden kaynaklanan HTP-kanser olmayan etkinin 1.4 kat, HTP-kanser etkinin ise 1.1 kat daha yüksek olacağını göstermektedir. Şekil 37'de, çatı üstü PV için hesaplanan FEP değeri, şebeke elektriğine göre oldukça düşüktür (2.6E-02). Temel senaryoya göre, 2.2 kat daha düşük hesaplanan FETP etkisi ise, 2035 yılında 1.5 katlık bir orana düşmektedir (Şekil 38).



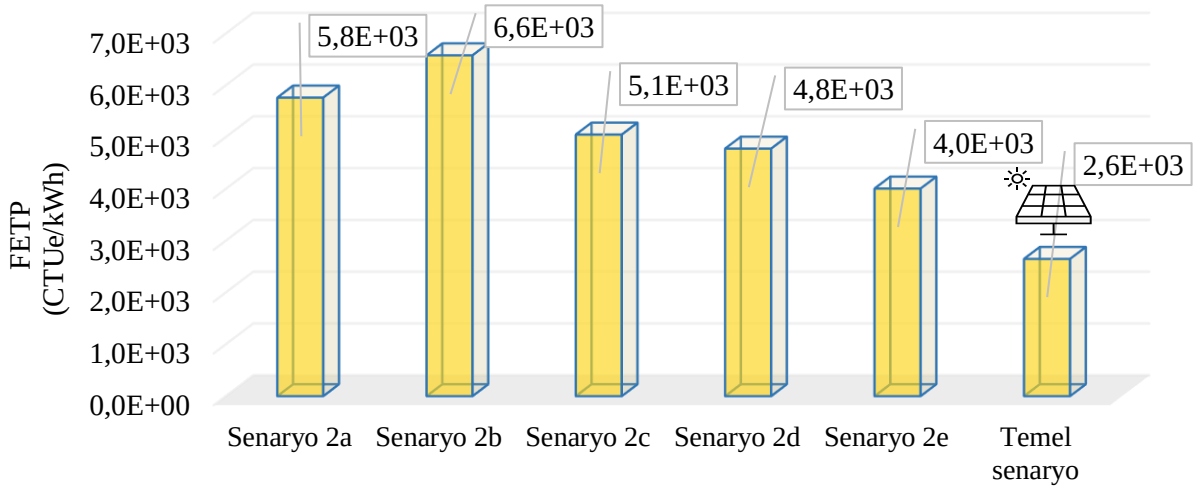
Şekil 35: HTP-kanser olmayan etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.



Şekil 36: HTP-kanser etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.

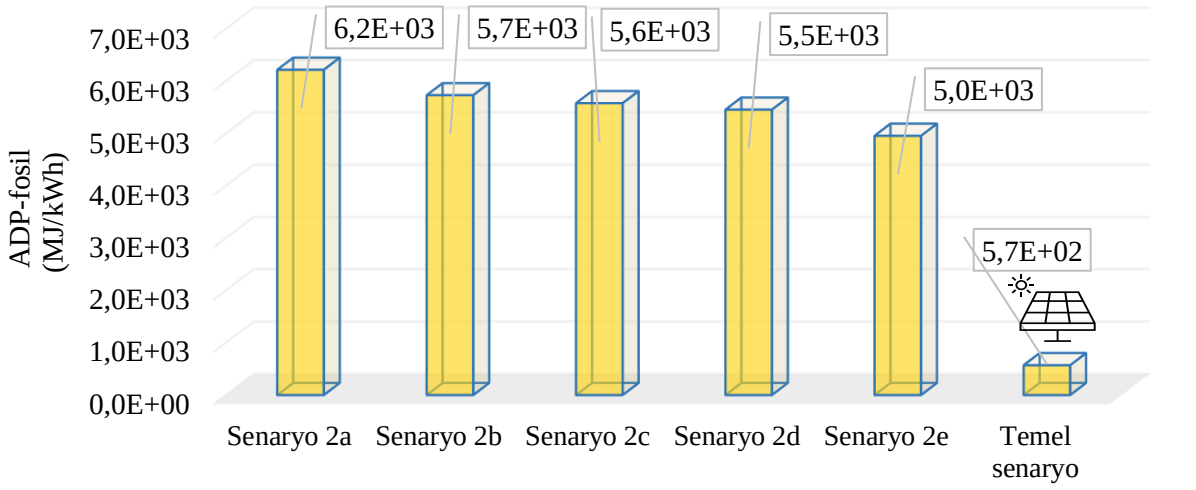


Şekil 37: FEP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.

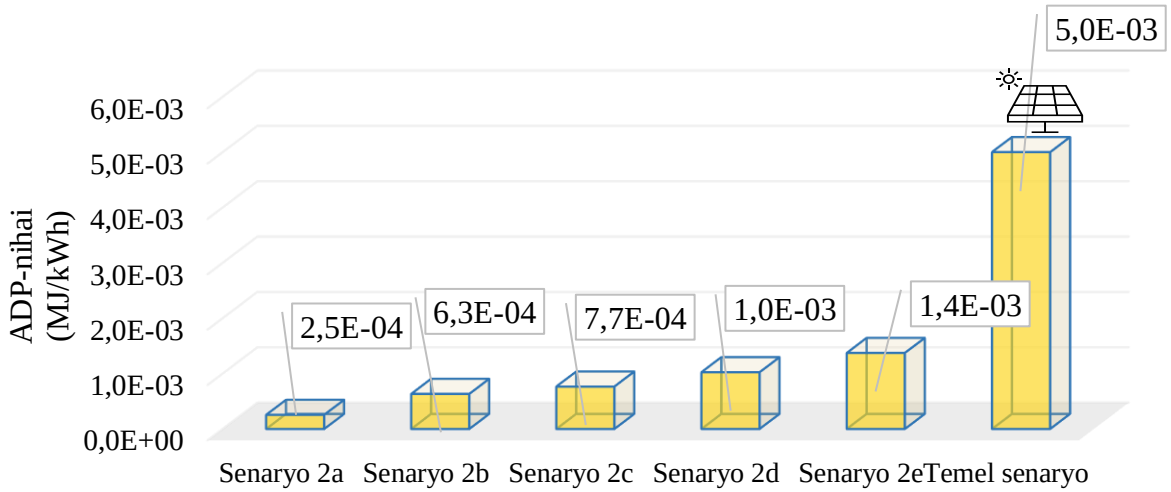


Şekil 38: FETP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.

ADP-fosil etki kategorisi için de, çatı üstü PV'nin önemli faydalar sağlamaktadır. ADP-fosil, her bir şebeke senaryosuna göre %90.8-%88.6 değişen aralıkta daha düşük etkiye sahiptir (Şekil 39). Buna rağmen, ADP-nihai etki kategorisinde PV sisteminden kaynaklanan etki oldukça yüksektir (5.3E-03 g Sb eşd./kWh). Öte yandan, şebeke elektrik karışımının ADP-nihai etkisi, 2035 yılına kadar artış göstermesi dikkat çekicidir (Şekil 40).



Şekil 39: ADP-fosil etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.



Şekil 40: ADP-nihai etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması.

Görülebileceği gibi, çatı üstü PV santralinin atölye binası çatısında kullanılması, Senaryo 2b'yi kapsayan şebeke elektriğine göre, GWP, HTP-kanser olmayan, HTP-kanser, FEP, FETP ve ADP-fosil için sırasıyla 10.2, 2.2, 1.2, 21.2, 2.2 ve 10.9 kat değişen oranlarda önemli azalmalar elde edilmiştir. Diğer çevresel etkilerin sonuçları ise, Ek-6.10 ve Ek-6.11'de gösterilmiştir.

Çatı üstü PV santrali, on altı etki kategorisinin on dördünde daha düşük etki yüküne sahiptir. Gelecek senaryolarda, Türkiye şebeke elektriğinden kaynaklanan etkilerin, yenilenebilir enerji payının arttırılmasıyla azaldığı gözlense de, çatı üstü PV santrali avantajlı konumunu sürdürmeye devam etmiştir. Öte yandan, %95 oranında (temel senaryoya göre) daha yüksek ADP-nihai etkisine yol açmaktadır. Bu da PV sistemlerinin çevresel faydalarının yanında, üretim süreçleri gibi diğer aşamalarından kaynaklanan olumsuz etkilerinin de olabileceğini göstermektedir.

4.2.3. Diğer Enerji Kaynakları

Tablo 11'de, diğer enerji kaynaklarını temsil eden senaryolar ve çatı üstü PV'nin, 1 kWh başına etkilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Çatı üstü PV santraline ilişkin değerler, temel senaryoya atıfta bulunmaktadır. Buna göre, çatı üstü PV santralinin GWP'si 55.1 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kömür, linyit ve doğalgaz enerji santrallerinden sırasıyla %95.1, %95.7 ve %91.9 daha düşüktür. Öte yandan, hidroelektrik (rezervuar) (52.0 CO_2 eşd./kWh), hidroelektrik (akarsu) (4.1 CO_2 eşd./kWh) ve rüzgar enerji santralinden (11.3 CO_2 eşd./kWh) daha yüksektir.

Tablo 11: Çatı üstü güneş PV ve diğer enerji kaynaklarını temsil eden senaryoların 1 kWh başına etki sonuçları.

Enerji Kaynakları	GWP (g CO_2 eşd./kWh)	HTP-kanser olmayan (CTUh/kWh)	HTP-kanser (CTUh/kWh)	FEP (g P eşd./kWh)	FETP (CTUe/kWh)	ADP-fosil (MJ/kWh)	ADP-nihai (g Sb eşd./kWh)	Kaynak
Senaryo 3a; Kömür	1.11E+03	1.02E-05	2.14E-07	0.58	20847	1.1E+04	0.00031	Ecoinvent v3.7
Senaryo 3b; Linyit	1.27E+03	1.21E-05	2.07E-07	2.87	1892	1.1E+04	0.00029	Ecoinvent v3.7
Senaryo 3c; Doğal gaz	6.8E+02	1.83E-06	3.97E-08	0.0071	3912	1.0E+04	0.00065	Ecoinvent v3.7
Senaryo 3d; Hidrolik (Rezervuar)	5.2E+01	7.75E-08	1.75E-08	0.0013	92	5.2E+01	3.3E-05	Ecoinvent v3.7
Senaryo 3e; Hidrolik (Akarsu)	4.0E+00	5.58E-08	1.63E-08	0.0009	72	3.7E+01	2.7E-05	Ecoinvent v3.7
Senaryo 3f; Rüzgâr	11.0E+00	3.64E-07	7.7E-08	0.0052	401	1.4E+02	0.00060	Ecoinvent v3.7
Güneş PV	55.1E+00	1.88E-06	7.6 E-08	0.026	2650	5.7E+02	0.0050	Bu çalışma

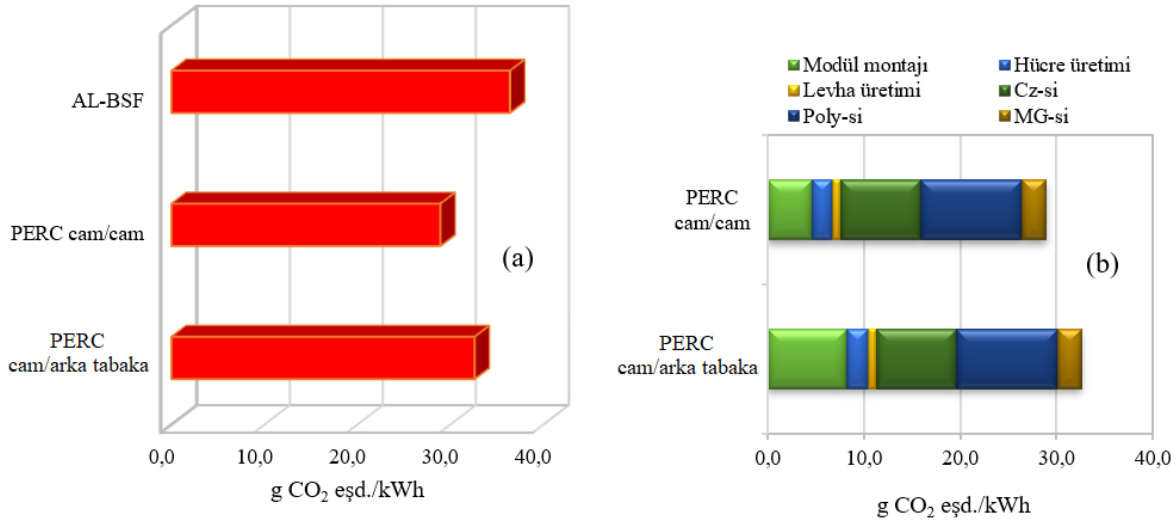
HTP-kanser olmayan etkisi, kömür göre %86.3 oranında, linyite göre %84.3 daha azken, doğal gaza göre %3.8 oranında daha fazladır. HTP-kanser etkisi de, güneş PV'sinin kömür ve linyite göre daha avantajlı olduğu (sırasıyla %64.5 ve %63.3 oranında daha az etki) önemli etki kategorilerindendir. FEP etki kategorisinde, linyit diğer tüm etki kategorilerine göre en baskın enerji kaynağıyken, FETP etki kategorisinde ise kömürün katkısı en fazladır. Her iki etki kategorisi için de, çatı üstü PV daha az (FEP; 2.6E-02, FETP; 2.7E+03) katkı sağlamıştır. Kömür, linyit ve doğalgazın 1 kWh elektrik üretimi sonucunda oluşan ADP-fosil etkisi, diğer tüm enerji kaynaklarına göre oldukça yüksektir. Çatı üstü PV, bu kategoride de önemli çevresel fayda sağlayarak, ADP-fosil etkisi 570 MJ olarak hesaplanmıştır. ADP-nihai'nin en yüksek yükü ise, çatı üstü PV santralinden sağlanan elektrik tedariğinden kaynaklanmıştır (0.0050 g Sb eşd./kWh).

Öncelikli olarak ele alınan yedi etki kategorisi incelendiğinde, güneş PV'sinin atölye binası çatısında kullanılması, ADP-nihai hariç diğer etki kategorilerin tümünde fosil yakıtlara göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte, etki kategorilerinin tümünde, yakın olmakla birlikte (ADP-fosil hariç) çatı üstü PV, rüzgâr ve hidrolik enerjiye göre daha fazla çevresel yüke sahiptir. Kömür, altı etki kategorisi için (IRP, POCP, HTP-kanser, TEP, FETP ve LU) en yüksek etkiye sahipken, linyit yedi etki kategorisinde (GWP, PM, HTP-kanser olmayan, AP, FEP, MEP ve ADP-fosil) en yüksek etkiye sahiptir. Doğal gaz, ODP açısından en kötü seçenektir. Büyük rezervuarlı hidroelektrik, su kullanımında en yüksek değere sahiptir (1627 m^3 depriv./kWh). GWP açısından en iyi seçenek ise, akarsu tipi hidroelektrik enerjidir. Sonuçlar, fosil yakıtlar yerine YEK'in kullanılmasının etki kategorilerin çoğunda önemli çevresel faydalar sağlanabileceğini göstermektedir.

4.2.4. Farklı Modül Tasarımı

Şekil 41, cam/arka tabaka (temel senaryo) ve çift cam (senaryo 4a) olarak tasarlanan PERC ve AL-BSF (senaryo 4b) modüllerinin üretiminden kaynaklanan toplam GHG emisyonlarının karşılaştırmasını (a) ve iki farklı modül tasarımına sahip PERC modüllerinin üretim aşamalarının GHG emisyonlarına olan katkılarını (b) göstermektedir. İncelenen üç PV modülünün üretiminden kaynaklanan toplam GHG emisyonları ise, sırasıyla 28.9 g CO_2 eşd./kWh (çift cam), 32.6 g CO_2 eşd./kWh (cam/arka tabaka) ve 36.4 g CO_2 eşd./kWh (AL-BSF) olarak hesaplanmıştır.

Buna göre, çift cam olarak tasarlanan PERC modülünün, cam/arka tabaka olarak tasarlanan PERC modülüne göre %11.3 daha az GHG emisyonuna sahip olduğu gözlenmiştir. Çift cam tasarımında alüminyum çerçevenin ortadan kaldırılması, diğer PERC modül tasarımına kıyasla emisyonların azalmasının ana sebebidir.

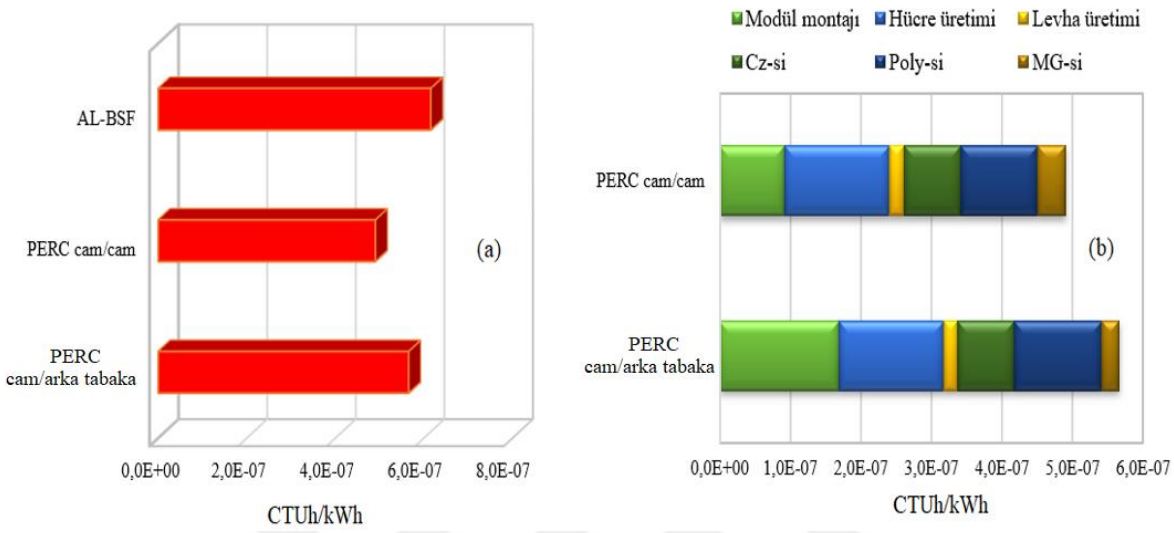


Şekil 41: (a) Toplam GHG emisyonu sonuçları (b) PERC modül üretiminin farklı aşamaları için GHG emisyonları.

Al-BSF'den PERC hücre teknolojisine geçişin GHG emisyonlarında %10.4 oranında bir azalma sağlayabileceği ortaya çıkmaktadır. PERC teknolojisinin, daha yüksek PV verimliliği sahip olması ve dolayısıyla kullanım ömrü boyunca daha fazla elektrik üretmesi, emisyonların azalmasında etkili olabilir. Çerçevesiz çift camlı PERC modüllerinin kullanılması ise, AL-BSF'nin elektrik üretiminden kaynaklanan GHG emisyonlarında %20.6 oranında azalma sağlamıştır. Çift cam ve cam/arka tabaka modül tasarımına sahip PERC modüllerinin, montaj aşamasına ait GHG emisyonları sırasıyla 8.2 ve 4.6 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır (Şekil 41b). Modül tasarımında yapılan değişiklik ile, modül montaj aşamasından kaynaklanan GHG emisyonu neredeyse %43.9 oranında düşmüştür.

Şekil 42, her üç modülün HTP-kanser olmayan etkisine ilişkin sonuçlarını göstermektedir. HTP-kanser olmayan etkisi, çift cam modül tasarımına sahip PERC için 4.9E-07 CTUh/kWh ve AL-BSF için ise 6.2E-07 CTUh/kWh olarak hesaplanmıştır. Çift cam olarak tasarlanan PERC modülünün HTP-kanser olmayan etkisi, temel senaryoyu oluşturan cam/arka tabaka PERC modülüne göre %16.3 daha az etki yaparken, geleneksel Al-BSF modülünü içeren senaryo 4b'ye göre %26.5 oranında daha az etkiye sebep olmuştur. Etkinin önemli kısmı, hücre

ve modül üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Çift cam PERC modüle geçişle, modül montaj aşamasından kaynaklanan HTP-kanser olmayan etkisinin %45.9 oranında azalma sağlayacağı gözlenmiştir (çift cam; 9.2E-08 CTUh/kWh, cam/arka tabaka; 1.7E-07 CTUh/kWh).

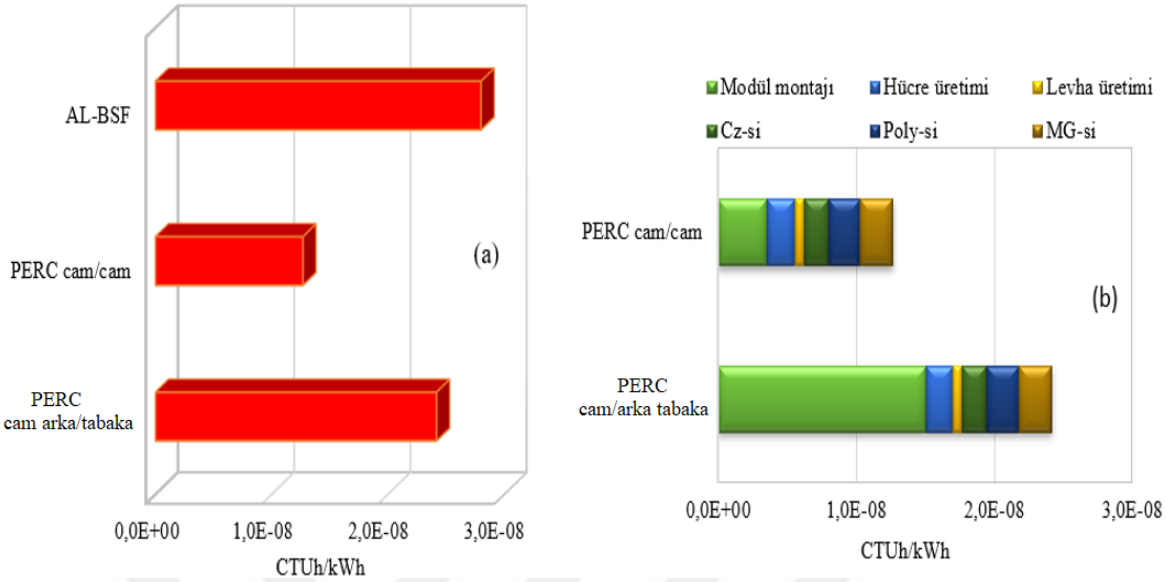


Şekil 42: (a) Toplam HTP-kanser olmayan etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için HTP-kanser olmayan etki sonuçları.

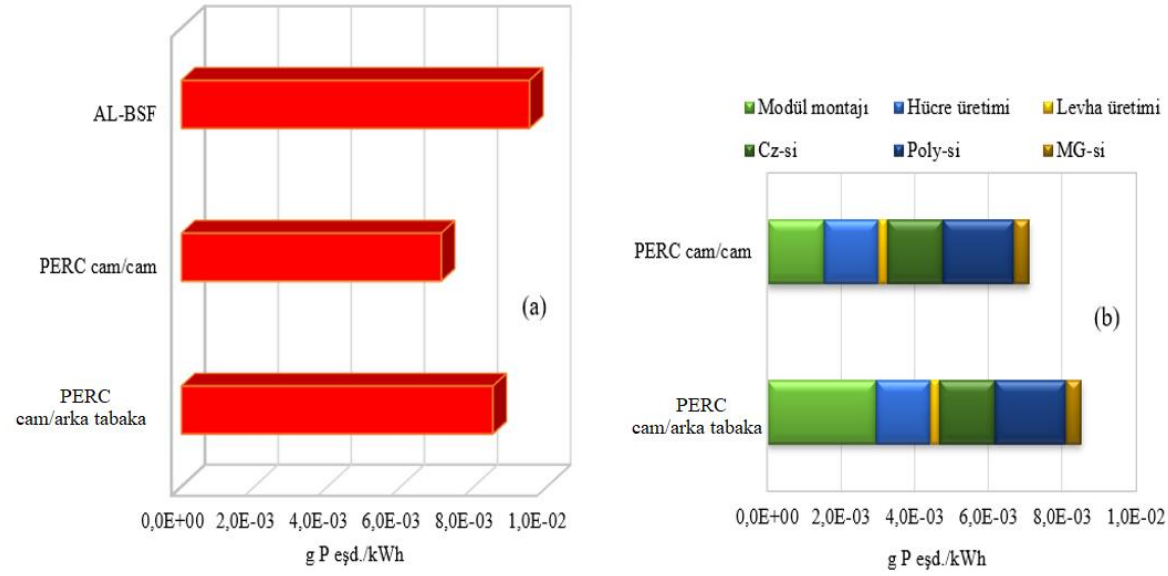
Şekil 43'te, üretim aşamasından kaynaklanan toplam HTP-kanser etkisi, AL-BSF, cam/arka tabaka PERC ve çift cam PERC modülleri için sırasıyla, 2.8E-08 CTUh/kWh, 2.4E-08 CTUh/kWh ve 1.3E-08 CTUh/kWh olarak hesaplanmıştır. Al-BSF modül üretiminden kaynaklanan HTP-kanser etkisi, temel senaryo ile karşılaştırıldığında yaklaşık 1.2 kat daha fazladır.

Çift cam modül tasarımına geçişle, HTP-kanser etkisinde 1.8 kattan fazla azalma sağlanmıştır. Modül üretiminin farklı aşamaları incelendiğinde, modül montaj aşamasından kaynaklanan HTP-kanser etkisi, cam/arka tabaka için 1.5E-08 CTUh/kWh, cam/cam modül tasarımı için ise 3.6E-09 CTUh/kWh olarak hesaplanmıştır. Buna göre, modül montaj aşamasından kaynaklanan HTP-kanser etkisi yaklaşık %76 oranında azalış göstermiştir.

Şekil 44'te, FEP etki kategorisine ait sonuçlar gösterilmektedir. En düşük FEP etkisine sahip modül teknolojisi, çift cam PERC modülüdür (0.0071 g P eşd./kWh). Çift cam özelliğindeki PERC modülü, cam/arka tabaka PERC modülüne göre %16.5, AL-BSF'ye göre ise %25.3 oranında daha az FEP etkisine sebep olmuştur.



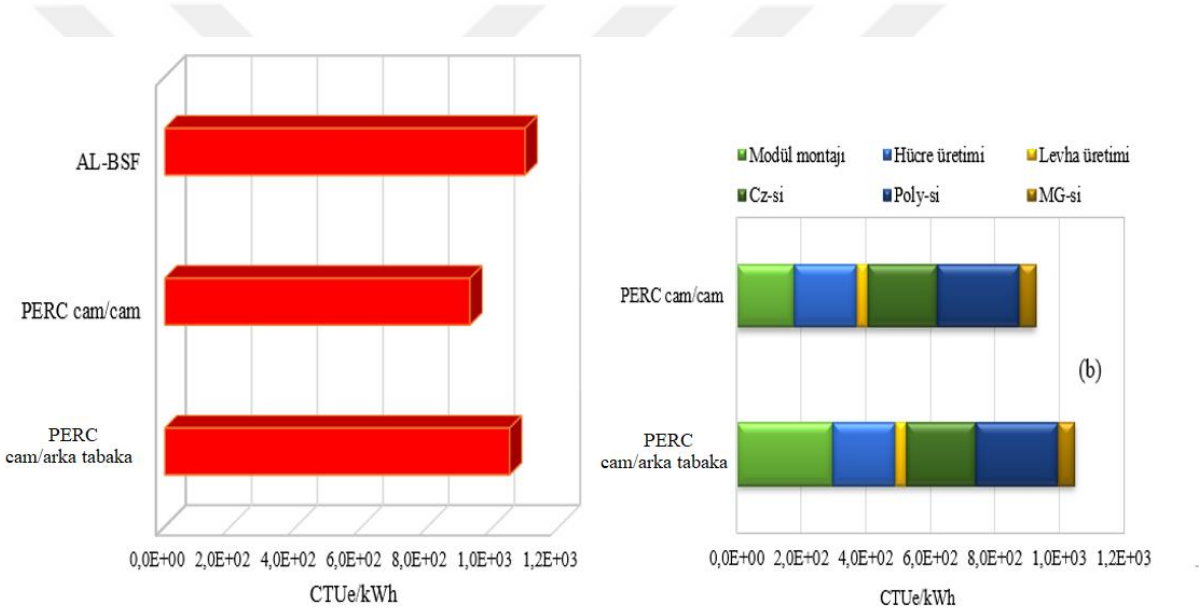
Şekil 43: (a) Toplam HTP-kanser etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için HTP-kanser etki sonuçları.



Şekil 44: (a) Toplam FEP etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için FEP etki sonuçları.

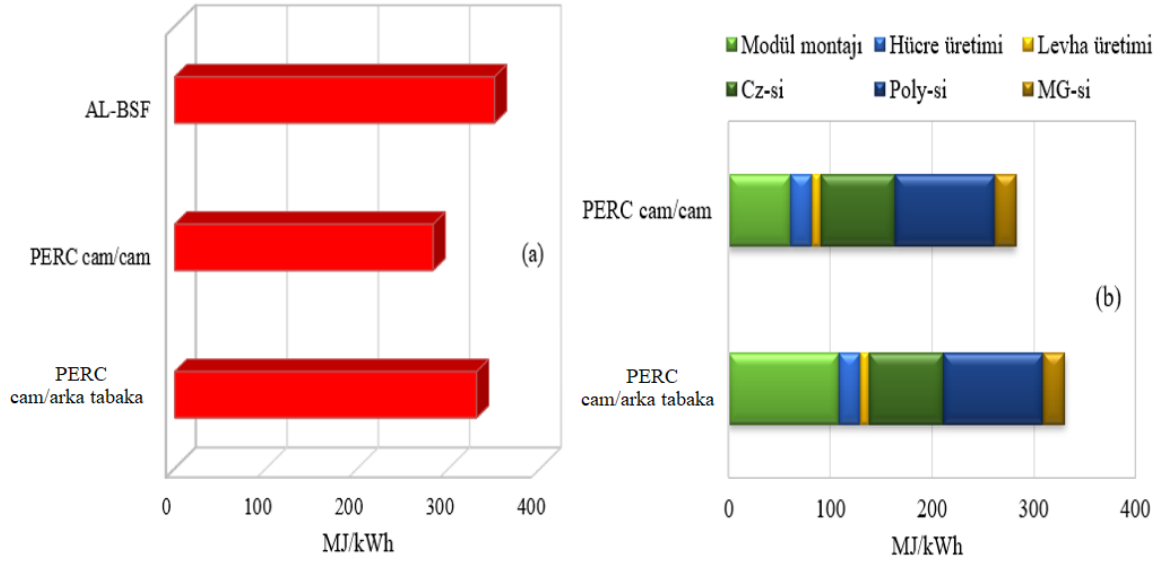
Modül montaj aşamasından kaynaklanan etkiler, çift cam ve cam/arka tabaka PERC hücreleri için sırasıyla 0.0030 g P eşd./kWh ve 0.0016 g P eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Bu neredeyse yarıya yakın bir (%46.7 oranında) bir düşüşü temsil etmektedir.

FETP etki kategorisine ait sonuçlar, diğer etki kategorilerinde olduğu gibi Al-BSF modül üretiminden gelen yükün en yüksek olduğunu göstermektedir (1096 CTUe/kWh). Bunu sırasıyla, cam/arka tabaka PERC modülü (1049 CTUe/kWh) ve çift cam PERC modül üretim aşaması (928 CTUe/kWh) takip etmektedir. Şekil 45'e göre, hücre üretimi ve modül montaj aşamalarının bu kategoride en önemli katkıya sahiptir. Çift cam modül tasarımının tercih edilmesi halinde, modül montaj aşamasında %40.1 oranında daha az FETP etkisinin olacağı tahmin edilmektedir.

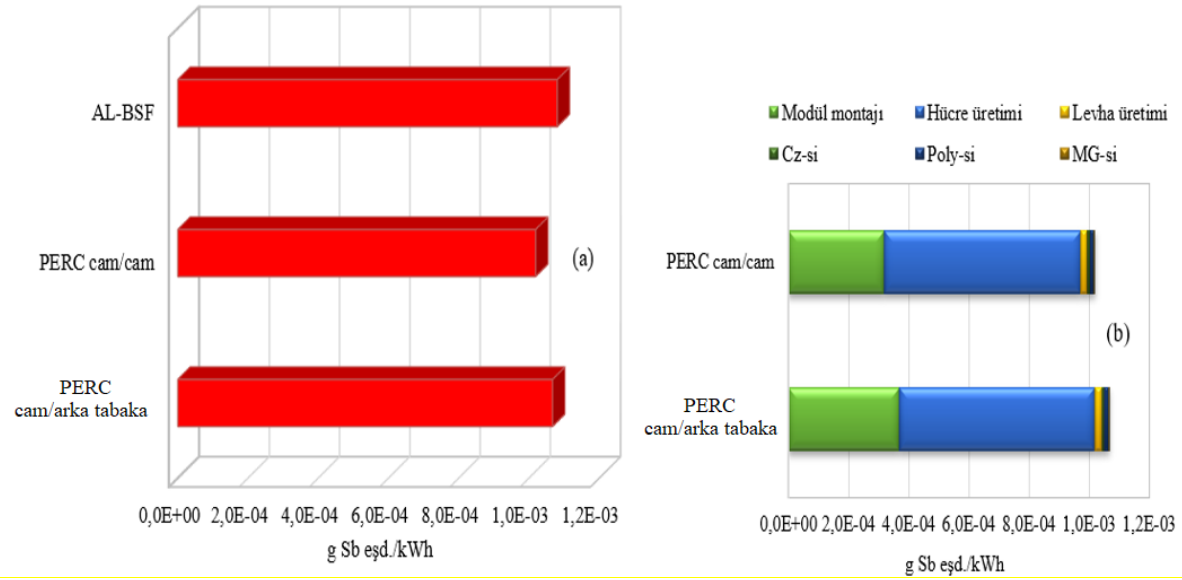


Şekil 45: (a) Toplam FETP etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için FETP etki sonuçları.

ADP-fosil etki sonuçları incelendiğinde, her üç modül tasarımı için birbirine yakın olmakla birlikte, en yüksek ADP fosil etkisinin Al-BSF için hesaplanmıştır (350 MJ/kWh) (Şekil 46). Cam/arka tabaka PERC modülü ise, ikinci en yüksek ADP-fosil etkisine sahiptir (330 MJ/kWh). En düşük ADP-fosil etkisi ise, çift cam PERC modül tasarımına aittir (283 MJ/kWh). Buna göre ADP-fosil etkisinde, temel senaryoya göre %5.7 oranında, AL-BSF'ye göre ise %19.1 oranında düşüş gözlenmiştir. Çift cam PERC modül tasarımının, modül montaj aşamasındaki ADP-fosil etkisi ise %44 daha azdır.



Şekil 46: (a) Toplam ADP-fosil etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için ADP-fosil etki sonuçları.



Şekil 47: Toplam ADP-nihai etki sonuçları (b) PERC modüllerinin üretiminin farklı aşamaları için ADP-nihai etki sonuçları.

ADP-nihai etki sonuçları, her üç modül üretimi için birbirine oldukça yakındır. Modül tasarımındaki değişiklik ile, modül montaj aşamasından kaynaklanan ADP-nihai etkisinde %13.5 oranında bir azalma gözlenmiştir (Şekil 47). Ek-6.12 ve Ek-6.13'te diğer etki kategorilerine ait sonuçlar paylaşılmıştır. Çift cam tasarımına sahip PERC modülünün tercih edilmesi ile, montaj aşamasından kaynaklanan ODP, IRP, POCP, PM, AP ve MEP, TEP ve WU etkilerinin de azaltılabileceği gözlenmiştir.

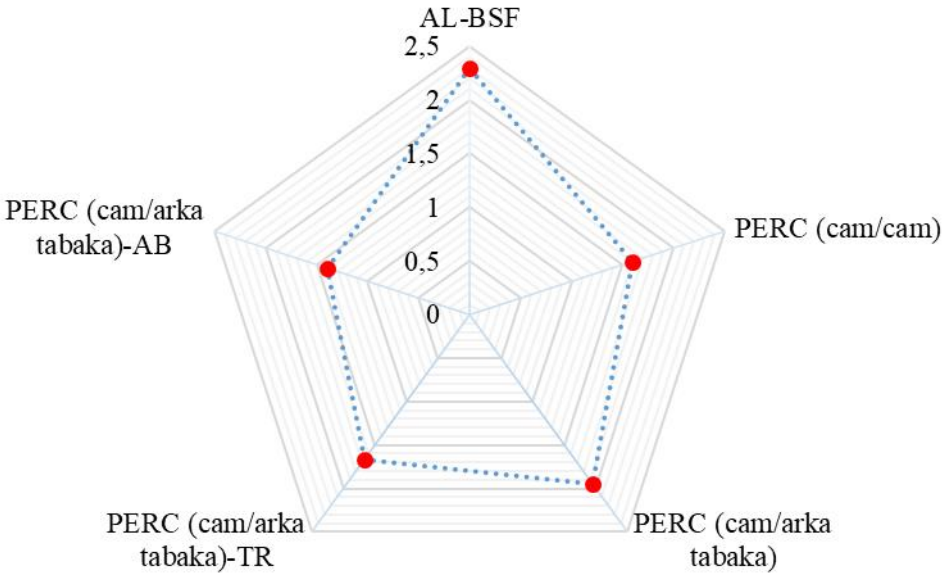
Sonuçlar, çift cam tasarımına sahip PERC modülünün kullanılmasının, cam/arka tabaka modül tasarımına sahip PERC modülüne göre tüm etki kategorilerinde daha düşük etkiye sebep olduğunu göstermektedir. Ek-6.14'te çift cam PERC modül montaj aşamasının her bir etki kategorisine olan katkıları yüzde olarak gösterilmektedir. Çift cam modül montaj aşamasının, en önemli sıcak noktaları güneş camı ve bakır üretimidir. Alüminyum çerçevenin ortadan kaldırılması, diğer PERC modül tasarımına kıyasla etkilerin azaltılmasına katkı sağlamıştır.

4.3. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ

Çalışmada, temel senaryo (PERC cam/arka tabaka), senaryo 1a (PERC cam/arka tabaka-TR), senaryo 1b (PERC cam/arka tabaka-AB), senaryo 4a (PERC çift cam) ve senaryo 4b (AL-BSF) için EPBT hesaplanmıştır. Bu amaçla, PV modülünün üretilmesi amacıyla, ham maddelerin çıkarılması, üretim, nakliye ve kullanım ömrü sonu süreçlerinden kaynaklanan enerji tüketimleri dikkate alınmıştır. Şekil 48'de, modül tür ve özelliklerine göre oluşturulan senaryoların EPBT sonuçları gösterilmektedir.

Temel senaryo kapsamında, 19.56.15 kWp'lik çatı üstü PV santralinin yaşam ömrü boyunca enerji tüketimi, yaklaşık 25101704 MJ'dür. Enerji tüketiminin, yaklaşık %60'ı öncelikli olarak modül üretiminden kaynaklanmaktadır (15837313 MJ). Diğer oluşturulan senaryoların, modül üretim aşamasından kaynaklanan enerji tüketimleri (ulaşım ve kullanım ömrü sonu dahil) sırasıyla, senaryo 1a; 13485154 MJ, senaryo 1b; 11522147 MJ, senaryo 4a; 13248809 MJ olarak hesaplanmıştır.

Temel senaryoya göre, EPBT 2 yıl olarak hesaplanmıştır. Çift cam PERC modül tasarımına geçildiğinde, EPBT temel senaryoya göre %20 daha hızlıdır. Üretim lokasyonunun AB olarak değiştirilmesi, temel senaryoya göre modül üretiminden kaynaklanan enerji tüketiminde %27.9 oranında düşüş sağlamıştır ve en hızlı EPBT'ye sahiptir (1.4 yıl).



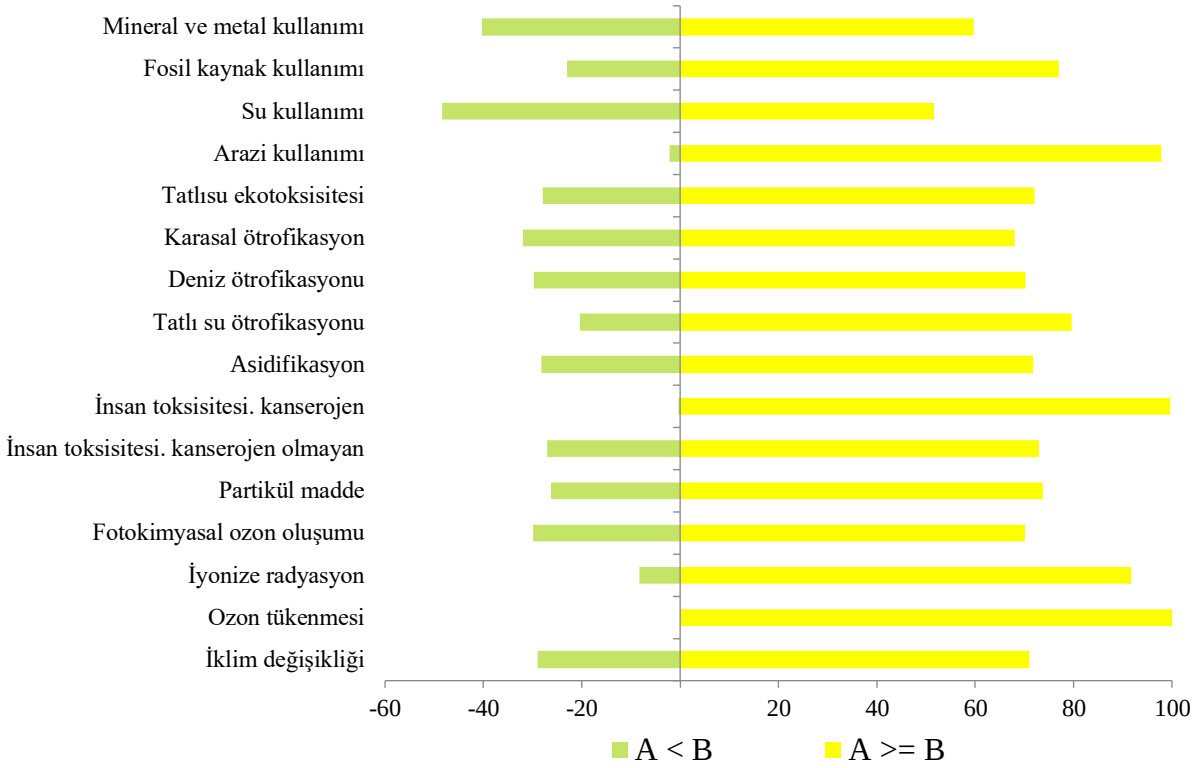
Şekil 48: Modül tür ve özelliklerine göre EPBT sonuçları.

4.4. BELİRSİZLİK ANALİZİ

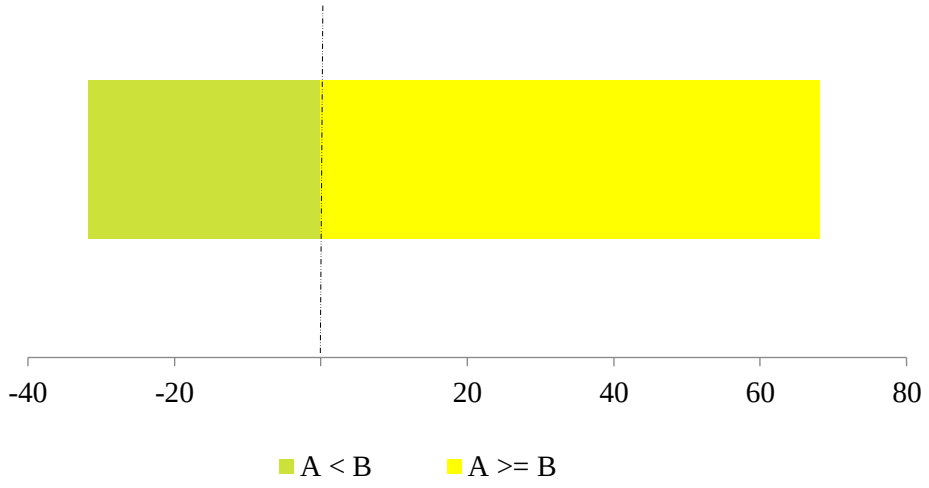
4.4.1. Modül tasarımı

Temel senaryoda kullanılan PERC modülünün, yeni modül tasarımlarından biri olan çift cam özelliğinde bir PERC modülü ile değiştirilmesinin etkileri üzerine gerçekleştirilen belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları Şekil 49'da verilmiştir.

Çift camlı PERC modülü, HTP-kanser ve ODP için en iyi sonucu vermiştir (%100). Diğer etki kategorilerinin tümünde, çift cam PERC modülü senaryosunun daha avantajlı olduğu gözlenmiştir. Buna göre, GWP (%71), IRP (%91.7), POCP (%70.1), PM (%73.7), HTP-kanser olmayan (%73), AP (%71.8), FEP (%79.6), MEP (%70.2), TEP (%68), FETP (%72.1), LU (%97.8), WU (%51.6), ADP-fosil (%77) ve ADP-nihai (%59.7) etki kategorilerinde daha avantajlı durumdadır. Buna göre, en önemli iyileşmelerin HTP-kanser ve ODP başta olmak üzere, IRP, LU ve FEP etki kategorilerinde olduğu söylenebilir. İki farklı modül tasarımının belirsizlik analizi, toplam çevresel etkileri açısından karşılaştırıldığında ise, çift cam özelliğine sahip olan PERC modülünün kullanılmasının, iterasyonların %68.2'inde daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Şekil 50).



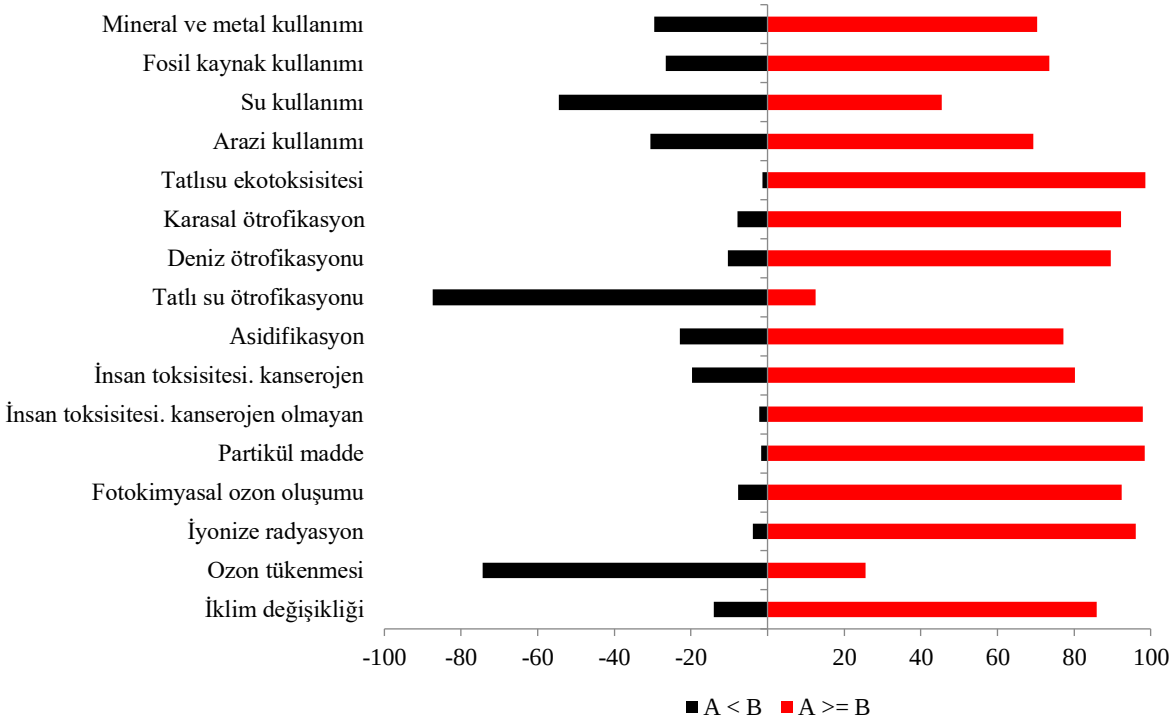
Şekil 49: İki farklı PERC modül tasarımı için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: geleneksel cam/arka tabaka modülü (B) çift cam modülü).



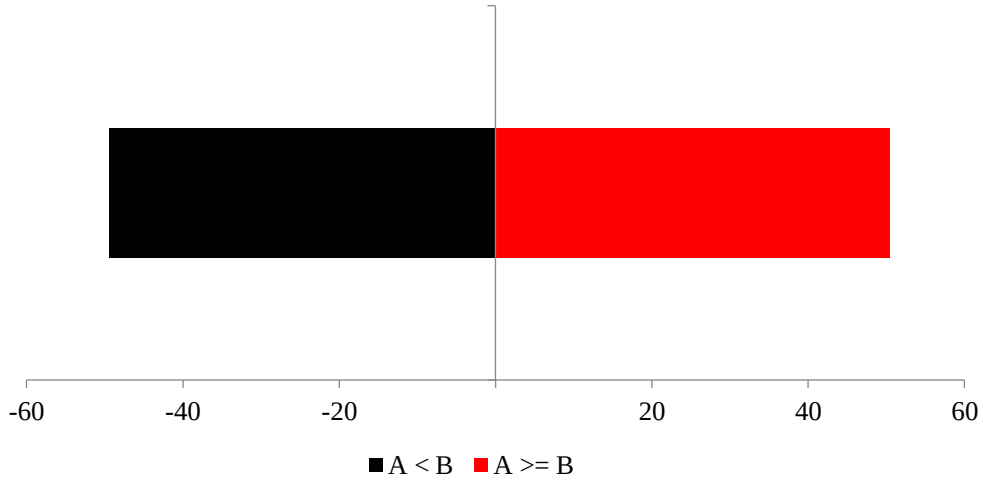
Şekil 50: İki farklı modül tasarımının tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: geleneksel cam/arka tabaka modülü (B) çift cam modülü).

4.4.2. Üretim Lokasyonu

Şekil 51 ‘de, modül üretim lokasyonu için Çin’in temsil eden temel senaryo ve modül üretim lokasyonu için Türkiye’nin seçildiği senaryo 1a için gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları gösterilmektedir.



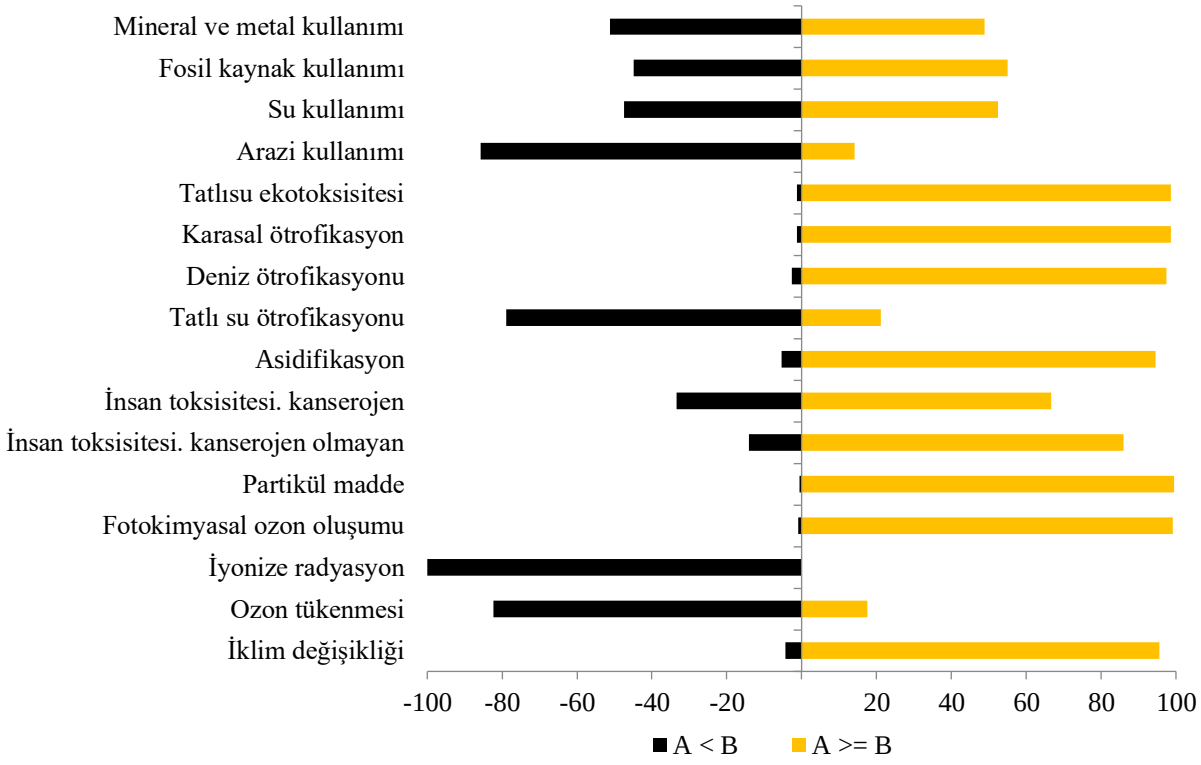
Şekil 51: Modül üretim lokasyonu için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1a).



Şekil 52: Modül üretim lokasyonu için tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1a).

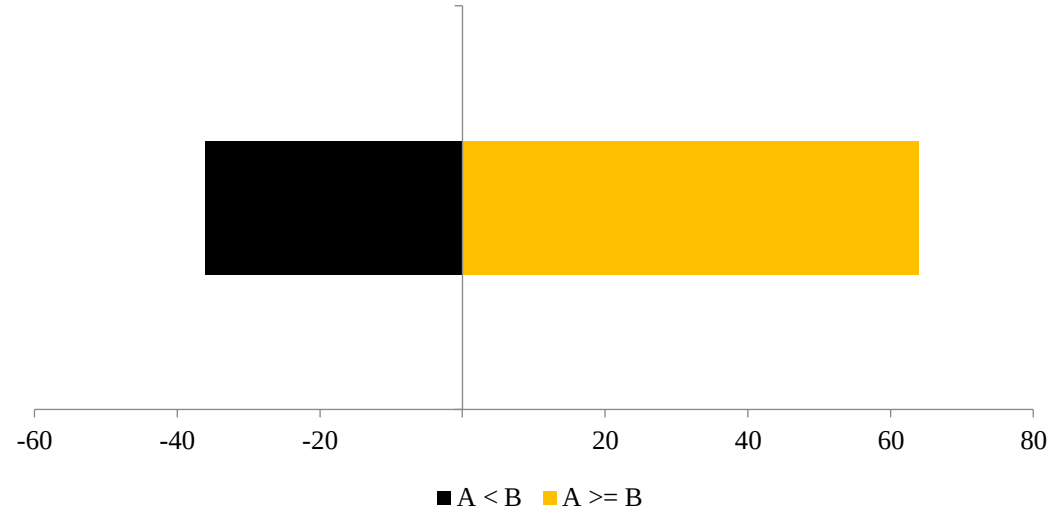
Türkiye'nin modül üretim lokasyonu olarak seçildiği senaryo 1a, GWP (%85.9), IRP (%96.2), POCP (%92.4), PM (%98.4), HTP-kanser olmayan (%97.9), HTP-kanser (%80.3), AP (%77.2), MEP (%89.6), TEP (%92.2), FETP (%98.7), LU (%69.4), ADP-fosil (%73.5) ve ADP-nihai (%70.4) etki kategorilerinde daha avantajlıdır. Bununla birlikte, ODP (%25.6), FEP (%12.6) ve WU (%45.5) için sadece %50'nin altında bir oranla daha avantajlı iterasyonlar sağladığı gözlenmiştir. Toplam çevresel etkileri açısından karşılaştırıldığında ise, modül üretimi için Türkiye lokasyonunun seçildiği senaryonun, %50.5 oranında daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Şekil 52).

Şekil 53 'de, modül üretim lokasyonu için Çin'in temsil eden temel senaryo ve modül üretim lokasyonu için Avrupa'nın seçildiği senaryo 1 b için gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları gösterilmektedir. Avrupa'nın modül üretim lokasyonu olarak seçildiği senaryo 1b, GWP (%95.6), POCP (%99.1), PM (%99.5), HTP-kanser olmayan (%86), AP (%94.6), MEP (%97.4), TEP (%98.7) ve FETP (%98.7) etki kategorilerinde önemli oranda daha avantajlıdır.



Şekil 53: Modül üretim lokasyonu için belirsizlik analizi karakterizasyon sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1b).

HTP-kanser (%66.6), ADP-fosil (%55.1), ADP-nihai (%48.4) ve WU (%52.5) etki kategorilerinde orta derecede daha avantajlıdır. FEP (%21.1), ODP (%17.6) ve LU (%14.1) daha düşük oranlarda olmasına rağmen avantajını sürdürmektedir. IRP etki kategorisinde ise, temel senaryo daha üstündür. Toplam çevresel etkiler açısından karşılaştırıldığında ise, modül üretimi için Avrupa lokasyonunun seçildiği senaryonun, iterasyonların %64.0 'ünde daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Şekil 54). Bu bağlamda, üretim lokasyonuna ilişkin hassasiyet analizinden, modül üretiminin özellikle daha yeşil elektrik karışımına sahip bir ülkede gerçekleşmesinin çevresel faydaların iyileştirilmesine yarar sağlayacağı söylenebilir.



Şekil 54: Modül üretim lokasyonu için tüm performans etkilerinin analiz sonuçları (A: temel senaryo (B) senaryo 1b).

5. TARTIŞMA

Tartışma, altı alt bölüme ayrılarak yapılmıştır. İlk bölümde, incelenen çatı üstü PV projesine ait bilgiler özelinde oluşturulan temel senaryonun, çevresel etki sonuçları tartışılmıştır. İkinci bölümde, PERC modülünün üretimi ile ilgili katkı analizi sonuçları, üçüncü bölümde farklı lokasyonların elektrik karışımlarını kullanan bir üretimin etkileri ve dördüncü bölümde yeni modül tasarımlarının kullanılmasının etkileri ele alınmıştır. Son bölümlerde ise, sistem dengesi bileşenlerinin katkısı ve EBPT'ye yönelik sonuçlar tartışılmıştır.

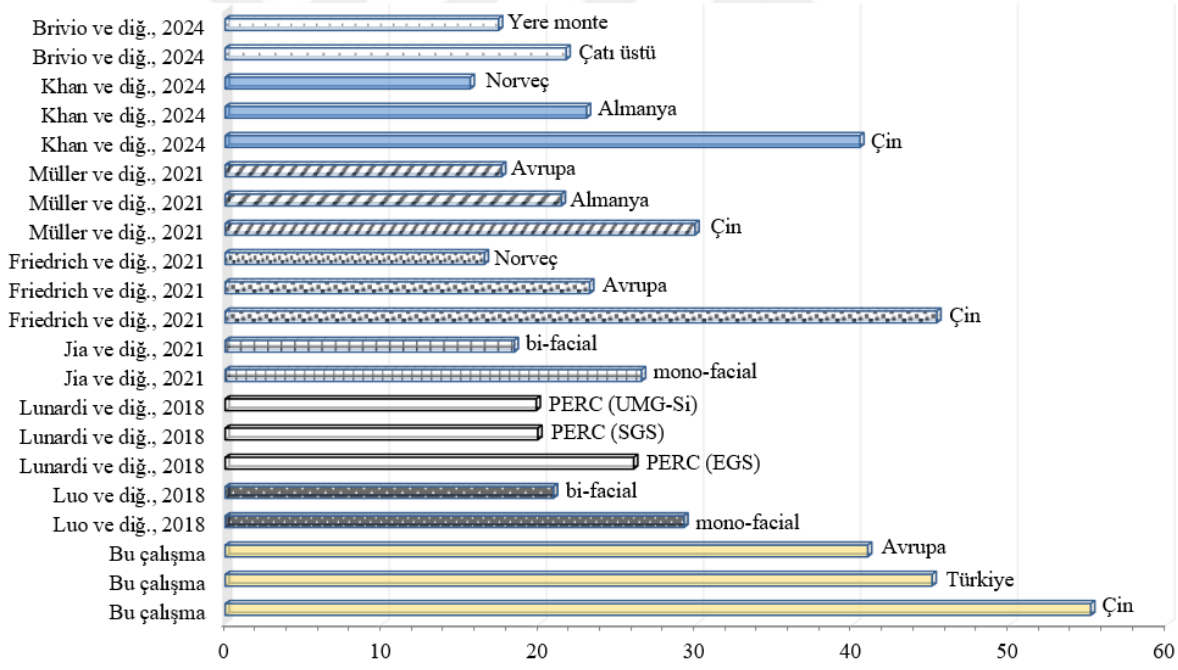
5.1. TEMEL SENARYO-1956.15 kWp'lik ÇATI ÜSTÜ PV

5.1.1. GHG

Metro yerleşkesinin, atölye binası çatısına kurulması planlanan ve 1956.15 kWp kapasitesine sahip çatı üstü PV santralinin, yaşam döngüsü boyunca yol açtığı toplam GHG emisyonu 55.1 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Proje bilgileri ile paralel oluşturulan temel senaryoya göre, modül üretimi (MG-si üretiminden modül montajına kadar) Çin'de gerçekleştirilmiştir ve üretim sonrası modüller Türkiye'ye nakledilerek sahada kurulumu yapılmıştır. Yalnızca modül üretiminden kaynaklanan GHG emisyonu ise, 32.6 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır.

Benzer kurulum kapasitesine sahip çatı üstü PV'lerin GHG emisyonu, 63.9-69.4 g CO_2 eşd./kWh aralığında değişmekle birlikte, bu çalışmalarda kullanılan modül türü multi-Si özelliğindedir (Yu ve Halong, 2015; Constantino ve diğ., 2018). Multi-Si özelliğinde modül kullanan farklı kapasitedeki çatı üstü PV'lere ilişkin literatür değerleri ise, ortalama 73 g CO_2 eşd./kWh'lik GWP etkisine sahiptir (Ek-1). Şekil 55, PERC modülünün YDD'sini inceleyen çalışmaların GHG emisyonlarına yönelik karşılaştırmasını göstermektedir. Çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler, Tablo 3'te (Bölüm 2.4.2) verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen GHG emisyon sonuçları, PERC hücre teknolojisine ilişkin en son yapılan çalışmalar ile uyumludur. Ancak, çalışmaların kendine özgü modele sahip olduğu ve Tablo 3'te bahsedilen özellikler açısından birbirinden farklılık gösterdiği unutulmamalıdır. Bu farklılıklar, çevresel etki sonuçlarına yansımaktadır.

Brivio ve arkadaşları tarafından, İtalya'da çatı üstü PERC PV modül kurulumun analiz edildiği çalışmada, GHG emisyonu 21.7 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Burada, çatı üstü PV kapasitesi 3 kW'dir ve BOS aşaması sistem sınırına dahil edilmemiştir (Brivio ve diğ., 2024). Lunardi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, GHG emisyonu 19.8-26.0 g CO_2 eşd./kWh aralığında değişmiştir. Bu çalışmada, Avrupa için yıllık 1700 kWh/$m^{2/}$yıl güneş ışığı, 0.75 performans oranı ve 25 yıllık kullanım ömrü varsayılmıştır. Aynı zamanda, BOS sistem sınırına dahil değildir (Lunardi ve diğ., 2018). Luo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, GHG emisyonu tek yüzlü PERC için 29.2 g CO_2 eşd./kWh olarak, çift yüzlü PERC için 20.9 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Çatıya entegreli sistem için, 1580 kWh/m^2/yıl güneş ışınımı ve modül tasarımına göre ise 25-30 yıllık bir yaşam ömrü varsayılmıştır. Ulaşım ve kullanım ömrü sonu sistem sınırına dahil değilken, BOS dahil edilmiştir. Aynı zamanda, bu çalışma PV üretimindeki son gelişmeleri hesaba katmamaktadır ve üretimin Singapur'da gerçekleştiğini varsaymaktadır (Luo ve diğ., 2018).



Şekil 55: Toplam GHG emisyonlarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması (g CO_2 eşd/kWh)

Jia ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada, GHG emisyonları 19.3 ila 27 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir. Pekin'de kurulan PERC PV modül sistemi, 1573 kWh/m^2/yıl güneş ışınımı ve 25-30 yıllık kullanım ömrüne sahiptir. Bu çalışmada da, BOS sistem sınırına dahil değildir (Jia ve diğ., 2021). Friedrich ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise, Çin üretim senaryosuna göre PERC PV modülünün GHG emisyonu 45.3 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sistem sınırına, BOS dahil edilmiştir (Friedrich ve diğ., 2021).

Müller ve arkadaşları da benzer üretim verilerini kullanarak, kendi ölçeklerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Buna göre, GHG emisyonunu 29.9 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplamışlardır. Bakım ve BOS hariç tutulmuştur (Müller ve diğ., 2021). Khan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, üretim lokasyonunun elektrik karışımı, veri toplama yılı, kurulum lokasyonu ve yaşam ömrüne bağlı olarak, aynı PV sistem konfigürasyonunun GWP'si, 6.6 ila 54.8 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir. 25 yıllık bir yaşam ömrü kapsamında, Çin'deki bir PERC PV modülü üretiminin GHG emisyonu ise 24.0 ila 54.8 g CO_2 eşd./kWh değerleri arasındadır (BOS sistem sınırına dahildir) (Khan ve diğ., 2024). IEA tarafından, yere monteli bir PERC PV sisteminin GWP'sine ilişkin değerlendirme sonuçları ise, 17.1 ila 25.7 g CO_2 eşd./kWh arasında değişmiştir (BOS dahil değildir) (IEA, 2024). Müller ve arkadaşlarının modelinin aksine, bu bahsedilen son iki çalışmada Ecoinvent v3.8 veri tabanı kullanılmıştır.

GHG emisyonları, PV santralinin ömrü boyunca üretilen elektriği doğrudan etkileyen modül verimliliği ve küresel yatay ışınım (Hsu ve diğ., 2012), diğer bileşenlerin (BOS gibi) sistem sınırına dahil edilip edilmemesi, verilerin kaynağı, üretim ve kurulum lokasyonu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu tez çalışmasında, seçilen panel verimliliği, literatürdeki çalışmaların çoğunluğuna göre daha yüksektir (%21.16) (IEA, 2024 ve Brivio ve diğ. (2024) ile benzer), bu nedenle elektrik üretiminin artmasıyla GHG emisyonlarının büyük bir kısmının dengelemesi beklenmektedir. Ancak, GHG emisyonu, uluslararası bileşen üretimi, üretimde kullanılan elektrik karışımı ve kurulum lokasyonunun bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Literatürde bazı çalışmalarda, farklı PV modüleri tarafından üretilen 1 kWh'lik elektriğin, diğer enerji kaynakları ve şebeke elektriğinden elde edilmesiyle oluşabilecek çevresel etkilerin karşılaştırılması yapılmıştır (Eskew ve diğ., 2018; Üçtuğ ve Azapagic, 2018). Brivio ve arkadaşlarının çalışması, PERC PV modülü ve diğer enerji kaynakları ile (doğal gaz ve rüzgâr) üretilen elektriğin çevresel karşılaştırmasını içermiştir. Buna göre, fosil yakıt yerine YEK kullanımının önemli çevresel faydalar sağladığı belirtilmiştir (Brivio ve diğ., 2024). Bu tez çalışmasında da yerinde güneş enerjisiyle üretilen elektriğin, fosil yakıt bazlı elektriğe göre çok daha az GHG emisyonuna sebep olduğu gözlenmiştir (Bölüm 4.2.3). Şebeke elektriğine göre karşılaştırıldığında ise (Bölüm 4.2.2), analiz edilen sistemin ~1146 ton/yıl CO_2 salımını önleyeceği tahmin edilmektedir. Böylece, İstanbul'daki metro yerleşkesine ait atölye binasının çatısına uygulanacak PV sisteminin, Senaryo 2a'yı kapsayan şebeke elektriği yerine kullanılmasıyla, GWP etkisinde %90.2 oranında azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir.

5.1.2. Diğer Çevresel Etki Kategori Sonuçları

Diğer çevresel etki sonuçlarına yönelik karşılaştırma, Tablo 12'de verilmiştir. Buna göre, sadece dört çalışmada GHG emisyonundan farklı olarak diğer çevresel etki kategorileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, insan toksisitesi açısından bakıldığında, sistemin toplam HTP-kanser olmayan ve HTP-kanser etkisi sırasıyla 1.9E-06 CTUh/kWh ve 7.6E-08 CTUh/kWh olarak hesaplanmıştır. HTP-kanser olmayan etki kategorisi dikkate alındığında, en önemli etkiler modül montajı (28%), hücre üretimi (24%) ve poly-Si (%20) üretim aşamasından kaynaklanmıştır. HTP-kanser etki kategorisi için ise, modül montajı %58'lik bir pay ile en önemli katkı yapan aşama olmuştur. İncelenen vaka çalışmaları ile insan toksisitesinin kaynakları açısından benzerlikler vardır. Lunardi ve arkadaşları, PERC modülünün kWh başına en düşük insan toksisitesine sahip (1.80E-11 CTUh) olduğunu ve bunu 1.00E-11 CTUh ile tandem LSC-Si'nin takip ettiğini belirtmiştir. Bu çalışmadaki silikon bazlı güneş hücreleri için, hem kanser hem de kanser olmayan insan toksisitesi etkileri, EGS, mono c-Si, PERC hücresi üretimi, modül imalatı ve kurulumu arasında eşit olarak paylaşılmıştır (Lunardi ve diğ., 2019). Jia ve arkadaşlarına göre ise, en önemli kanser etkisi alüminyum çerçeve ve silikon levhalardan kaynaklanmıştır. Alüminyum çerçevelerin imalatı, tek yüzlü silikon bazlı güneş hücrelerinin %45'ini ve çift yüzlü silikon bazlı güneş hücrelerinin ise %34'ünü oluşturmuştur (Jia ve diğ., 2021).

FEP ve FETP etki kategorisine olan katkılar esas olarak, modül montajı aşamasından kaynaklanmıştır. Yapılan çalışmalarda ekotoksisite etkileriyle ilgili olarak, PERC modül üretimi, toplam yaşam döngüsü tatlı su toksisitesi etkilerinin %70'i kadarını oluşturmaktadır (Lunardi ve diğ., 2019). Silikon levhalar da, toplam yaşam döngüsü tatlı su toksisitesinin yaklaşık %60-70'ine katkıda bulunan bir diğer kaynaktır. Buda esas olarak, monokristalin silikon külçe üretiminden kaynaklanmaktadır (Jia ve diğ., 2021).

Müller ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, partikül madde, asitleşme, karasal ve denizel ötrofikasyonu ve tatlı su ekotoksisitesine ilişkin yüksek sonuçlar için, Çin'nin elektrik karışımındaki yüksek taş kömürü payına atıfta bulunulmuştur (Müller ve diğ., 2021). Bununla birlikte, Avrupa elektrik karışımında linyit kömürünün payının yüksek olması FEP etki kategorisinde çevresel yükün artmasına neden olmuştur (Müller ve diğ., 2021; Brivio ve diğ., 2024). Brivio ve arkadaşlarının vaka çalışmasında ise, hammadde çıkarımından modül üretimine kadar olan tedarik zinciri göz önünde bulundurulduğunda, daha yüksek etkilerin

Tablo 12: Diğer çevresel etkilerin karşılaştırılması.

Referans	Kurulum lokasyonu	HTP-kanser olmayan (CTUh/kWh)	HTP-kanser (CTUh/kWh)	FEP (kg P eşd./kWh)	FETP (CTUe/kWh)	ADP-fosil (MJ/kWh)	ADP-nihai (kg Sb eşd./kWh)
"Lunardi ve diğ., 2018	Çin	3.4E-16	1.80E-11	2.3E-08	2.5E-05	-	2.7E-07
^Jia ve diğ., 2021	Çin	1.4E-12 (cases/kWh)	1.4E-12 (cases/kWh)	1.3E-05	4.0E-04 (PAF.m^3. day/kWh).	-	7.5E-07
*Müller ve diğ., 2021	Çin	1.47E-05	5.67E-07	2.41E-01	2.91E+04	8.71E+03	9.62E-02
	Almanya	1.16E-05	5.12E-07	6.02E-01	2.01E+04	8.03E+03	9.69E-02
	Avrupa	1.12E-05	5.10E-07	3.53E-01	1.82E+04	8.14E+03	9.62E-02
Brivio ve diğ., 2024	İtalya	-	-	9.60E-06	-	2.33E-01	2.73E-01
Bu çalışma	Türkiye	1.9E-06	7.6E-08	3.0E-05	2.65E+03	5.70E+02	5.0E-06

*Cam-arka tabaka PERC modülüne ait 1 kWp sonuçları temsil etmektedir. "Lunardi ve diğ.(2018) sonuçları güneş dereceli silikonu temsil etmektedir. ^ MF(72)'yi temsil etmektedir.

modül üretimiyle ilişkili olduğu görülmektedir. Bu etkiler, çatı tipi santralde %32 (ADP-nihai) ile %51 (MEP)'dir.

ADP fosil etkisi, modül montajı (%31), poly-Si (%28) ve Cz-Si (%21) olmak üzere üç aşamanın arasında paylaşmıştır. ADP-nihai için ise, hücre üretimi (%60) en yüksek etki yükünü almıştır. Lunardi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, en yüksek etkinin modül montajından kaynaklandığı ve bunu hücre, silikon levha, EGS ve mono c-Si'nin takip ettiği belirtilmiştir (Lunardi ve diğ.,2019). Bunun nedeni, modül montaj aşamasında kullanılan cam, alüminyum gibi malzemelerin, hücre imalatı aşamasında ise bakır, gümüş gibi metallerin tüketilmesidir. Yazarlar, ADP'nin bir diğer önemli etkisinin gümüş bazlı metalizasyon macunundan kaynaklandığına dikkat çekmişlerdir (Lunardi ve diğ., 2019; Jia ve diğ., 2021). Bu tez çalışmasında, PERC modülünü kullanan çatı ölçeğindeki tesisin yarattığı potansiyel çevresel etkiler, YDD ile ilgili literatür çalışmalarda rapor edilen sonuçlar ile uyumludur.

5.2. PERC MODÜLÜ ÜRETİMİ SICAK NOKTALAR

Modül üretim aşaması, çatı üstü PV'sinin tüm yaşam döngüsü boyunca sıcak noktası olarak tanımlanmıştır. Bu aşama, hücre teknolojilerinin türüne bakılmaksızın çeşitli çevresel etkilerin önemli bir kısmından sorumludur. Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, perovskit güneş hücresi türlerine bağlı olarak, üretim aşaması tüm yaşam döngüsü GHG emisyonlarının %95 ila %97'sini oluşturmuştur (Zhang ve diğ., 2017). Heath ve arkadaşları ise, silikon bazlı güneş hücrelerinin üretiminde, silikon levhaların GWP'nin yaklaşık yarısından sorumlu olduğunu belirtmişlerdir (Heath, ve diğ., 2020).

Üretim aşamasındaki GHG emisyonları, malzeme üretiminden veya üretim sürecinin kendisinden oluşabilmektedir. Her iki durumda da, elektrik tüketimi ve tüketilen elektriğin emisyon yoğunluğundan etkilenmektedir (Cellure ve diğ., 2024). Birçok çalışmada, silikon bazlı güneş hücrelerinin üretimi sırasında elektrik tüketiminin önemli etkileri olduğu, özellikle Cz-si ve poly-Si aşamalarının enerji yoğun süreçler olduğu tespit edilmiştir (Lunardi ve diğ., 2018; Müller ve diğ., 2021; Brivio ve diğ., 2024). Literatürde yapılan çalışma sonuçlarına benzer şekilde, bu çalışmada da çatı üstü PV santralinin yaşam döngüsündeki karbon emisyonları üretim aşamasında yoğunlaşmıştır. Üretim aşamasının katkı analizine odaklanıldığında, etki kategorilerinin çoğuna ana katkı yapan üç aşama modül montajı, poly-Si ve Cz-Si'dir.

Yin ve arkadaşları tarafından PERC hücre teknolojisine sahip modüllerin incelendiği çalışmada, toplam emisyonların yaklaşık %95'i üretim aşamasından kaynaklanırken, ulaşım ve kurulum aşamaları sadece %5'ni oluşturmuştur. Üretim aşamasındaki karbon emisyonlarının yaklaşık %41'ini oluşturan silikon saflaştırma işlemi, en yüksek karbon emisyonuna sahip aşama olarak belirlenmiştir (Yin ve diğ., 2022). Jia ve arkadaşları, tek ve iki yüzeyli PERC güneş hücrelerinin yaşam döngüsü boyunca GHG emisyonlarının, en büyük payını (yaklaşık %47 ila %51'i) silikon levhalar oluşturmuştur (Jia ve diğ., 2021). Lunardi ve arkadaşları, elektronik dereceli silikon ve mono c-Si üretim aşamalarının, PERC modüllerinin toplam yaşam döngüsü GHG emisyonlarının %70'ine katkıda bulunduğunu belirtmiştir (Lunardi ve diğ., 2019). Luo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, GHG emisyonunun çoğu silikon ve levha üretimi sırasında yayılmıştır (Luo ve diğ., 2018). Müller ve arkadaşları ise, en yoğun emisyona sahip adımların, yüksek elektrik gereksinimlerinden dolayı poly-Si ve cz-Si üretiminden kaynaklandığını belirtmiştir. Özellikle MG-Si, poly-Si üretimi ve buradaki Cz kristalizasyonu, PV modülü üretimi için en yüksek elektrik yoğun süreçtir (Khan ve diğ., 2024).

Bu tez çalışmasında, hücre üretimine kadar olan modelleme verileri Müller ve arkadaşları ile aynı olduğundan, bu aşamalardan yayılan GWP etkisinin sıcak noktaları açısından benzerlik göstermektedir. Hücre üretimi ve modül montaj verilerinin aynı olduğu IEA çalışmasında da, modül üretimi (yani ham madde çıkarılmasından modül üretimine kadar), toplam GWP etkisini %75'inden fazlasından sorumluyken, metal çıkarma ve işlemeden kaynaklanan etkinin ise yaklaşık %10'unu kapsamıştır. GWP etki kategorisindeki çevresel etkilerin katkı analizi ise, asıl katkının hücre üretimi (hammadde çıkarımından hücre üretimine kadar) ile ilişkili olduğunu göstermiştir (%73). Diğer bileşenler ve işlemler ise (örneğin çerçeve, cam, bağlantı kutusu, kullanım ömrü sonu) toplam etkinin daha azına neden olmuştur (<%30) (IEA PVPS, 2024).

Sonuçlar, gelecekte silikon PV sistemlerinin üretimi için enerji tüketiminin ve GHG emisyonlarının daha da azaltılması açısından bu sıcak noktalardaki teknik gelişmelerin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Polisilikon üretimi için akışkan yataklı reaktör ve poly-Si levhalar için elmas telli testere gibi alternatif teknolojiler geliştirmek öneriler arasındadır (Luo ve diğ., 2018). Katkı analizine odaklanan çalışmalar, bu çalışmada da elde edildiği gibi, üretim aşamalarından gelen enerji tüketiminin tüm yaşam döngüsünün kritik bir sıcak noktası olduğunu göstermektedir. Üretim süreçleri halihazırda iyileştirilmiş olsa da ek önlemler (örneğin, silikon külçe üretiminde düşük karbonlu enerji karışımının kullanılması) emisyonları daha da azaltabilir.

5.3. ÜRETİM LOKASYONU

PV üretimi sırasındaki elektrik tüketimi, karbon emisyonlarının önemli bir kaynağı olduğundan, üretim yerindeki elektrik karışımının karbon yoğunluğu, PV sistemlerinin karbon ayak izini azaltmak için en önemli unsurlardan biridir (Jungbluth, 2005; Reinders ve diğ., 2017; Gazbour ve diğ., 2018; Serrano-Luján ve diğ., 2017; Müller ve diğ., 2021).

Modül üretim pazarına hâkim olan Çin, YDD çalışmalarının çoğunda üretim lokasyonu olarak değerlendirilmiştir. Khan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Çin, Almanya ve Norveç'in elektrik karışımlarını baz alan bir üretim modellenmiştir. Çin elektrik şebekesini kullanan PV üretim süreci, en yüksek GWP etkisine sahiptir (2014 ve 2020 yıllarına göre sırasıyla 37.7 ve 40.4 g CO_2 eşd./kWh). Aynı PV sistemi, Almanya'daki bir lokasyonda üretilmesi durumunda yaklaşık %40 daha az GWP etkisine sahipken, Norveç gibi elektrik karışımında yenilenebilir enerji payının daha yüksek olan bir ülkede üretildiğinde ise Çin'de üretilenden yaklaşık %60 kat daha düşük GWP etkisine sahip olmuştur (15.6–15.9 g CO_2 eşd./kWh) (Khan ve diğ., 2024). Müller ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da, Almanya'da üretilen modüllerin karbon yoğunluğu Çin'e göre daha düşük, AB'de de ise en düşük seviyededir (Müller ve diğ., 2021).

Bu tez çalışmasında incelenen PERC modülünün üretiminde, Çin, Avrupa ve Türkiye elektrik karışımını içeren üç lokasyona göre model oluşturularak karşılaştırılma yapılmıştır. PV sisteminin üretiminden kaynaklanan GHG emisyonu sırasıyla 33.1 g CO_2 eşd./kWh, 22.9 g CO_2 eşd./kWh ve 18.8 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Üretim yerinin Avrupa olarak değiştirilmesiyle, modül üretiminin sıcak noktalarından kaynaklanan GHG emisyonlarının azaltılabileceği gözlenmiştir (Şekil 32). Böylelikle, modüllerin kıtalararası taşımacılığının, düşük karbonlu elektrik karışımının kullanılmasıyla elde edilen tasarruflarla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılabilir. Bu, diğer çalışmalar tarafından da desteklenen bir bulgudur (Chen ve diğ., 2016; Hong ve diğ., 2016; Stamford ve diğ., 2018; Friedrich ve diğ., 2021; Müller ve diğ., 2021; Khan ve diğ., 2024). Türkiye elektrik karışımının, PV üretim lokasyonu olarak modellenmesi, bildiğimiz kadarı ile bu çalışmada ilk defa değerlendirilmiştir. Ecoinvent v3.7 veri tabanında kullanılan Türkiye ve Çin elektrik karışımı, aynı yılı yansıtmaktadır. Her iki elektrik karışımında da fosil kaynakların payı birbirine yakındır. Yine de, modül üretiminin, Çin'den Türkiye'ye taşınmasından kaynaklanan karbon emisyonlarının, Çin'deki üretimden kaynaklanan karbon emisyonlarıyla karşılaştırıldığında çok daha düşüktür. Çin elektrik karışımını baz alan temel durum senaryosu, çoğu etki

kategorisinde de en yüksek etkiyi göstermiştir. PV üretim lokasyonunun değişilmesiyle, uygulamaların çevresel etkilerinde azalmalar sağlanabilir.

5.4. MODÜL TASARIMI

Çalışmada uygulanması planlanan PV santralinde kullanılacak hücre teknolojisi PERC'dir. Son yıllarda çift cam olarak tasarlanan modüllerin çevresel etkileri azalttığı çalışmalarda gösterilmiştir (Luo ve diğ., 2018; Müller ve diğ., 2021). Bu sebeple bu çalışmada da, yeni tasarımlardan biri olan çift cam PERC modülü ve geleneksel AL-BSF modülünün uygulamada tercih edilmesinin etkileri değerlendirilmiştir. Toplam GHG emisyonu AL-BSF, cam-arka tabaka ve çift cam PERC modülü üretimi için sırasıyla 36.4, 32.6 ve 28.9 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Çift cam tasarımına sahip PERC modülünün kullanılması, cam/arka tabaka modül tasarımına sahip PERC modülüne göre tüm etki kategorilerinde daha düşük etkiye sahiptir.

Literatürde birçok çalışma, geleneksel modüllerin çevresel etkilerini fazlasıyla ele almıştır (EK-1, Tablo E1). AL-BSF ve PERC modüllerinin karşılaştırıldığı çalışmalar, PERC modüllerinin çevresel etkiler açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Luo ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, PERC modüllerinin çift cam ve cam-arka tabaka tasarımları ilk defa karşılaştırılmıştır. Buna göre, AL-BSF, cam-arka tabaka PERC ve çift cam PERC modüllerinin GHG emisyonları sırasıyla 30.2, 29.2 ve 20.9 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Müller ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Al-BSF'den PERC hücre teknolojisine geçişin GHG emisyonlarında %3.3'lük bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, çerçevesiz çift camlı PV modüllerinin kullanılmasının, silikon PV santrallerinin elektrik üretimindeki GHG emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini (%28,4 azalma) gözlenmiştir (Müller ve diğ., 2021).

PERC hücre teknolojisinin modül verimliliğinin daha fazla olması ve dolayısıyla kullanım ömrü boyunca daha fazla elektrik üretmesi emisyonların azaltılmasında etkilidir (Müller ve diğ., 2021). Başlangıçtaki modül verimliliği biraz daha düşük olmasına rağmen (ekstra optik kayıp nedeniyle), çerçevesiz çift camlı PV modüllerinin ömür boyu elektrik üretimi, daha uzun ömür beklentisi ve daha düşük yıllık bozulma oranı sebebiyle oldukça yüksektir. Bu nedenle, toplam yaşam döngüsü perspektifinden bakıldığında, çerçevesiz çift camlı PV modül tasarımı, silikon PV teknolojilerinin üretkenliğini artırmak ve GHG emisyonlarını azaltmak için ideal

olabilir (Luo ve diğ., 2018). Ancak, çift camlı PERC hücre teknolojilerinin ışınım etkileri hala daha tartışma konusudur ve uygulama araştırmaları devam etmektedir. PERC teknolojisinin Al-BSF teknolojisine göre çevresel avantajlarının, LID kapsamının arttırılmasıyla birlikte en aza indirilmesi dikkat çekilen bir unsurdur (Müller ve diğ., 2021).

Bu tez çalışmasında, geleneksel Al BSF hücre teknolojisinden en son teknolojiye sahip PERC hücre teknolojisine geçişin, PV sisteminden elektrik üretilmesi sırasında oluşan GHG emisyonlarının azaltılabileceğini göstermektedir. Daha düşük modül verimliliği nedeniyle biraz daha yüksek malzeme tüketimine rağmen, çift cam modüller, esas olarak alüminyum çerçevenin ortadan kaldırılması nedeniyle, geleneksel cam-arka tabaka modüllere göre kWh başına daha düşük çevresel etkiler göstermiştir. Verim hesaplamasında, çift cam modüllerinin daha uzun potansiyel ömrü ve daha düşük bozulma oranları kullanılırsa, çevresel performansı, yaşam ömrü boyunca elektrik üretimi (kWh başına etki) için daha da artırılabilir (Müller ve diğ., 2021).

5.5. SİSTEM DENGESİ BİLEŞENLERİ

Sistem dengesi bileşenleri, transformatör, invertör, montaj yapısı, kablolar ve çoğu durumda bataryalar gibi ana bileşenlerden oluşmaktadır (Mehedi ve diğ., 2022). Literatürdeki çalışmaların çoğu, bu bağlantı sisteminin üretim aşamalarını sistem sınırlarına dahil etmemektedir. Ayrıca, bu bileşenlerin kullanım ömrü sonu yönetimini dikkate alan çok az sayıda çalışma vardır. Badza ve arkadaşları tarafından, yere monteli bir PV santralinin YDD'sinin incelendiği çalışmada, BOS'ların üretimi (invertör, transformatör, elektrik tesisatı, enerji depolama sistemi), nakliyesi ve inşaat/işletme/söküm aşamasının katkıları toplam etkinin %10'undan azını oluşturmuştur (Badza ve diğ., 2023). Bu sonuç, bir PV santralinin bağlantı sisteminin çevresel etkileri üzerinde çalışan Sinha ve arkadaşlarının (2012) sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir (Sinha ve diğ., 2022). Eskew ve arkadaşlarının çalışmasında, çatı üstü PV santralinin etki kategorilerinin hasar odaklı değerlendirilmesinde, hasarların en önemli üçüncü kaynağı invertör üretiminden kaynaklanmıştır (Eskew ve diğ., 2018). ADP-nihai etki kategorisinde invertör üretiminin katkısı yaklaşık %30'lara ulaşabilmektedir (IEA PVPS, 2024).

Bu tez çalışmasında, BOS'dan kaynaklanan toplam GHG emisyonu 20.7 g CO_2 eşd./kWh olarak hesaplanmıştır. Montaj yapısı, GWP, ADP-fosil, AP ve PM etki kategorilerinin yaklaşık

%20'sine yakınını oluşturmuştur. Bu etkiler, büyük ölçüde alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen üretiminden kaynaklanmaktadır. Elektrik tesisatının düşük olduğu çevresel göstergelerin aksine, ADP-nihai etkisine katkısı %42'ye kadar ulaşmıştır. İnvertörün, insan toksisitesi, IRP ve ADP-nihai etki kategorilerine olan katkıları ise %30'un üzerindedir. Sistem dengesi bileşenlerinin üretimi sırasında, bakır ve gümüş gibi metallerin ve montaj yapısı aşamasında alüminyumun kullanılması, diğer malzemelere kıyasla çevresel etkilere daha fazla katkı yapmıştır. Bileşenlerin neredeyse her biri için, üretim sürecinde bakır metali kullanılmaktadır. Kaynak tükenmesi etkilerinin çoğunluğu, fosil yakıt tükenmesinin aksine metal tükenmesiyle ilişkilidir. Metal tükenmesine olan katkılar ise, büyük ölçüde bir PV sistemi için gerekli metallerin çıkarılması ve üretilmesinden kaynaklanmaktadır (Eskew ve diğ., 2018). İnvertör ve elektrik tesisatı üretimi temel olarak, kaynak kullanımı, mineral ve metaller kategorisini etkilemiştir. Burada daha yüksek etki, elektronikler ve üretim sürecinde yer alan değerli metaller tarafından oluşmaktadır. İnvertör gibi PV bileşenlerinde kullanılan değerli metallerin iyileştirilmesi, çevresel etkilerin azalmasına katkıda bulunabilir.

5.6. EPBT

Bir mono-Si PV sisteminin EPBT'si 0.83 ila 7.3 yıl arasında, multi-Sİ PV sisteminin ise 2.5-7.9 yıl arasında değişebilmektedir (EK-1, Tablo E1). Luo ve arkadaşları, Singapur'daki silikon PV sistemleri için, AL-BSF, cam-arka tabaka PERC ve çift camlı PERC'e ilişkin EPBT'leri sırasıyla 1.11, 1.08 ve 1.01 yıl olarak hesaplamıştır. Al-BSF'den PERC hücre teknolojisine geçiş, niceliksel olarak Singapur'daki PV elektrik üretiminin EPBT'sini %2.7 oranında azaltmıştır (Luo ve diğ., 2018). Lunardi ve arkadaşları, SGS ve UMG-Si kullanan PERC yapıları için, daha yüksek verimlilik ve işlem sırasında daha az enerji kullanımı sonucu, birbirine benzer ve daha iyi EPBT sonuçları ürettiklerini belirtmişlerdir (Lunardi ve diğ., 2018). Bu tez çalışmasında ele alınan sistemin EPBT'si ise, AL-BSF, cam/arka tabaka PERC ve çift camlı PERC modül kullanımına göre sırasıyla 2.3, 2.0 ve 1.6 yıl olarak hesaplanmıştır. Üretim lokasyonunun AB olarak değiştirilmesi ile, 1.4 yıl hızlanmıştır.

Sonuçlar en son teknolojiye sahip PERC teknolojisinin, geleneksel Al-BSF teknolojisine göre EPBT açısından daha çevre dostu olduğunu göstermektedir. Çift cam PERC modülü ise, cam-arka tabaka modüle göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte, sürecin elektrik tüketimi, kullanılan elektriğin kaynağı ve seçilen sistem sınırı ve geri dönüşümün uygulanıp uygulanmadığına bağlı olarak (Cellura ve diğ., 2023) EPBT'yi önemli oranda etkilemektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, İstanbul'da bir raylı sistem yerleşkesinde bulunan atölye binası çatısına uygulanması planlanan PERC modül tabanlı bir çatı üstü PV santralinin, YDD metodolojisi kapsamında GHG emisyonu ve diğer çevresel etkilerinin analizini sunmaktadır. Çatı üstü PV sisteminin toplam GHG emisyonu, 55.1 g CO_2 eşd./kWh'dir. Öncelikli olarak dikkate alınan diğer çevresel etkiler ise, HTP-kanserojen olmayan; 1.9E-06 CTUh/kWh, HTP-kanserojen; 7.6E-08 CTUh/kWh, FEP; 0.03 g P eşd./kWh, FETP; 2649.9 CTUe/kWh, ADP-fosil; 570.2 MJ/kWh, ADP-nihai; 0.0050 g Sb eşd./kWh olarak hesaplanmıştır.

Çevresel yüklerin çoğu, güneş PV modülünün üretiminden kaynaklanmıştır. 1 kWh başına elektrik üretimi için oluşan etkilerin katkı analizi, en büyük katkının modül montajı ve silikon tedarik zincirinden geldiğini, özellikle de silikon levhaları üretmek için kullanılan ve oldukça enerji yoğun süreçler olan poly-Si ve Cz-Si sürecinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Modül montajı aşamasında, alüminyum alaşımı ($AlMg_3$) ve güneş camı üretim aşamaları sıcak noktalardır. Üretim lokasyonuna ilişkin duyarlılık analizinden, modül montajı ve enerji yoğun süreçlerin (poly-Si ve Cz-Si) daha yeşil bir enerji karışımına sahip bir ülkede yapılmasının çevresel faydalarda iyileşmeye yol açabileceği gözlenmiştir.

Şebekeden kaynaklanan etkiler dikkate alındığında, çatı üstü PV çevresel performans açısından daha faydalı görünmektedir. Analiz edilen sistemin, ~1146 ton/yıl CO_2'yi önleyeceği tahmin edilmektedir (GWP etkisinde %90.2 oranında azalma). Türkiye şebeke elektrik karışım paylarının geleceğe yönelik tahminleri, YEK payı hesaba katıldığında bile, çatı üstü PV'nin düşük karbonlu bir elektrik üreticisi olmaya devam ettiğini göstermektedir (2017, 2023, 2025, 2030 ve 2035 yıllarına göre sırasıyla %90.2, %89.9, %87.5, %85.5 ve %81.7 daha düşük GWP katkısı). Ancak çatı üstü PV, ADP-nihai etki kategorisinde, %95 oranında (temel senaryoya göre) daha kötü bir performansa sahiptir. Bu da, PV sistemlerinin çevresel faydalarının yanında, üretim süreçleri gibi diğer aşamalarından kaynaklanan olumsuz etkilerinin de olabileceğini göstermektedir. Modülün yanı sıra, invertör ve elektrik tesisatının üretimi, özellikle kaynak kullanımı, mineral ve metal kullanımı kategorisindeki etkilerin önemli bir kısmından sorumludur (özellikle bakır ve gümüş üretimi).

Kullanım ömrü sonunda, çerçeve, cam ve kablo gibi malzemelerin geri kazanılması, çevresel faydalar sağlayabilir, ancak geri dönüşüm süreci aynı zamanda enerji gerektiren bir süreçtir. Malzeme bileşenlerinin (polimer ve silikon gibi) yakılması veya çöpe atılması, emisyonlara neden olabilir. Sonuçlar, geri dönüşümden kaynaklanan yüklerin, biraz daha ağır bastığını ve kullanım ömrü sonu aşamasının genel karbon emisyonlarına (%0.5-%17.5) küçük bir katkı sağladığını göstermektedir. Bu çalışmada, silikonun geri dönüştürülmediğine ve gelecekteki yüksek verimli silikon geri dönüşümünün daha fazla çevresel faydaya sebep olmasının beklendiğine dikkat edilmelidir. Düşük karbonlu geri dönüşüm teknolojisi, PV bileşen üretim sürecinden kaynaklanan enerji tüketiminin bir kısmını dengeleyebilir. Bu çalışmada, Türkiye'de bu sistemlere yönelik geri dönüşüm tesislerinin henüz bulunmaması nedeniyle, literatüre dayalı bir tahmin yürütülmüştür. İleride yapılacak çalışmalarda, kullanım ömrü sonu aşamasının Türkiye özelinde daha detaylı modellenmesi ve incelenmesi önerilmektedir. PV modüllerinin, üretiminde kullanılan toksik/tehlikeli malzemelerin azaltılması ve kullanım ömrü sonunda bileşen ve malzemelerin geri kazanımı için hem üreticilerin hem de proje yatırımcılarının atık yönetimini dikkate alması önemlidir.

Mevcut literatürde, PERC PV modülü üretimlerine yönelik güncel envanterler çok kısıtlı yayınlanmakla birlikte, YDD çalışmalarında elektrik karışımları ve malzemeler için genellikle Ecoinvent veri tabanının farklı sürümleri kullanılmaktadır. Verilerin güncelliği, YDD sonuçlarını etkileyebilmektedir. Modül tasarımlarının halihazırda geliştirilmeye devam ettiği ve Çin'deki PV üretiminin baskın pazar payı göz önüne alındığında, Çin'e dayalı envanterlerin güncellenmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında, PERC PV modül üretim verileri literatürden tedarik edilerek, güneş radyasyon seviyesi kapsamında Türkiye lokasyonuna uyarlanmıştır. Türkiye'deki şebeke altyapısı ile karşılaştırıldığında, çatı üstü PV teknolojisinin 1 kWh'lik elektrik üretimi sonucu, GHG emisyonlarında yaklaşık 10 kata yakın bir azalma sağlayabileceği tahmin edilmiştir. Bununla birlikte çalışma, yüksek verimli ve son teknolojiye sahip PERC PV modülünün, geleneksel bir PV modülü yerine kullanıldığında, üretilen elektriğin çevresel yükünü özellikle de GHG emisyonunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Çift camlı modül tasarımına sahip PERC PV modülü ise, çevresel etkiler açısından en iyi performansı sağlayan seçenek olmuştur.

GHG emisyonları ve bunun küresel ısınmaya olan katkıları düşünüldüğünde, analiz edilen PV modülünün, elektrik karışımında yüksek emisyon yüküne sahip olan Çin'de üretildiğini belirtmekte fayda vardır. Bu, fosil yakıt temelli elektrik karışımına sahip olan ülkelerden

yapılan ithalatın, daha detaylı ele alınması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu da, Türkiye'de hücre teknolojileri için teşvik programlarının oluşturulması ve ulusal üretime ilişkin piyasa düzenlemelerinin ele alınması için alan açmaktadır. Öte yandan, hassasiyet analizinde ele alınan üretim lokasyonu senaryosuna göre, kurulu çatı üstü PV santralinin, Türkiye üretim lokasyonu için öngörülen emisyon miktarı, Çin'e göre daha düşük olmakla birlikte birbirine oldukça yakındır. PV modülünün, düşük emisyon yükü sunan Avrupa'da üretilmesi durumunda, Türkiye'de çatı üstü PV uygulamasının elektrik üretimine ilişkili emisyon sonuçları daha avantajlıdır. Bu da, yerel ölçekte elektrik karışımında YEK payının arttırılmasının emisyonların dengelemesinde katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Sistemin enerji dengesiyle ilgili olarak, EPBT, modül tasarımına göre 1.6-2.3 yıl, üretim lokasyonuna göre ise 1.4-2.0 yıl arasında değişmiştir. Yaşam ömrü ile karşılaştırıldığında, sistemin üretimi ve kurulumu için gereken enerjinin, nispeten hızlı bir şekilde geri döndüğü söylenebilir.

Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)'na göre, 2737 saatlik bir yıllık güneşlenme süresine ve yılın 114 günü güneş enerjisi üretme potansiyeline sahip olan Türkiye, önemli bir güneş enerjisi elde etme verimliliğine sahiptir (GEPA, 2024b). Özellikle, İstanbul gibi geniş yerleşim alanları ve ulaşım ağına sahip olan şehirlerde, daha fazla çatı kurulum potansiyeli mevcuttur. Çalışmanın gelecek yıllara göre şebeke elektrik karışımının karşılaştırıldığı bölümü (Bölüm 3.2.2), şebeke elektrik karışımında YEK payının arttırılmasına rağmen, PV'nin avantajlı durumunu devam ettirdiğini göstermektedir. Bu sebeple, teşvikler ile gerekli altyapılarının sağlanarak çatı ölçekli PV kurulumlarının yaygınlaştırılması, fosil yakıtlı elektrik santrallerine yönelik talebinde azalmasına katkı sağlayabilir. Kamu kurum ve kuruluşlarının, uygulamalarının sürdürülebilirliği dikkate alınarak YDD çalışmalarının proje öncesi değerlendirmelere dahil etmesi daha fazla farkındalık kazandırabilir. Mevcut çalışma ile, proje düzeyinde bir çatı üstü PV kurulumunun sürdürülebilirliğinin araştırma olanağı sunulmuştur. Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi, raylı sistem bileşenlerini içeren özel bir vaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, önemli ulaşım türlerinden biri olan raylı sistem hizmet binalarına uygulanacak çatı üstü PV kurulumlarının, özellikle İstanbul gibi metropol şehirlerde sürdürülebilir olabileceği gösterilmiştir.

Türkiye'de son yıllarda modül ve hücre üretimi konusunda atılan adımlar, yerli üretimin gün geçtikçe artacağı izlenimi vermektedir. Sadece PV panel montajı yapan firmalar değil, aynı zamanda hücre üretimi yapan firmaların sayısı da artmaktadır. Ayrıca, bu yerli firmalar farklı teknolojileri de (PERC, yarım kesim, çift yüzlü vb.) yakından takip etmekte ve uygulamaktadır

(Ağbulut ve diğ., 2023). Bu çalışmada, üretim lokasyonunun Türkiye elektrik karışımını baz alarak oluşturulmasıyla, çevresel etkiler de azalmalar sağlanabileceği görülmektedir. Ancak, güncel verileri bulmak zor olsa da özellikle GWP'nin hesaplanması sırasında güncellenmiş bir elektrik karışımının ele alınması önemlidir. PV uygulamalarının zamanla artış göstereceği düşünüldüğünde, Türkiye özelinde bu sistemlerine yönelik bir üretim envanterinin oluşturulması elzemdir.

Bu tez çalışmasında kullanılan envanter, endüstri raporları, kurumsal araştırmalar ve mevcut üretim teknolojisini temsil eden yayınlanmış literatür verilerinden elde edilmiştir. Ancak, veri güvenilirliğinin özellikle üretim ve kurulum lokasyonu özelinde daha da doğrulanması gerekmektedir. Türkiye'de, PV modül ve bileşenlerinin üretim süreçlerine yönelik henüz yayınlanmış bir envanter kılavuzu bulunmadığından, daha doğru analizler için güncel veri envanterinin oluşturulmasına ihtiyaç vardır. Böylece, enerji sektöründe PV uygulamalarının artırılmasıyla, GHG emisyonu ve diğer çevresel etkilere yönelik tahminlerin belirsizliği azaltılabilir. Bu da PV sektöründe aktif olan üretici, özel veya kamu kuruluşlarına projeler öncesinde rehberlik sağlayabilir.

PV bileşenlerinin üretimi ve temiz enerjiden elden edilen elektrik üretim oranının arttırılması ile, kristalin silikon bazlı modül üretim aşamasının enerji tüketiminde ve karbon emisyonlarında önemli bir azalma sağlanabilir. Bileşenlerden kaynaklanan yaşam döngüsü karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla, bileşenlerin kullanımını ve enerji tüketimini azaltmak için yeni tasarım ve üretim süreçleri değerlendirilmelidir. Bu çalışma, çatı üstü PV kurulumları yoluyla çevresel yükleri dengelemenin en iyi yolunun yerli bileşen üretimine geçilmesi, uluslararası taşımacılıktan kaçınılması ve detaylı atık yönetiminin dikkate alınmasını önermektedir. Ancak, modül teknolojisi ve üretim yeri seçimini ilişkin daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Sonuçlar, yerinde güneş enerjisiyle üretilen elektriğin, fosil yakıt bazlı elektriğe göre çok daha az çevresel etki yarattığını desteklemektedir. Modül tedarik zincirinin, Çin'den daha temiz bir elektrik karışımı ile karakterize edilen başka bir ülkeye veya yerli üretime kaydırılması ile elde edilebilecek faydalar, PV tesislerinin tüm yaşam döngüsü incelendiğinde dikkate değerdir. Beklendiği gibi, PV sistemleri kullanım aşamasında fosil enerji kaynaklarını tüketmemektedir, ancak üretimi için önemli miktarda enerji tüketimine ve emisyona sebep olmaktadır. Bu çalışmanın ana hedefi, İstanbul'da çatı üstü PV kurulumu ile raylı sistem bileşenlerine yönelik

kurulumların sürdürülebilir olup olmadığını ve gelecekte bu kurulumun nasıl daha sürdürülebilir hale getirileceğini değerlendirmektir. Ancak, proje düzeyinde sadece bir vakayı değerlendirmek yeterli değildir. Bu çalışma, bir PV sisteminin şebeke üzerindeki ek yükünü ve artan voltajda çalışmayı sürdürmek için oluşacak kayıpları hesaba katmamıştır. Önerilen yerinde tüketim, küçük çatı üstü PV sistemler söz konusu olduğunda şebeke talebini azaltmaya yardımcı olsa da İstanbul'da çatı üstü sistemlere daha geniş ölçekte yatırım yapmaya devam edilmesi durumunda, şebeke altyapısı ile uyumluluğunun daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi, oldukça kapsamlı bir çalışmadır ve çevresel boyutunun yanında ekonomik ve sosyal sorunlarının da ele alınması gerektiğini belirtmekte fayda vardır. Bunun için de farklı büyüklük ve konumlardaki sistemleri kapsayan farklı teknolojiler değerlendirilmelidir. Bu amaçla, projeler özelinde veri envanteri oluşturulmaya yoğunlaşılmalıdır. Değerlendirmenin her bölümünde belirtilen sınırlamalar, bu çalışmadaki veri kalitesinin sınırlılıklarını vurgulamaktadır. PV modül ve bileşenlerinin üretim verileri, büyük ölçüde kılavuz ve literatür kaynaklarına dayalıdır ve sonuçların yorumlanması varsayımlara bağlıdır. Bu çalışmanın sınırlamaları olmasına rağmen, ileride yapılacak çalışmalar için bir rehberlik sağlayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı PV sistemleri (binaya entegre, zemine monte gibi), yeni modül teknolojileri ve montaj konfigürasyonları (eğimli veya cepheye entegre gibi) seçenekleri için kurulumların etkilerini araştırılabilir. Uzmanlar ve paydaşlar, sürdürülebilirlik değerlendirmesine aktif olarak katılmalı, uygulamaların yaşam döngüsü boyunca her aşaması dikkate alınmalı ve buna göre düzenlemeler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Adam, A.D. and Apaydin, G., 2016, Grid connected solar photovoltaic system as a tool for greenhouse gas emission reduction in Turkey, *Renewable and sustainable energy reviews*, 53, 1086-1091.

Ağbulut, Ü., Yıldız, G., Bakır, H., Polat, F., Biçen, Y., Ergün, A., & Gürel, A. E., 2023, Current practices, potentials, challenges, future opportunities, environmental and economic assumptions for Türkiye's clean and sustainable energy policy: A comprehensive assessment. *Sustainable energy technologies and assessments*, 56, 103019.

Aktas, I. S., & Ozenc, S., 2024, A case study of techno-economic and environmental analysis of college rooftop for grid-connected PV power generation: Net zero 2050 pathway. *Case studies in thermal engineering*, 56, 104272.

Alam, E. and Xu, X., 2023, Life cycle assessment of photovoltaic electricity production by mono-crystalline solar systems: a case study in Canada, *Environmental science and pollution research*, 30 (10), 27422-27440.

Al-Ezzi, A. S. and Ansari, M.N.M., 2022, Photovoltaic solar cells: a review. *Applied system innovation*, 5(4), 67.

Alhadri, M., Zakri, W., & Farhad, S., 2023, Study on integration of retired lithium-ion battery with photovoltaic for net-zero electricity residential homes, *Journal of solar energy engineering*, 145(2), 021011.

Ali, A., Koch, T. W., Volk, T. A., Malmsheimer, R. W., Eisenbies, M. H., Kloster, D., Brown, T.R., Naim, N., Therasme, O., 2022, The environmental life cycle assessment of electricity production in New York State from distributed solar photovoltaic systems, *Energies*, 15(19), 7278.

Al-Otaibi, A., Al-Qattan, A., Fairouz, F., Al-Mulla, A., 2015, Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop, *Energy conversion and management*, 95, 110-119.

Alparslan, U. and Yıldırım, A., 2023. Çatılarda 120 GW'tan fazla potansiyel mevcut, Ember Climate, 2023, https://ember-climate.org/tr/analizler/ara%C5%9Ft%C4%B1rma/catilarda-120-gwtan-fazla-potansiyel-mevcut/, [Ziyaret tarihi: 16 Mart 2024].

Alsema, E., 2012. Energy payback time and CO_2 emissions of PV systems. In Practical Handbook of Photovoltaics, 2nd ed., Academic Press, Assessment in the European context, 1097-1117.

Atilgan, B. and Azapagic, A., 2015, Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey, *Journal of cleaner production*, 106, 555-564.

Atilgan, B. and Azapagic, A., 2016, Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts, *Renewable energy*, 89, 649-657.

Badza, K., Soro, Y. M., & Sawadogo, M., 2023, Life cycle assessment of a 33.7 MW solar photovoltaic power plant in the context of a developing country, *Sustainable environment research*, 33(1), 38.

Baranes, E., Jacqmin, J., & Poudou, J.C., 2017, Non-renewable and intermittent renewable energy sources: Friends and foes, *Energy Policy,* 111, 58-67.

Bartie, N., Cobos-Becerra, L., Fröhling, M., Reuter, M. A., & Schlatmann, R., 2021, Process simulation and digitalization for comprehensive life-cycle sustainability assessment of Silicon photovoltaic systems, 20-25 June 2021, *48th IEEE Potovoltaic specialists conference (PVSC)*, 1244-1249.

Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., & Apul, D. S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 133-141.

Biswas, A., Husain, D., & Prakash, R., 2021, Life-cycle ecological footprint assessment of grid-connected rooftop solar PV system, *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(3), 529-538.

Blakers, A., 2019, Development of the PERC solar cell, *IEEE Journal of photovoltaics*. 9 (3), 629-635.

Brivio, E., Danelli, A., Girardi, P., 2024, Ground-mounted or residential rooftop photovoltaic plant-European production or Chinese production: which is the most environmentally sustainable system? A case study in Italy, *EPJ Photovoltaics*, 15, 8.

Caglayan, N., 2023, The Technical and Economic Assessment of a Solar Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System for a Dairy Farm, *Energies*, 16(20), 7043.

Cellura, M., Luu, L. Q., Guarino, F., & Longo, S., 2023, A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells, *Science of the total environment*, 168019.

Chen, W., Hong, J., Yuan, X., Liu, J., 2016, Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China, *Journal of cleaner production*, 112, 1025-1032.

Chen, Y., Chen, D., Altermatt, P. P., Zhang, S., Wang, L., Zhang, X., Xu, J., Feng. Z., Shen, H., Verlinden, P. J., 2023, Technology evolution of the photovoltaic industry: Learning from history and recent progress, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(12), 1194-1204.

Chester, M. V. and Horvath, A., 2009, Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains, *Environmental research letters*, 4(2), 024008.

Colak, H. E., Memisoglu, T., Gercek, Y., 2020, Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey, *Renewable energy*, 149, 565-576.

Constantino, G., Freitas, M., Fidelis, N., Pereira, M.G., 2018, Adoption of photovoltaic systems along a sure path: A life-cycle assessment (LCA) study applied to the analysis of GHG emission impacts, *Energies*, 11(10), 2806.

Corkish, R. and Prasad, D., 2006, Integrated solar photovoltaics for buildings, *Journal of green building*, 1(2), 63-76.

CSBB, 2023, 12. Kalkınma Planı 2024-2028, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Ekim 2023, https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/11/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_17112023.pdf, [Ziyaret tarihi:11 Eylül 2023].

De Andrade, C. E. S., & Márcio de Almeida, D.A, 2016, Energy use and carbon dioxide emissions assessment in the lifecycle of passenger rail systems: the case of the Rio de Janeiro Metro, *Journal of cleaner production*, 126, 526-536.

Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., & Bonaffini, D., 2015, Life Cycle Assessment of a heavy metro train, *Journal of cleaner production*, 87, 787-799.

Demir, N. and Taşkın, A., 2013, Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri, *Journal of cleaner production*, 54, 253-263.

Ecoinvent v3.7, Ecoinvent database, www.ecoinvent.org.

EI, 2023, *Statistical Review of World Energy*, Energy Institute (EI), 72nd ed., https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3.pdf.

El Seoud, T. A. and Samer, S., 2019, An Environmental Simulation Model for the Assessment of Solar Energy Use in Cairo's Rapid Transit Networks, *Environmental research, engineering and management*, 75(1).

Eskew, J., Ratledge, M., Wallace, M., Gheewala, S. H., & Rakkwamsuk, P., 2018, An environmental life cycle assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand, *Renewable energy*, 123, 781-792.

ETKB, 2022a. Türkiye Cumhuriyeti, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji elektrik#:~:text=2023%20y%C4%B1l%C4%B1nda%20elektrik%20%C3%BCretimimizin%2C%20%36,g%C3%BCc%C3%BC%20112.999%20MW'a%20ula%C5%9Fm%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r, [Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2024].

ETKB, 2022b. Türkiye Cumhuriyeti, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022.

EU RED, 2023. *Renewable Energy Directive EU/2023/2413*, European Commission, https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en, [Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2024].

Farrell, C.C., Osman, A.I., Doherty, R., Saad, M., Zhang, X., Murphy, A., Harrison, J., Vennard, A.S.M., Al-Muhtaseb, A.H., Rooney, D.W., 2020, Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules, Renewable and sustainable energy reviews, 128, 109911.

Friedrich, L., Nold, S., Müller, A., Rentsch, J., Preu, R., 2021, Global warming potential and energy payback time analysis of photovoltaic electricity by passivated emitter and rear cell (PERC) solar modules, *IEEE Journal of Photovoltaics.*

Frischknecht, R., Itten, P., Sinha, M., de Wild-Scholten, J., Zhang, V., Fthenakis, H., Kim, M., Raugei, M., Stucki, M., 2015, Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, Task 12, January 2015, ISBN:978-3-906042-28-2.

Frischknecht, P. Stolz, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha, and M. de Wild-Scholten, Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity, 2020a, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, Task 12, 4th ed., April 2020, ISBN:978-3-906042-99-2.

Frischknecht, R., Stolz, P., Krebs, L., de Wild-Scholten, M., Sinha, P., Fthenakis, V., Kim, H.C., Raugei, M., Stucki, M., 2020b, Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, Task 12: PV Sustainability, December 2020, ISBN:978-3-907281-14-7.

Fthenakis, V. M., Kim, H. C., Alsema, E., 2008, Emissions from photovoltaic life cycles, *Environmental science & technology*, 42(6), 2168-2174.

Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H. C., Alsema, E., Held, M., de Wild-Scholten, M., 2011, Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, Task 12, November 2011.

Fthenakis, Life cycle assessment of photovoltaics, in: Reinders, A., Verlinden, P., Van Sark, W., & Freundlich, A., 2017, Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications, *John Wiley & Sons*., 1st ed., 2017.

Fthenakis, V. and Raugei, M., 2017, Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems*, 209-232.

Gazbour, N., Razongles, G., Monnier, E., Joanny, M., Charbuillet, C., Burgun, F., & Schaeffer, C., 2018, A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems, *Journal of cleaner production*, 197, 1607-1618.

GDIP, 2016, *A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*, European Commission, Brussels, February, 2023.

GEPA, 2024a, *Güneş enerjisi potansiyel atlası*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, https://gepa.enerji.gov.tr/pages/34.aspx, [Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2023].

GEPA, 2024b, *Güneş enerjisi potansiyel atlası,* Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, https://gepa.enerji.gov.tr/, [Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2023].

Ghate, A. T., & Qamar, S., 2020, Carbon footprint of urban public transport systems in Indian cities. *Case studies on transport policy*, 8(1), 245-251.

Gremmelspacher, J. M., Pizarro, R. C., van Jaarsveld, M., Davidsson, H., & Johansson, D., 2021, Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden, *Solar energy*, 223, 248-260.

Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I., 2018, Life Cycle Assessment: Theory and Practice, Springer.

Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M., Deceglie, M., Ravikumar, D., Remo, T., Cui, H., Sinha, P.,…& Wade, A, 2020, Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy, *Nature Energy*, 5(7), 502-510.

Hondo, H., 2005, Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30(11-12), 2042-2056.

Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C., 2016, Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China, *Solar energy*, 133, 283-293.

Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Yao, Q., 2016, Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China, *Applied energy*, 164, 882-890.

Hsu, D. D., O'Donoughue, P., Fthenakis, V., Heath, G. A., Kim, H. C., Sawyer, P., Choi, Jun-Ki, Turney, D.E., 2012, Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization. *Journal of industrial ecology*, 16, S122-S135.

Google Earth, 2024, https://earth.google.com/web/, [Ziyaret tarihi: 10 Mart 2024].

IEA PVPS, 2023, *Trends in Photovoltaic Applications*, International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Programme, 2023.

IEA PVPS, 2020. *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*, Task 12 PV Sustainability, International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Programme, 2020.

IEA, 2023a, *Analysis and forecast to 2028*, Renewables, 2023, International Energy Agency (IEA), January 2024, https://www.iea.org/reports/renewables-2023.

IEA, 2023b, *World Energy Outlook 2023*, International Energy Agency (IEA), October 2023, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023.

IEA, 2023c, *CO_2 Emissions in 2023*, International Energy Agency (IEA), March 2024, https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023.

IEA, 2023d, *World Energy Investment 2023*, International Energy Agency (IEA), May 2023, https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023/overview-and-key-findings.

IEA 2023e, *IEA Renewable Energy, Market Update, Outlook for 2023 and 2024*, International Energy Agency (IEA), June 2023.

IEA, 2024, *Clean Energy Market Monitor-March 2024*, International Energy Agency (IEA), March 2024, https://www.iea.org/reports/clean-energy-market-monitor-march-2024.

IEA PVPS, 2024, *Environmental Life Cycle Assessment of Passivated Emitter and Rear Contact (PERC) Photovoltaic Module Technology*, Task 12 PV Sustainability-Environmental LCA of PERC Technology, International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Programme, 2024.

IRENA, 2019, *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA, 2023a, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway 2023*, International Renewable Energy Agency (IRENA), June 2023. ISBN: 978-92-9260-527-8.

IRENA, 2023b, *Global Market Outlook 2023-2027*, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023.

IRENA, 2024, *Renewable capacity statistics 2024*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024, ISBN: 978-92-9260-587-2.

ISO, 2006a, ISO 14040:2006, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO, 2006b. ISO 14044:2006, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ITRPV, 2023, *International Technology Roadmap for Phovoltaic (ITRPV) 2022 Results*, 14 Edition, April 2023.

İBB, 2017, *İBB Ulaşım Raporu*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Toplu Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğü, https://tuhim.ibb.gov.tr/media/2171/%C4%B0bb-ula%C5%9Fim-raporu-2017-tr_son.pdf.

İETT, 2019, İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri, https://www.iett.istanbul/tr/main/pages/istanbulda-toplu-ulasim/95, [Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2023].

Jean, J. and Brown, P.R., 2020, *Emerging photovoltaic technologies*. IOP Publishing Ltd., ISBN: 978-0-7503-2152-5.

Jia, L., Ma, J., Cheng, P., & Liu, Y., 2020, A perspective on solar energy-powered road and rail transportation in China, *CSEE Journal of power and energy systems*, 6(4), 760-771.

Jia, X., Zhou, C., Tang, Y., & Wang, W., 2021, Life cycle assessment on PERC solar modules, *Solar energy materials and solar cells*, 227, 111112.

Jian, L. and Min, C., 2018, Application of Solar PV Grid-Connected Power Generation System in Shanghai Rail Transit. *In 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 110-113.

Jones, C. and Gilbert, P., 2018, Determining the consequential life cycle greenhouse gas emissions of increased rooftop photovoltaic deployment, *Journal of cleaner production*, 184, 211-219.

JRC, 2011. *ILCD handbook Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context-based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors*, 1st ed., Publication Office of the European Union, 2011.

Jungbluth, N., 2005, Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 13(5), 429-446.

Kannan, R., Leong, K. C., Osman, R., Ho, H. K., & Tso, C.P., 2006, Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore, *Solar energy*, 80(5), 555-563.

Kapsalis, V. and Karamanis, D., 2015, On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand, *Energy and buildings*, 108, 195-204.

Khan, A. A., Reichel, C., Molina, P., Friedrich, L., Subasi, D. M., Neuhaus, H., & Nold, S., 2024, Global warming potential of photovoltaics with state-of-the art silicon solar cells: Influence of electricity mix, installation location and lifetime, *Solar energy materials and solar cells*, 269, 112724.

Khan, J. and Arsalan, M.H., 2016, Solar power technologies for sustainable electricity generation-A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 55, 414-425.

Kılıç, U. and Kekezoğlu, B., 2022, A review of solar photovoltaic incentives and Policy: Selected countries and Turkey, *Ain Shams engineering journal*, 13(5), 101669.

Kim, H. C., Fthenakis, V., Choi, J. K., & Turney, D.E., 2012, Life cycle greenhouse gas emissions of thin-film photovoltaic electricity generation: Systematic review and harmonization. *Journal of industrial ecology*, 16, S110-S121.

Kouloumpis, V., Kalogerakis, A., Pavlidou, A., Tsinarakis, G., & Arampatzis, G., 2020, Should photovoltaics stay at home? Comparative life cycle environmental assessment on roof-mounted and ground-mounted photovoltaics, *Sustainability*, 12(21), 9120.

Kursun, B., 2022, Role of solar power in shifting the Turkish electricity sector towards sustainability, *Clean Energy*, 6(2), 313-324.

Kutlu, E. C., Durusoy, B., Ozden, T., & Akinoglu, B.G., 2022, Technical potential of rooftop solar photovoltaic for Ankara, *Renewable energy*, 185, 779-789.

Kwak, Y., Mun, S. H., Park, C. D., Lee, S. M., & Huh, J.H., 2022, Statistical analysis of power generation of semi-transparent photovoltaic (STPV) for diversity in building envelope design: A mock-up test by azimuth and tilt angles, *Renewable energy*, 188, 651-669.

Li, Y., He, Q., Luo, X., Zhang, Y., & Dong, L., 2018, Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: a case study of Shanghai Metro. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 451-457.

Louwen, A., Van Sark, W. G. J. H. M., Schropp, R. E. I., Turkenburg, W. C., & Faaij, A.P.C., 2015, Life-cycle greenhouse gas emissions and energy payback time of current and prospective silicon heterojunction solar cell designs. *Progress in Photovoltaics: research and applications*, 23(10), 1406-1428.

Lu, L., & Yang, H.X., 2010, Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong, *Applied energy*, 87(12), 3625-3631.

Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Teridi, M. A. M., Sepeai, S., Zaharim, A., Sopian, K., 2018, Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 96, 11-28.

Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Chang, N. L., & Corkish, R., 2018, Life cycle assessment on PERC solar modules, *Solar energy materials and solar cells*, 187, 154-159.

Lunardi, M., Wing Yi Ho-Baillie, A., Alvarez-Gaitan, J. P., Moore, S., & Corkish, R., 2017, A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells, *Progress in photovoltaics: research and applications*, 25(8), 679-695.

Luo, W., Khoo, Y. S., Kumar, A., Low, J. S. C., Li, Y., Tan, Y. S., Wang, Y., Aberle, A.G., Ramakrishna, S., 2018, A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon Technologies, *Solar energy materials and solar cells*, 174, 157-162.

Martin, H., Buffat, R., Bucher, D., Hamper, J., & Raubal, M., 2022, Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand-A detailed case study, *Renewable and sustainable energy reviews*, 157, 111969.

Martinopoulos, G., 2020, Are rooftop photovoltaic systems a sustainable solution for Europe? A life cycle impact assessment and cost analysis, *Applied energy*, 257, 114035.

Mehedi, T. H., Gemechu, E., & Kumar, A., 2022, Life cycle greenhouse gas emissions and energy footprints of utility-scale solar energy systems, *Applied energy*, 314, 118918.

Metro İstanbul, 2023, *Hakkımızda*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, https://www.metro.istanbul/icerik/hakkimizda#:~:text=%C4%B0stanbul%20genelinde%20328%2C70%20km,d%C3%BCnyada%20%C3%B6rnek%20g%C3%B6sterilen%20markalar%20aras%C4%B1ndad%C4%B1r, [Ziyaret tarihi: 12 Nisan 2024].

Molla, S., Farrok, O., & Alam, M. J., 2024, Electrical energy and the environment: Prospects and upcoming challenges of the World's top leading countries, *Renewable and sustainable energy reviews*, 191, 114177.

Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M.L., 2020, Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels, *Energies*, 13(1), 252.

Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Herceg, S., Mittag, M., & Neuhaus, D.H., 2021, A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory, *Solar energy materials and solar cells*, 230, 111277.

NDC, 2023, *Republic of Türkiye Updated First Nationally Determined Contribution*, Nationally Determined Contribution, United Nations Framework Convention on Climate Change.

Nijsse, F. J., Mercure, J. F., Ameli, N., Larosa, F., Kothari, S., Rickman, J., Pim, V., Pollitt, H., 2023, The momentum of the solar energy transition, *Nature communications*, 14(1), 6542.

Our World in Data, 2024, *Energy production and consumption*, https://ourworldindata.org/energy-production-consumption, [Ziyaret tarihi:12.05.2024].

Pacca, S., Sivaraman, D., & Keoleian, G.A., 2007, Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems, *Energy policy*, 35(6), 3316-3326.

Quek, T. A., Ee, W. A., Chen, W., & Adam Ng, T.A., 2019, Environmental impacts of transitioning to renewable electricity for Singapore and the surrounding region: A life cycle assessment, *Journal of cleaner production*, 214, 1-11.

Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K. J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G., 2021, Environmental impacts of solar energy systems: A review, *Science of the total environment*, 754, 141989.

Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M.M., 2022, Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic, *Renewable and sustainable energy reviews*, 161, 112279.

Ratner, S. V., & Lychev, A.V., 2019, Evaluating environmental impacts of photovoltaic technologies using data envelopment analysis, *Advances in systems science and applications*, 19(1), 12-30.

Reichel, C.; Müller, A.; Friedrich, L.; Herceg, S.; Mittag, M.; Protti, A.; Neuhaus, D.H., 2022, CO_2 Emissions of Silicon Photovoltaic Modules-Impact of Module Design and Production Location, *In Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, EU PVSEC, Milan, Italy, 26–30 September 2022,1617–1619.

Reinders, A., Verlinden, P., Van Sark, W., & Freundlich, A., 2017, *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*, 1st ed, John Wiley & Sons.

Ren, Y., Liu, X., Li, H., Qin, J., Du, S., Lu, X., Tong, J., Yang, C., Li, J., 2022, Utilizing non-conjugated small-molecular tetrasodium iminodisuccinateas electron transport layer enabled improving efficiency of organic solar cells, *Optical materials*, 129, 112520.

Roy, R., & Pearce, J. M., 2024, Is small or big solar better for the environment? Comparative life cycle assessment of solar photovoltaic rooftop vs. ground-mounted systems. *The international journal of life cycle assessment*, 29(3), 516-536.

Santoyo-Castelazo, E., Solano-Olivares, K., Martínez, E., García, E. O., & Santoyo, E., 2021, Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: A case study for Mexico, *Journal of cleaner production*, 316, 128314.

Senol, R., 2012, An analysis of solar energy and irrigation systems in Turkey, *Energy policy*, 47, 478-486.

Serrano-Luján, L., Espinosa, N., Abad, J., & Urbina, A., 2017, The greenest decision on photovoltaic system allocation. *Renewable energy*, 101, 1348-1356.

Shravan, K., Chunduri, K., 2019, Advanced solar module technology-The time for a new generation of solar modules has come, *TaiyangNews*, China.

Sinha, P., Cossette, M., Menard, J.F., 2012, End-of-life CdTe PV recycling with semiconductor refining. *In: 27th European photovoltaic solar energy conference and exhibition*. Frankfurt, 24–28.

SolarPower Europe, 2023a, *EU Market Outlook for Solar Power 2023 – 2027*, December 2023, https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027-1.

SolarPower Europe, 2023b, https://www.solarpowereurope.org/press-releases/eu-countries-solar-targets-for-2030-jump-by-63-but-reality-still-outstrips-ambition, [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2024].

SolarPower Europe, 2023c. *Global Market Outlook for Solar Power 2023-2027*, June 2023.

Stamford, L. and Azapagic, A., 2018, Environmental impacts of photovoltaics: the effects of technological improvements and transfer of manufacturing from Europe to China. *Energy technology*, 6(6), 1148-1160.

Statista, 2024. *Primary energy consumption in Turkey from 2000 to 2023*. https://www.statista.com/statistics/892848/primary-energy-consumption-turkey/#:~:text=Turkey's%20primary%20energy%20consumption%20amounted,from%207.1%20exajoules%20in%202022 [Ziyaret tarihi: 1 Mayıs 2024].

Struckl, W. and Wimmer, W., 2007, Green Line-strategies for environmentally improved railway vehicles. *In Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, Springer, London, 77-82.

Sumper, A., Robledo-García, M., Villafáfila-Robles, R., Bergas-Jané, J., & Andrés-Peiró, J.., 2011, Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain), *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8), 3888-3896.

TEİAŞ, 2022, *Aralık 2022 Kurulu Güç Raporu*, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, 2022. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri.

TEİAŞ, 2023, *Aralık Ayı Kurulu Güç Raporu*, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Aralık 2023.

Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Jiménez, L., & Boer, D., 2022, Self-consumption possibilities by rooftop PV and building retrofit requirements for a regional building stock: The case of Catalonia, *Solar energy*, 238, 150-161.

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V., 2005, Environmental impacts from the solar energy technologies, *Energy policy*, 33(3), 289-296.

TÜİK, 2023, *Türkiye İstatistik Kurumu, Motorlu Kara Taşıtları*, Aralık, 2023, https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2023-49432.

TÜİK, 2021, *Sera gazı emisyon istatistikleri 1990-2021*, Türkiye İstatistik Kurumu, 2021.

UNFCCC, 2016, *The Paris Agreement*, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2016.

UNFCCC, 2023, *Summary of Global Climate Action at COP 28*, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 11 December 2023, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Summary_GCA_COP28.pdf.

Uzun ve Onat, 2023, Sürdürülebilir kentsel ulaşım yaklaşımları: Metro ulaşım sistemlerinin yaşam döngüsü yaklaşımı ile değerlendirilmesi, *Sürdürülebilir Kent Planlama Ekseninde Enerji Verimliliği ve Ekoloji*, İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım, 1-300.

Üçtuğ, F. G. and Azapagic, A., 2018, Environmental impacts of small-scale hybrid energy systems: Coupling solar photovoltaics and lithium-ion batteries, *Science of the total environment*, 643, 1579-1589.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016, The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21:1218–1230.

Wong, J. H., Royapoor, M., & Chan, C.W., 2016, Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems, *Renewable and sustainable energy reviews*, 58, 608-618.

The World Bank, 2020, *Solar resource maps of Turkey*, Global Solar Atlas 2.0, https://globalsolaratlas.info/download/turkey.

Yao, H. and Zhou, Q., 2023, Research status and application of rooftop photovoltaic Generation Systems. *Cleaner energy systems*, 100065.

Yilan, G., Kadirgan, M. N., & Çiftçioğlu, G.A., 2020, Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey, *Renewable energy*, 146, 519-529.

Yin, A., Zhang, Z., Jin, X., Wang, H., Zhang, M., & Wang, H., 2022. Carbon emission analysis of two crystalline silicon components throughout the life cycle, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 983, 1, 012111

Yu, M. and Halog, A., 2015, Solar photovoltaic development in Australia-a life cycle sustainability assessment study, *Sustainability*, 7(2), 1213-1247.

Zahedi, R., Moosavian, S. F., & Aslani, A., 2022, Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using the LCA approach, *Energy science and engineering*, 10(12), 4640-4661.

Zhang, J., Gao, X., Deng, Y., Zha, Y., Yuan, C., 2017, Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems, *Solar energy materials and solar cells*, 166, 9-17.

BBB, 2022, Bursa Büyükşehir Belediyesi, https://www.bursa.bel.tr/haber/buyuksehirin-enerjisi-dogadan-31407#:~:text=B%C3%BCy%C3%BCk%C5%9Fehir%20Belediyesi%20ve%20TEK%20Enerji,zamanda%20%C3%BCretim%20i%C3%A7in%20devreye%20al%C4%B1nacak, [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2023].

ADB, 2024, Adana Büyükşehir Belediyesi, https://www.adana.bel.tr/tr/haber/hem-doga-korunacak--hem-belediyenin-enerjiye-harcadigi-para-hizmete-aktarilacak, [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2023].

EKLER

Ek-1. Çatı üstü PV uygulamaların çevresel etkilerini değerlendirilen çalışmalar, 2000-2024

Referans	Ülke	Bina yerleşkesi	Hücre Teknoloji	Envanter	Sistem sınırı	Modül verimliliği (%)	Işınlama (kWh/ m^2/yıl)	Yaşam ömrü (yıl)	Modül gücü (Wp)	Fonksiyonel birim	Kurulum kapasitesi	Çevresel Etkiler	Metot	GHG (g $CO_{2\ eşd.}$/ kWh)	EPBT
Kannan ve diğ., 2006	Singapur	-	mono-Si	Literatür	Beşikten mezara, BOS	11.86	1635	25	-	kWh	2.7 kWp	GHG	-	165.0	6.74
Pacca ve diğ., 2007	ABD	Üniversite yerleşkesi	multi-Si a-Sİ	Endüstri Literatür	Beşikten kapıya, BOS	6.62-12.92	1241-1359	20	-	kWh	33 kWp	GHG	-	72.4 (multi-Si) 34.3 (a-Si)	-
De Wild Scholten, 2009	Güney Avrupa	-	CIS	-	-	10.5	1700	30	-	-	-	GHG	-	21	1.45
Lu ve Yang, 2010	Çin	Üniversite yerleşkesi	mono-Si	-	Beşikten mezara, BOS	-	-	20-30	175	kWh	22 kWp	GHG	-	98.834	7.3
Sumper ve diğ., 2011	İspanya	-	multi-Si	Endüstri Literatür	Beşikten kapıya, BOS	-	1408.8-1930.9	20-30	270	kWh	200 kWp	GHG	E. F	-	4.4
Maria ve diğ., 2014	Merkez Avrupa	-	DSSC	-	-	8	1117	-	-	-	-	GHG	-	9.8–24 kg CO_2	1.4-1.8
Yu ve Halong, 2015	Avustralya	Üniversite yerleşkesi	multi-Si	Ecoinvent v3.1	Beşikten Mezara	14.7	-	30	240	kWh	1.2 MWp	+	CML 2000	69.4	7.91
Eskew ve diğ., 2018	Tayland	Üniversite yerleşkesi	multi-Si	Literatür Ecoinvent 3	Beşikten Mezara	16.2	-	30	-	kWh	52.7 kWp	+	ReCiPe 1.13	79.0	2.5
Constantino ve diğ., 2018	Brezilya	Üniversite yerleşkesi	multi-Si	Literatür	Beşikten Mezara	14.4-16.16	1881-2060	25	235-260	kWh	1.1 MWp	GHG	-	58.38-81.92	2.91-5.16
Jones ve Gilbert, 2018	İngiltere	Konut	mono-Si multi-Si CdTe	Literatür IEA PVPS 2015	Beşikten mezara, BOS (EOL hariç)	17.0 (mono-Si) 16.0	-	30	-	kWh	1 kWp	GHG	-	21-107	-
Uçtuğ ve Azapagic, 2018	Türkiye	Konut	multi-Si	Literatür Ecoinvent v2.2	Beşikten kapıya	-	-	25	-	kWh	1 kWp	+	CML 2001	33.7-46.4	-

Ek-1. Çatı üstü PV uygulamaların çevresel etkilerini değerlendirilen çalışmalar, 2000-2024 (devam)

Referans	Ülke	Bina yerleşkesi	Hücre Teknoloji	Envanter	Sistem sınırı	Modül verimliliği (%)	Işınlama (kWh/m^2/yıl)	Yaşam ömrü (yıl)	Modül gücü (Wp)	Fonksiyonel birim	Kurulum kapasitesi	Çevresel Etkiler	Metot	GHG (g $CO_{2\ eşd.}$/ kWh)	EPBT
Martinopoulos, 2020	Avrupa	Konut	multi-Si	Ecoinvent v.2.2	Beşikten Mezara	17.3	-	25	200	kWh	4 kWp	+	Eco-Indicator 99	-	5-11
Kouloumpis ve diğ., 2020	Yunanistan	Konut (roof-mounted)	mono-Si	Ecoinvent v3.5	Beşikten kapıya, BOS, (EOL hariç)	15.25	-	30	225–255	kWh	10 kWp	+	CML 2001	54.2–54.5	-
Santoyo-Castelazo ve diğ., 2021	Meksika	-	mono-Si multi-Si a-Si CIS	Endüstri Ecoinvent 3.1	Beşikten Mezara	14.7	1592	30	-	kWh	3 kWp	+	CML 2001	47.156	5.1
Biswas ve diğ., 2021	Hindistan	Üniversite yerleşkesi	multi-Si	Literatür	Beşikten Mezara	16.41	4.93 kWh/m^2/day	20	320	kWp, m^2	1 MWp	EF	-	1.59x10-5 gha	-
Ali ve diğ., 2022	ABD	Konut (roof-mounted)	multi-Si mono-Si	Literatür Endüstri Ecoinvent v3.6	Beşikten mezara	17.76	-	30	-	kWh	-	GHG	TRACI 2.1	25.2-88.5	-
Alam ve Xu, 2023	Kanada	Konut	mono-Si	Ecoinvent v3.7.1	Beşikten kapıya	14.0	1300	30	-	kWh	3 kWp	+	TRACI 2.1	79	-
Roy ve Pearce, 2024	ABD	Konut	mono-Si	Literatür	Beşikten Mezara	18.92	3.92-5.81 kWh/m^2/day	25	380	kWh	7.4 kWp	GHG	-	14.6- 36.3	0.83-2.2

Ek-2. Panel Üretim Envanteri

Ek-2.1. MG-Si üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
charcoal	1.70E-01	kg	market for charcoal [GLO]	Ecoinvent v3.7
coke	2.31E+01	MJ	market for coke [GLO]	Ecoinvent v3.7
electricity, medium voltage	1.10E+01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Ecoinvent v3.7, süreç bağlantısı değiştirildi
graphite	1.00E-01	kg	market for graphite [GLO]	Ecoinvent v3.7
oxygen, liquid	2.00E-02	kg	market for oxygen, liquid [RER]	Ecoinvent v3.7
petroleum coke	5.00E-01	kg	market for petroleum coke [GLO]	Ecoinvent v3.7
silica sand	2.70E+00	kg	market for silica sand [GLO]	Ecoinvent v3.7
silicone factory	1.00E-11	unit	silicone factory construction [RER]	Ecoinvent v3.7
wood chips, wet, measured as dry mass	5.50E-01	kg	market for wood chips, wet, measured as dry mass [Europe without Switzerland]	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
silicon, metallurgical grade [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**kg**	Silicon production, solar grade, modified Siemens process	
Aluminium [air/non-urban air or from high stacks]	1.55E-06	kg		Ecoinvent v3.7
Antimony [air/non-urban air or from high stacks]	7.85E-09	kg		Ecoinvent v3.7
Arsenic [air/non-urban air or from high stacks]	9.42E-09	kg		Ecoinvent v3.7
Boron [air/non-urban air or from high stacks]	2.79E-07	kg		Ecoinvent v3.7
Cadmium [air/non-urban air or from high stacks]	3.14E-10	kg		Ecoinvent v3.7
Calcium [air/non-urban air or from high stacks]	7.75E-07	kg		Ecoinvent v3.7
Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	3.58E+00	kg		Ecoinvent v3.7
Carbon dioxide, non-fossil [air/non-urban air or from high stacks]	1.61E+00	kg		Ecoinvent v3.7
Carbon monoxide, fossil [air/non-urban air or from high stacks]	1.38E-03	kg		Ecoinvent v3.7
Carbon monoxide, non-fossil [air/non-urban air or from high stacks]	6.20E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Chlorine [air/non-urban air or from high stacks]	7.85E-08	kg		Ecoinvent v3.7
Chromium [air/non-urban air or from high stacks]	7.85E-09	kg		Ecoinvent v3.7
Cyanide [air/non-urban air or from high stacks]	6.87E-06	kg		Ecoinvent v3.7
Fluorine [air/non-urban air or from high stacks]	3.88E-08	kg		Ecoinvent v3.7
Hydrogen fluoride [air/non-urban air or from high stacks]	5.00E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Hydrogen sulfide [air/non-urban air or from high stacks]	5.00E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Iron [air/non-urban air or from high stacks]	3.88E-06	kg		Ecoinvent v3.7
Lead [air/non-urban air or from high stacks]	3.44E-07	kg		Ecoinvent v3.7
Mercury [air/non-urban air or from high stacks]	7.85E-09	kg		Ecoinvent v3.7
Nitrogen oxides [air/non-urban air or from high stacks]	9.74E-03	kg		Ecoinvent v3.7
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/non-urban air or from high stacks]	9.60E-05	kg		Ecoinvent v3.7
Particulates, > 10 um [air/non-urban air or from high stacks]	7.75E-03	kg		Ecoinvent v3.7
Potassium [air/non-urban air or from high stacks]	6.20E-05	kg		Ecoinvent v3.7
Silicon [air/non-urban air or from high stacks]	7.51E-03	kg		Ecoinvent v3.7
slag from metallurgical grade silicon production	2.50E-02	kg	market for slag from metallurgical grade silicon production [GLO]	Ecoinvent v3.7
Sodium [air/non-urban air or from high stacks]	7.75E-07	kg		Ecoinvent v3.7
Sulfur dioxide [air/non-urban air or from high stacks]	1.22E-02	kg		Ecoinvent v3.7
Tin [air/non-urban air or from high stacks]	7.85E-09	kg		Ecoinvent v3.7

Ek-2.2. Polisilikon üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
electricity, medium voltage	7.20E+01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Friedrich ve diğ. (2020), süreç bağlantısı değiştirildi
heat, district or industrial, natural gas	7.00E+01	MJ	Heat, district or industrial, natural gas, heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW: [CN or Europe without Switzerland]	Friedrich ve diğ. (2020), süreç bağlantısı değiştirildi
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1.60E+00	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RER]	Ecoinvent v3.7
hydrogen, liquid	5.01E-02	kg	market for hydrogen, liquid [RER]	Ecoinvent v3.7
silicon, metallurgical grade	1.13E+00	kg	silicon, metallurgical grade [CN, TR ve EU]	Ek-2.1
silicone factory	1.00E-11	unit	silicone factory construction [RER]	Ecoinvent v3.7
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	3.48E-01	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
silicon, polysilicon [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**kg**	p-type silicon production, single crystal, Czochralski process	
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl [water/surface water]	1.26E-05	kg		Ecoinvent v3.7
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	2.05E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Chloride [water/surface water]	3.60E-02	kg		Ecoinvent v3.7
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	2.02E-03	kg		Ecoinvent v3.7
Copper, ion [water/surface water]	1.02E-07	kg		Ecoinvent v3.7
DOC, Dissolved Organic Carbon [water/surface water]	9.10E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Iron, ion [water/surface water]	5.61E-06	kg		Ecoinvent v3.7
Nitrogen [water/surface water]	2.08E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Phosphate [water/surface water]	2.80E-06	kg		Ecoinvent v3.7
Sodium, ion [water/surface water]	3.38E-02	kg		Ecoinvent v3.7
TOC, Total Organic Carbon [water/surface water]	9.10E-04	kg		Ecoinvent v3.7
Zinc, ion [water/surface water]	1.96E-06	kg		Ecoinvent v3.7

Ek-2.3. Czochralski (Cz) silikon üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
argon, liquid	4.60E-02	kg	market for argon, liquid [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
ceramic tile	6.20E-02	kg	market for ceramic tile [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
electricity, medium voltage	3.84E+01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Friedrich ve diğ. (2020)
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	4.38E-04	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
hydrogen fluoride	3.51E-03	kg	market for hydrogen fluoride [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
lime, hydrated, packed	2.20E-02	kg	market for lime, hydrated, packed [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
nitric acid, without water, in 50% solution state	7.78E-03	kg	market for nitric acid, without water, in 50% solution state [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
silicon, poly-silicon	6.39E-01	kg	silicon, poly-silicon [CN, TR or EU]	Ek-2.2
silicone factory	5.00E-12	unit	market for silicone factory [GLO]	Ecoinvent v3.7
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	4.78E-03	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
water, completely softened	6.84E-02	kg	market for water, completely softened [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	2.33E+00	m^3		Friedrich ve diğ. (2020)
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
silicon, single crystal, Czochralski, [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**kg**	170 µm mono M6 bricking and wafer production, photovoltaic	
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	1.30E-01	kg		Ecoinvent v3.7
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	1.30E-01	kg		Ecoinvent v3.7
DOC, Dissolved Organic Carbon [water/surface water]	4.05E-02	kg		Ecoinvent v3.7
Fluoride [water/surface water]	2.37E-03	kg		Ecoinvent v3.7
Hydrocarbons, unspecified [water/surface water]	2.28E-02	kg		Ecoinvent v3.7
Hydroxide [water/surface water]	7.42E-03	kg		Ecoinvent v3.7
Nitrogen [water/surface water]	9.10E-03	kg		Ecoinvent v3.7
TOC, Total Organic Carbon [water/surface water]	4.05E-02	kg		Ecoinvent v3.7
waste, from silicon wafer production, inorganic	1.00E-01	kg	market for waste, from silicon wafer production, inorganic [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
Water [air/unspecified]	3.00E-01	m^3		Friedrich ve diğ. (2020)
Water [water/unspecified]	2.20E+00	m^3		Friedrich ve diğ. (2020)

Ek-2.4. Monokristalin Si levha üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
acrylic binder, without water, in 34% solution state	4.98E-03	kg	market for acrylic binder, without water, in 34% solution state [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical	3.40E-02	kg	market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
brass	7.45E-03	kg	market for brass [RoW]	Ecoinvent v3.7
citric acid	1.87E-01	kg	market for citric acid [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
electricity, medium voltage	2.35E+00	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Friedrich ve diğ. (2020) süreç bağlantısı değiştirildi
glass wool mat	1.06E-02	kg	market for glass wool mat [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
heat, district or industrial, natural gas	1.80E+00	MJ	Heat, district or industrial, natural gas, heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW: [CN or Europe without Switzerland]	Friedrich ve diğ. (2020) süreç bağlantısı değiştirildi
hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	2.53E-02	kg	market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
potassium hydroxide	3.81E-03	kg	market for potassium hydroxide [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
silicon, single crystal, Czochralski process, photovoltaics	1.03E+00	kg	silicon, single crystal, Czochralski [CN, TR or EU]	Ek-2.3
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1.50E-02	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	Ecoinvent v3.7
steel, low-alloyed, hot rolled	8.96E-04	kg	market for steel, low-alloyed, hot rolled [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
wafer factory	2.00E-06	unit	market for wafer factory [GLO]	Ecoinvent v3.7
water, completely softened	2.17E+01	kg	market for water, completely softened [RoW]	Friedrich ve diğ. (2020)
wire drawing, steel	8.96E-04	kg	market for wire drawing, steel [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
single-Si wafer, photovoltaic [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**m^2**	PERC cell production, mono Si M6 wafer	Friedrich ve diğ. (2020)
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl [water/surface water]	5.01E-04	kg		Ecoinvent v3.7
BOD5, Biological Oxygen Demand [water/surface water]	2.96E-02	kg		Ecoinvent v3.7
COD, Chemical Oxygen Demand [water/surface water]	2.96E-02	kg		Ecoinvent v3.7
Copper, ion [water/surface water]	6.05E-05	kg		Ecoinvent v3.7
DOC, Dissolved Organic Carbon [water/surface water]	1.11E-02	kg		Ecoinvent v3.7
Nitrogen [water/surface water]	9.94E-03	kg		Ecoinvent v3.7
TOC, Total Organic Carbon [water/surface water]	1.11E-02	kg		Ecoinvent v3.7
waste, from silicon wafer production	2.00E-02	kg	market for waste, from silicon wafer production [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
Water [air/unspecified]	9.75E-03	m^3		Friedrich ve diğ. (2020)
Water [water/unspecified]	2.50E-02	m^3		Friedrich ve diğ. (2020)

Ek-2.5. Metil alüminyum seskiklorür üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
aluminium chloride	1.62E+00	kg	market for aluminium chloride [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
aluminium, wrought alloy	2.62E+01	kg	market for aluminium, wrought alloy [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
electricity, medium voltage	2.58E-01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Smith ve diğ. (2018), süreç bağlantısı değiştirildi
methylchloride	7.37E+01	kg	market for methylchloride [RoW]	Smith ve diğ. (2018)
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
methyl aluminium sesquichloride [CN, TR or EU]	**1.00E+02**	**kg**	For TMAl production	
Chlorine [air/urban air close to ground]	2.30E+00	kg		Smith ve diğ. (2018)
Methane, non-fossil [air/urban air close to ground]	2.30E+00	kg		Smith ve diğ. (2018)

Ek-2.6. Trimetilalüminyum üretimi envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
electricity, medium voltage	5.19E+00	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Smith ve diğ. (2018), süreç bağlantısı değiştirildi
methyl aluminium sesquichloride	8.26E+01	kg	methyl aluminum sesquichloride production [CN, TR or EU]	Smith ve diğ. (2018) Tablo E5
nitrogen, liquid	8.25E-01	kg	market for nitrogen, liquid [RoW]	Smith ve diğ. (2018)
paraffin	1.53E-01	kg	market for paraffin [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
sodium	2.70E+01	kg	market for sodium [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
trimethylaluminium, 98.5%, [CN, TR or EU]	**3.00E+01**	**kg**	TMAl purification	Smith ve diğ. (2018)
hazardous waste, for incineration	8.93E+01	kg	market for hazardous waste, for incineration [RoW]	Smith ve diğ. (2018)

Ek-2.7. TMAI saflaştırması için envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
electricity, medium voltage	5.60E-01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Smith ve diğ. (2018), süreç bağlantısı değiştirildi
helium	4.00E-01	kg	market for helium [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
sodium	2.00E+01	kg	market for sodium [GLO]	Smith ve diğ. (2018)
trimethylaluminium, 98.5%	1.00E+02	kg	trimethylaluminium, 98.5% [CN, TR or EU]	Smith ve diğ. (2018), Ek-2.6
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
trimethylaluminium, solar grade [CN, TR or EU]	**6.00E+01**	**kg**	PERC half cell production, mono Si M6 wafer	Smith ve diğ. (2018)
hazardous waste, for incineration	6.00E+01	kg	market for hazardous waste, for incineration [RoW]	Smith ve diğ. (2018)

Tablo 2.8. Metalizasyon pasta, arka tabaka üretim envanter verileri (Müller ve diğ., 2021)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
chemical, organic	5.00E-01	kg	market for chemical, organic [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
electricity, medium voltage	2.50E-01	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	Ecoinvent v3.7, süreç bağlantısı değiştirildi
heat, district or industrial, natural gas	7.45E-01	MJ	market group for heat, district or industrial, natural gas [RER]	Ecoinvent v3.7
silver	5.00E-01	kg	market for silver [GLO]	Friedrich ve diğ. (2020)
solder factory	2.00E-10	unit	solder factory construction [RER]	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
metallization paste, back side, [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**kg**	market for metallization paste, back side	Friedrich ve diğ. (2020) / Ecoinvent v3.7

Ek-2.9. Mono-Si PERC hücre üretimi envanter verileri (IEA PVPS, 2024)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
ammonia, liquid	1.27E-02	kg	market for ammonia, liquid [RoW]	IEA PVPS 2024
electricity, medium voltage	5.80E+00	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	IEA PVPS 2024
hydrochloric acid, without water, in 37% solution state	1.41E-02	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [GLO]	IEA PVPS 2024
Hydrogen fluoride in 49% solution state	8.02E-02	kg	market for hydrogen fluoride [GLO]	IEA PVPS 2024
hydrogen peroxide, without water, in 30% solution state	1.20E-02	kg	market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	IEA PVPS 2024
metallization paste, back side	1.13E+03	mg	metallization paste, back side [CN,TR or EU]	IEA PVPS 2024, Ek-2.8
metallization paste, back side, aluminium	6.80E+03	mg	market for metallization paste, back side, aluminium [GLO]	IEA PVPS 2024
				IEA PVPS 2024
metallization paste, front side	4.08E+03	mg	metallization paste, front side [GLO]	IEA PVPS 2024
nitric acid, without water, in 67% solution state	8.67E-02	kg	market for nitric acid, without water, in 50% solution state [RoW]	IEA PVPS 2024
Additive[1]	1.31E-02	kg	-	IEA PVPS 2024
Nitrogen 6.0	3.40E-09	kg	-	IEA PVPS 2024
Nitrogen 5.0	3.23E-08	kg	-	IEA PVPS 2024
nitrous oxide	1.71E-05	kg	market for nitrous oxide [ROW]	IEA PVPS 2024
oxygen, liquid	3.15E-09	kg	market for oxygen, liquid [RER]	IEA PVPS 2024
phosphoryl chloride	1.81E-04	kg	market for phosphoryl chloride [ROW]	IEA PVPS 2024
photovoltaic cell factory	4.00E-07	unit	market for photovoltaic cell factory [GLO]	IEA PVPS 2024
potassium hydroxide	5.16E-02	kg	market for potassium hydroxide [GLO]	IEA PVPS 2024
silicon tetrahydride	2.29E-03	kg	market for silicon tetrahydride [GLO]	IEA PVPS 2024
methane	1.11E-03	kg	market for methane [GLO]	IEA PVPS 2024
single-Si wafer, photovoltaic	1.04E+00	m^2	market for single-Si wafer, photovoltaic [GLO]	IEA PVPS 2024
Compressed dry air	1.13E+00	m^3	ROW	IEA PVPS 2024
sulfuric acid	5.88E-02	kg	market for sulfuric acid [RoW]	IEA PVPS 2024
trimethylaluminium, solar grade	2.42E-04	kg	trimethylaluminium, solar grade [CN, TR ve EU]	IEA PVPS 2024
Water, cooling, unspecified natural origin [natural resource/in water]	2.32E-01	m^3	RER	IEA PVPS 2024
water, deionised	2.88E+01	kg	market for water, deionised [RoW]	
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
photovoltaic cell, single-Si wafer [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**m^2**		
Ammonia	3.07E-05	kg		IEA PVPS 2024
Silver	6.64E-06	kg		IEA PVPS 2024
Hydrogen fluoride [air/urban air close to ground]	3.04E-02	kg		IEA PVPS 2024
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/urban air close to ground]	1.26E-02	kg		IEA PVPS 2024
Silicon	2.62E-03	kg		IEA PVPS 2024
Hydrogen	1.10E-02	kg		IEA PVPS 2024
Chlorine	2.48E-03	kg		IEA PVPS 2024
waste, from silicon wafer production, inorganic	2.32E+00	kg	GLO	IEA PVPS 2024
wastewater from PV cell production	3.96E-05	m^3	GLO	IEA PVPS 2024
solvents mixture	1.72E-01	kg	GLO	IEA PVPS 2024
Water [air/unspecified]	3.96E+00	kg		IEA PVPS 2024

[1] Approximated with isopropanol, in accordance with IEA PVPV 2024

Ek-2.10. Cam-arka tabaka modül montaj üretim envanter verileri (IEA PVPS, 2024)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
aluminium alloy, AlMg3	1.19E+00	kg	aluminium alloy production, AlMg3 [GLO], with modified activity link to electricity: market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	IEA PVPS 2024
aluminium working process	1.19E+00		GLO	IEA PVPS 2024
copper	7.45E-02	kg	market for copper [GLO]	IEA PVPS 2024
				IEA PVPS 2024
electricity, medium voltage	4.13E+00	kWh	market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	IEA PVPS 2024
ethylvinylacetate, foil	9.87E-01	kg	market for ethylvinylacetate, foil [GLO]	IEA PVPS 2024
cardboard	2.44E-01	kg	Market for corrugated board box [RoW]	IEA PVPS 2024
pallet	2.89E-01	kg	ROW	IEA PVPS 2024
polystyrene	2.10E-02	kg	GLO	IEA PVPS 2024
lead	6.75E-03	kg	market for lead [GLO]	IEA PVPS 2024
photovoltaic cell, single-Si wafer	9.05E-01	m^2	Photovoltaic cell, single-Si wafer, [CN, TR or EU]	IEA PVPS 2024
photovoltaic panel factory	4.04E-06	unit	market for photovoltaic panel factory [GLO]	Ecoinvent v3.7
polyethylene terephthalate, granulate, amorphous	3.11E-01	kg	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [GLO]	IEA PVPS 2024
polyvinylfluoride, film	4.52E-02	kg	market for polyvinylfluoride, film [GLO]	IEA PVPS 2024
silicone product	1.14E-01	kg	market for silicone product [RoW]	IEA PVPS 2024
solar glass, low-iron	7.63E+00	kg	flat glass production, uncoated [GLO], with modified activity link to electricity: market for electricity [TR]/ market group for electricity [RER]/market group for electricity [CN], medium voltage	IEA PVPS 2024
anti-reflex coating	9.92E-01	m^2	GLO	IEA PVPS 2024
J-box + cables	1.14E-01	kg	GLO	IEA PVPS 2024
tin	1.01E-02	kg	market for tin [GLO]	IEA PVPS 2024
Tap water from public supply	6.99E-04	m^3		IEA PVPS 2024
Çıktı	**Miktar**	**Birim**	**Süreç bağlantısı**	**Kaynak**
photovoltaic panel, single-Si wafer, glass-back sheet, [CN, TR or EU]	**1.00E+00**	**m^2**		
waste, from silicon wafer production	3.52E-03	kg	market for waste, from silicon wafer production [GLO]	IEA PVPS 2024
waste plastic, mixture	4.37E-03	kg	market for waste plastic, mixture [GLO]	IEA PVPS 2024

Ek-3. Sistem dengesi bileşenleri üretim envanteri

Tablo 3.1. İnvertör üretim envanteri (500 kW)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state	20.9E+00	kg	market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RER}	Ecoinvent v3.7
Aluminum cast alloy	124.7E+00	kg	market for aluminum cast alloy {GLO}	Ecoinvent v3.7
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height	2.44E-01	kg	market for capacitor, electrolyte type, > 2 cm height {GLO}	Ecoinvent v3.7
Capacitor, film type, for through-hole mounting	3.33E-01	kg	market capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO}	Ecoinvent v3.7
Capacitor, tantalum-, for through-hole mounting	2.2E-02	kg	market capacitor, tantalum-, for through-hole mounting {GLO}	Ecoinvent v3.7
Copper, cathode	318.9E+00	kg	market copper, cathode {GLO}	Ecoinvent v3.7
Corrugated board box	12.9E+00	kg	market for corrugated board box {RER}	Ecoinvent v3.7
Diode, glass-, for through-hole mounting	4.5E-02	kg	market for diode, glass-, for through-hole mounting {GLO}	Ecoinvent v3.7
Electric connector, wire clamp	45.1E+00	kg	market for electric connector, wire clamp {GLO}	Ecoinvent v3.7
Fleece, polyethylene	2.86E-01	kg	market for fleece, polyethylene {GLO}	Ecoinvent v3.7
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	67.6E+00	kg	market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}	Ecoinvent v3.7
Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up	41.9E+00	kg	market for glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO}	Ecoinvent v3.7
Inductor, ring core choke type	3.33E-01	kg	market for inductor, ring core choke type {GLO}	Ecoinvent v3.7
Injection moulding	67.6E+00	kg	injection moulding {RER} processing	Ecoinvent v3.7
Integrated circuit, logic type	2.7E-02	kg	market for integrated circuit, logic type {GLO}	Ecoinvent v3.7
Lubricating oil	838.6E+00	kg	market for lubricating oil {RER}|	Ecoinvent v3.7
Metal working factory {RER}| construction	1.29E-06	p	metal working factory {RER}| construction	Ecoinvent v3.7
Polyethylene, high density, granulate	20.9E+00	kg	market for polyethylene, high density, granulate {GLO}	Ecoinvent v3.7
Polystyrene foam slab	1.52E+00	kg	market for polystyrene foam slab {GLO}	Ecoinvent v3.7
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface	11.0E-02	m^2	market for printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface {GLO}	Ecoinvent v3.7
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb free surface	11.0E-02	m^2	market for printed wiring board, for through-hole mounting, Pb free surface {GLO}	Ecoinvent v3.7
Resistor, metal film type, through-hole mounting	4.8E-03	kg	market for resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO}	Ecoinvent v3.7
Section bar extrusion, aluminum	124.7E+00	kg	section bar extrusion, aluminum {RER}, processing	Ecoinvent v3.7
Sheet rolling, steel	1368.8E+00	kg	sheet rolling, steel {RER}, processing	Ecoinvent v3.7
Steel, low-alloyed, hot rolled	1368.8E+00	kg	market for steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}	Ecoinvent v3.7
Transistor, wired, small size, through-hole mounting	3.6E-02	kg	market for transistor, wired, small size, through-hole mounting {GLO}	Ecoinvent v3.7
Wire drawing, copper	318.9E+00	kg	wire drawing, copper {RER}, processing	Ecoinvent v3.7
Electricity, medium voltage	4357.6E+00	kWh	market group for electricity, medium voltage {RER} with modified activity link to electricity, market for electricity [TR]	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
İnvertör	**1.00E+00**	**p**		
Used printed wiring boards	46.5E+00	kg	market for used printed wiring boards {GLO}	Ecoinvent v3.7
Waste mineral oil	20.3E+00	kg	market for waste mineral oil {CH}	Ecoinvent v3.7
Waste mineral oil	818.4E+00	kg	market for waste mineral oil {Europe without Switzerland}	Ecoinvent v3.7
Waste polyethylene	1.52E+00	kg	market for waste polyethylene {RER}	Ecoinvent v3.7
Waste polystyrene	1.52E+00	kg	market for waste polystyrene {RER}	Ecoinvent v3.7
waste paperboard, unsorted	3.60E-01	kg	market for waste paperboard, unsorted {CH}	Ecoinvent v3.7
waste paperboard, unsorted	12.6E+00	kg	market for waste paperboard, unsorted {Europe without Switzerland}	Ecoinvent v3.7
Waste plastic, industrial electronics	218.9E+00	kg	market for waste plastic, industrial electronics {CH}	Ecoinvent v3.7

Ek-3.2. Montaj yapısı üretim envanteri

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
Aluminium, wrought alloy	2.51E+00	kg	aluminium production, primary, ingot [IAI Area, EU27&EFTA]/ Aluminium production, primary, ingot [CN]	Ecoinvent v3.7
Corrugated board box	1.82E-02	kg	market for corrugated board box [RER]	Ecoinvent v3.7
Polyethylene, high density, granulate	1.92E+00	kg	market for polyethylene, high density, granulate [GLO]	Ecoinvent v3.7
Polyethylene, high impact	8.27E-03	kg	market for polyethylene, high impact [GLO]	Ecoinvent v3.7
Section bar extrusion, aluminium	1.22E+00	kg	market for section bar extrusion, aluminium [RER] with modified activity link to electricity, market for electricity [TR]	Ecoinvent v3.7
Sheet rolling, steel	2.66E-01	kg	sheet rolling, steel [RER] with modified activity link to electricity, market for electricity [TR]	Ecoinvent v3.7
Steel, low-alloyed, hot rolled	2.66E-01	kg	Steel production, low-alloyed, hot rolled [RER] with modified activity link to electricity, market for electricity [TR]	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
PV montaj sistemi, düz çatı	**1.00E+00**	**m^2**		
Waste paperboard, unsorted	1.77E-02	kg	market for waste paperboard, unsorted [Europe without Switzerland]	Ecoinvent v3.7
Waste polyethylene/polypropylene product	1.85E+00	kg	market for waste polyethylene/polypropylene product [Europe without Switzerland]	Ecoinvent v3.7
Waste polystyrene isolation, flame-retardant	8.03E-03	kg	waste polystyrene isolation, flame-retardant [Europe without Switzerland]	Ecoinvent v3.7

Ek-3.3. Elektrik tesisatı üretim envanteri (3kWp)

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
Brass	1.71E-02	kg	market for brass {RoW}	Ecoinvent v3.7
Copper, cathode	12.5E+00	kg	market for copper, cathode {GLO}	Ecoinvent v3.7
Epoxy resin, liquid	1.7E-03	kg	market for epoxy resin, liquid {RoW}	Ecoinvent v3.7
nylon 6	1.96E-01	kg	market for nylon 6 {RoW}	Ecoinvent v3.7
Polycarbonate	1.71E-01	kg	market for polycarbonate {GLO}	Ecoinvent v3.7
Polyethylene, high density, granulate	12.3E+00	kg	market for polyethylene, high density, granulate {GLO}	Ecoinvent v3.7
Polyvinylchloride, bulk polymerised	1.82E+00	kg	market for polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}	Ecoinvent v3.7
Steel, low-alloyed, hot rolled	7.34E-01	kg	market for steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}	Ecoinvent v3.7
Wire drawing, copper	12.5E+00	kg	market for wire drawing, copper {GLO}	Ecoinvent v3.7
Zinc	3.41E-02	kg	market for Zinc {GLO} market for	Ecoinvent v3.7
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
PV santrali, 3kWp modül için elektrik tesisatı	**1**	**p**		
Scrap copper	5.5E-03		scrap copper {Europe without Switzerland} | market for scrap copper	Ecoinvent v3.7
Scrap copper	1.2E-02		scrap copper {RoW}| market for scrap copper	Ecoinvent v3.7
Scrap steel	1.87E-01		scrap steel {Europe without Switzerland} | market for scrap steel	Ecoinvent v3.7
Scrap steel	5.81E-01		scrap steel {RoW}| market for scrap steel	Ecoinvent v3.7
Waste electric wiring	25.02E+00		waste electric wiring {RoW}| market for waste electric wiring	Ecoinvent v3.7
Waste polyethylene/polypropylene product	4.87E-02		waste polyethylene/polypropylene product {Europe without Switzerland} | market for waste polyethylene/polypropylene product	Ecoinvent v3.7
Waste polyethylene/polypropylene product	12.4E-02		waste polyethylene/polypropylene product {RoW}| market for waste polyethylene/polypropylene product	Ecoinvent v3.7
Waste polyvinylchloride	1.72E-01		waste polyvinylchloride {Europe without Switzerland} | market group for waste polyvinylchloride	Ecoinvent v3.7
Waste polyvinylchloride	1.42E+00		waste polyvinylchloride {RoW}| market for waste polyvinylchloride	Ecoinvent v3.7

Ek-4. Ulaşım

Ek-4.1. Çin'deki üretim noktasından kurulum sahasına ulaşım

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Mesafe (km)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	10867.5	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Şangay limanı)
Transport, freight, sea, transoceanic ship	1630125	tkm	market for transport, freight, sea, transoceanic ship [GLO]	15.000 km (Şangay limanı-Kocaeli limanı)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	10867.5	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]	100 km (Kocaeli limanı-Kurulum sahası)
Çıktı	Miktar	Birim		
PV modül ulaşımı, Çin'den kurulum sahasına	**1**	**p**		

Ek-4.2. Sistem dengesi bileşenlerinin üretim noktasından kurulum sahasına ulaşımı

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Mesafe (km)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	7.2E+02	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Kurulum sahasına) (İnvertör)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	30.1875	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Kurulum sahasına) (Montaj yapısı)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	-	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Kurulum sahasına) (Elektrik tesisatı)
Çıktı	Miktar	Birim		
Sistem dengesi bileşenleri Gebze'den kurulum sahasına	**1**	**p**		

Ek-4.3. Avrupa'daki üretim noktasından kurulum sahasına ulaşım

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Mesafe (km)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	10867.5	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Husum limanı)
Transport, freight, sea, transoceanic ship	690086.25	tkm	market for transport, freight, sea, transoceanic ship [GLO]	6350 km (Husum limanı-Kocaeli limanı)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	10867.5	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]	100 km (Kocaeli limanı-Kurulum sahası)
Çıktı	Miktar	Birim		
PV modül ulaşımı, Avrupa'dan kurulum sahasına	**1**	**p**		

Ek-4.4.Türkiye'deki üretim noktasından kurulum sahasına ulaşım

Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Mesafe (km)
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	10867.5	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	100 km (Fabrika-Kurulum sahasına)
Çıktı	Miktar	Birim		
PV modül ulaşımı, Türkiye'den kurulum sahasına	**1**	**p**		

Ek-5. Kullanım ömrü sonu

Ek-5.1. Cam-arka tabaka modüllerinin kullanım ömrü sonu aşaması için envanter verileri (Müller ve diğ., 2021; IEA PVPS, 2020)

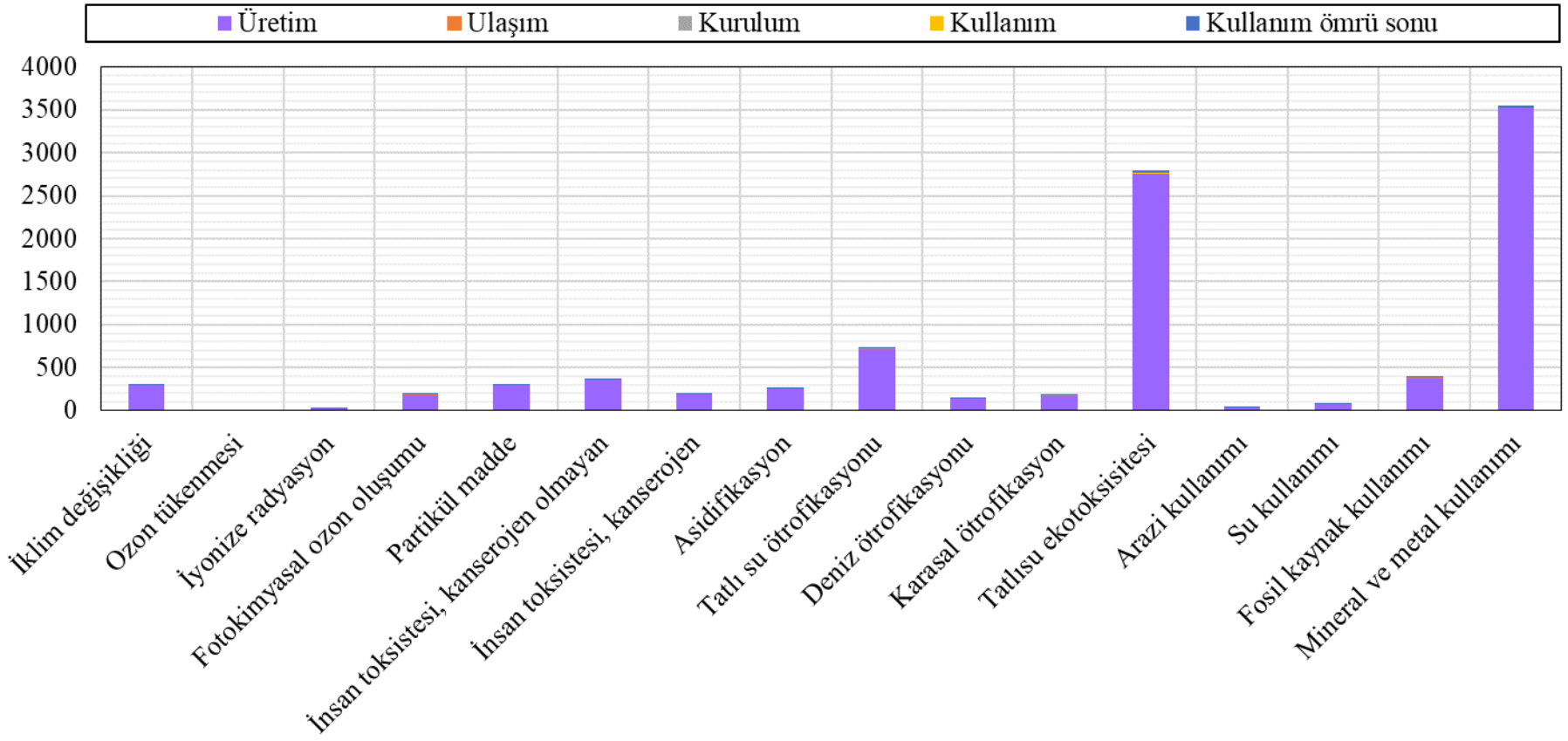
Girdi	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
diesel, burned in building machine	6.48E-02	MJ	diesel, burned in building machine, processing [GLO]	IEA PVPS 2020
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5	0.1	tkm	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 [RER]	IEA PVPS 2020 transport distance to collection point: 100 km
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	0.4	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]	IEA PVPS 2020 transport distance to recycling site: 400 km
electricity	1.11E-01	kWh	market for electricity [TR], medium voltage	IEA PVPS 2020
copper, secondary, at refinery: treatment of used cable	6.61E-03	kg	treatment of used cable, copper [GLO]	IEA PVPS 2020, Secondary copper production
aluminium, secondary, from old scrap	5.62E-02	kg	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter [RER]	IEA PVPS 20, Secondary aluminium production
Çıktı	Miktar	Birim	Süreç bağlantısı	Kaynak
Cam-arka tabaka mono-Si modülünün geri dönüşümü	**1**	**kg**		
Heat, natural gas	-8.30E-01	MJ	heat, district or industrial, natural gas [Europe without Switzerland]	IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
heat, heavy fuel oil	-5.38E-01	MJ	heat, district or industrial, other than natural gas [Europe without Switzerland]	IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
silica sand, at plant	-3.50E-01	kg	production silica sand [DE]	IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
soda ash, light crystalline heptahydrate, market	-1.38E-01	kg	soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate [RER]	IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
limestone, milled, packed, at plant	-2.42E-01	kg	market for lime, packed [CH]	IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
unspecified carbon dioxide, fossil	-1.26E-01	kg		IEA PVPS 2020, Avoided primary glass production
copper, at regional storage, primary production	-6.61E-03	kg	copper production, primary [RER]	IEA PVPS 2020, Avoided primary copper production
aluminium, primary, at plant	-5.62E-02	kg	aluminium, primary production, ingot [IAI Area, EU27 & EFTA]	IEA PVPS 2020, Avoided primary aluminium production
waste plastic, mixture for municipal incineration	1.51E-01	kg	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration [CH]	IEA PVPS 2020
waste plastic, mixture for sanitary landfill	2.64E-02	kg	treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill [CH]	IEA PVPS 2020

Ek-6. Bulgular

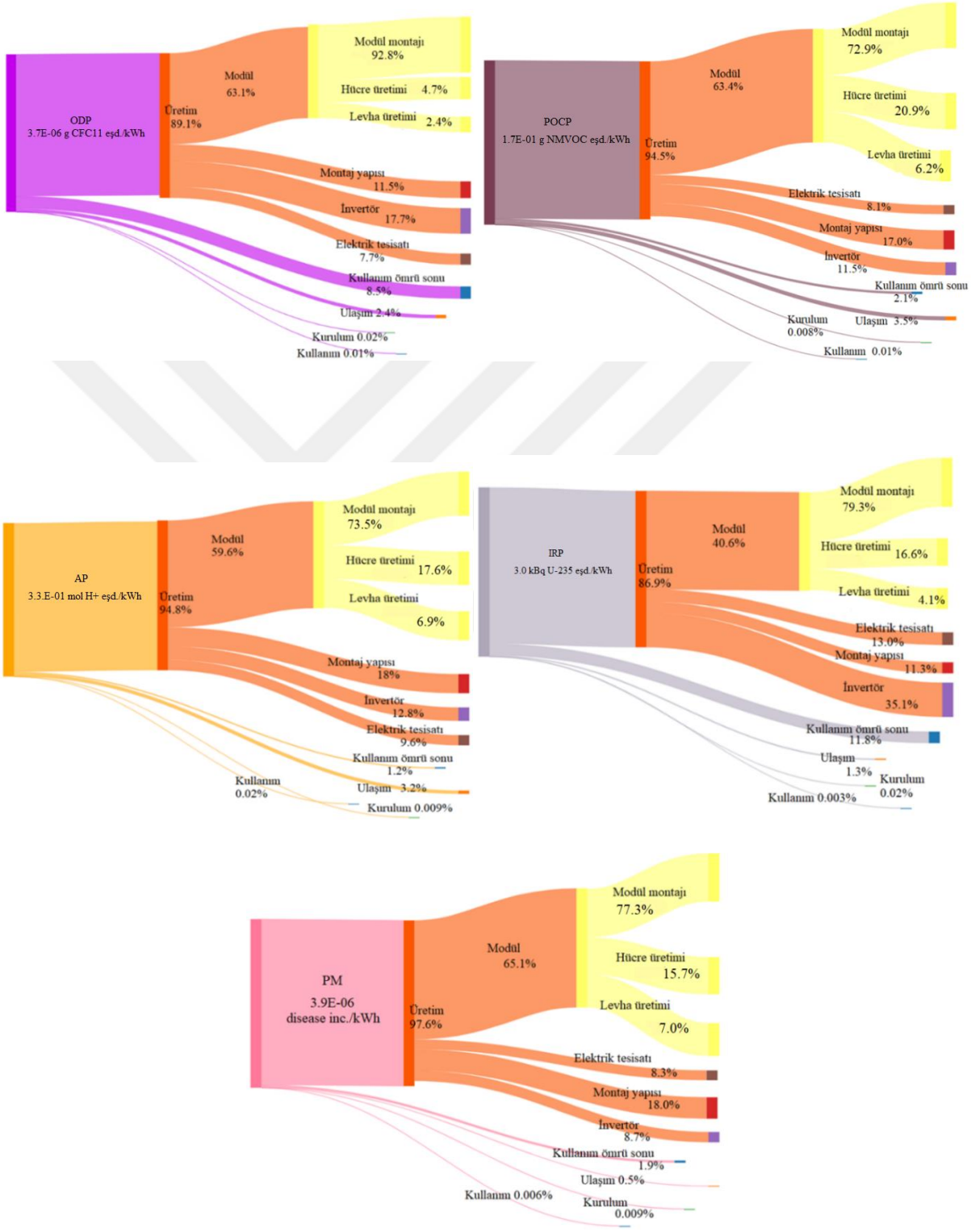
Ek-6.1.Aşamalara göre ölçülen her bir çevresel etkinin karakterizasyon sonuçları, kWh

Çevresel etki kategorisi	Kısaltma	Birim	YDD Aşamaları					Toplam
			Üretim	Ulaşım	Kurulum	Kullanım	Kullanım ömrü sonu	
İklim değişikliği	GWP	g CO_2 eşd.	53.3	0.48	0.0047	0.0088	1.33	55.1
Ozon tükenmesi	ODP	g CFC11 eşd.	3.3E-06	8.9E-08	7.8E-10	2.7E-10	3.2E-07	3.7E-06
İyonize radyasyon	IRP	kBq U-235 eşd.	2.61	0.038	0.000698	8.1E-05	0.35	3.00
Fotokimyasal ozon oluşumu	POCP	g NMVOC eşd.	0.162	0.0059	1.4E-05	2.1E-05	0.0035	0.17
Partikül madde	PM	disease inc.	3.8E-06	1.9E-08	3.5E-10	2.4E-10	7.3E-08	3.9E-06
İnsan toksisitesi. kanserojen olmayan	HTP-kanser olmayan	CTUh	1.8E-06	3.4E-09	2.7E-10	6.7E-11	4.6E-08	1.9E-06
İnsan toksisitesi. kanserojen	HTP-kanser	CTUh	7.4E-08	1.8E-10	1.5E-11	1.6E-12	1.7E-09	7.6E-08
Asidifikasyon	AP	mol H^+ eşd.	0.31	0.011	2.9E-05	5.4E-05	0.0065	0.33
Tatlı su ötrofikasyonu	FEP	g P eşd.	0.026	5.1E-05	4.3E-06	8.6E-06	0.00042	0.03
Deniz ötrofikasyonu	MEP	g N eşd.	0.061	0.0022	4.8E-05	9.1E-06	0.0020	0.06
Karasal ötrofikasyon	TEP	mol N eşd.	0.67	0.024	6.4E-05	8.1E-05	0.0142	0.71
Tatlısu ekotoksisitesi	FETP	CTUe	2608.0	4.6	0.6	0.092	36.5	2649.9
Arazi kullanımı	LU	Pt	587.9	2.25	0.0329	0.0251	125.12	715.3
Su kullanımı	WU	m^3 depriv.	17.5	0.02	0.097	0.0035	0.53	18.2
Fosil kaynak kullanımı	ADP-fosil	MJ	546.1	6.4	0.06	0.10	17.6	570.2
Mineral ve metal kullanımı	ADP-nihai	g Sb eşd.	0.0050	4.8E-07	2.94E-08	1.2E-08	2.7E-05	0.0050

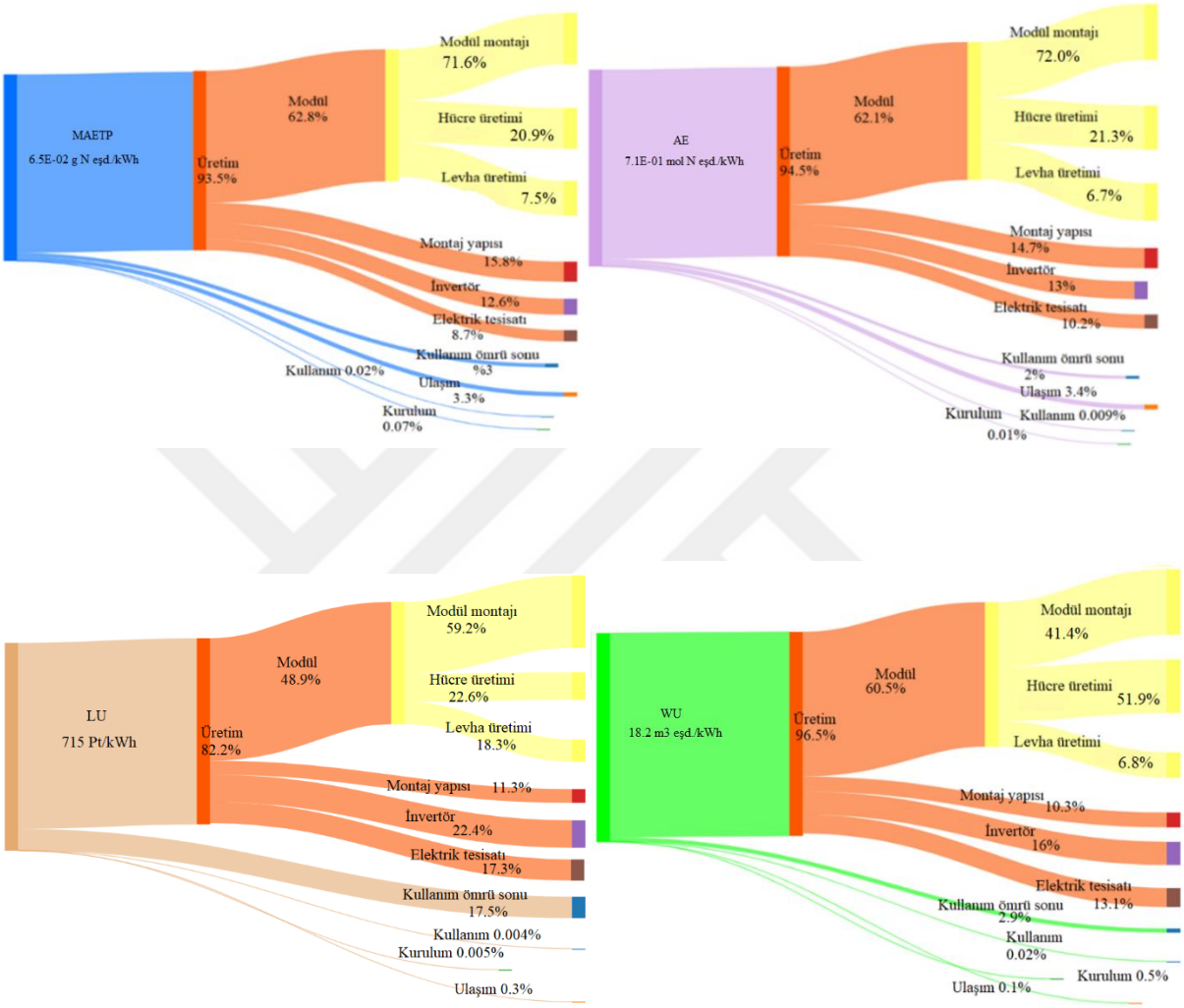
Ek-6.2. Beş ana aşamaya göre normalizasyon sonuçları



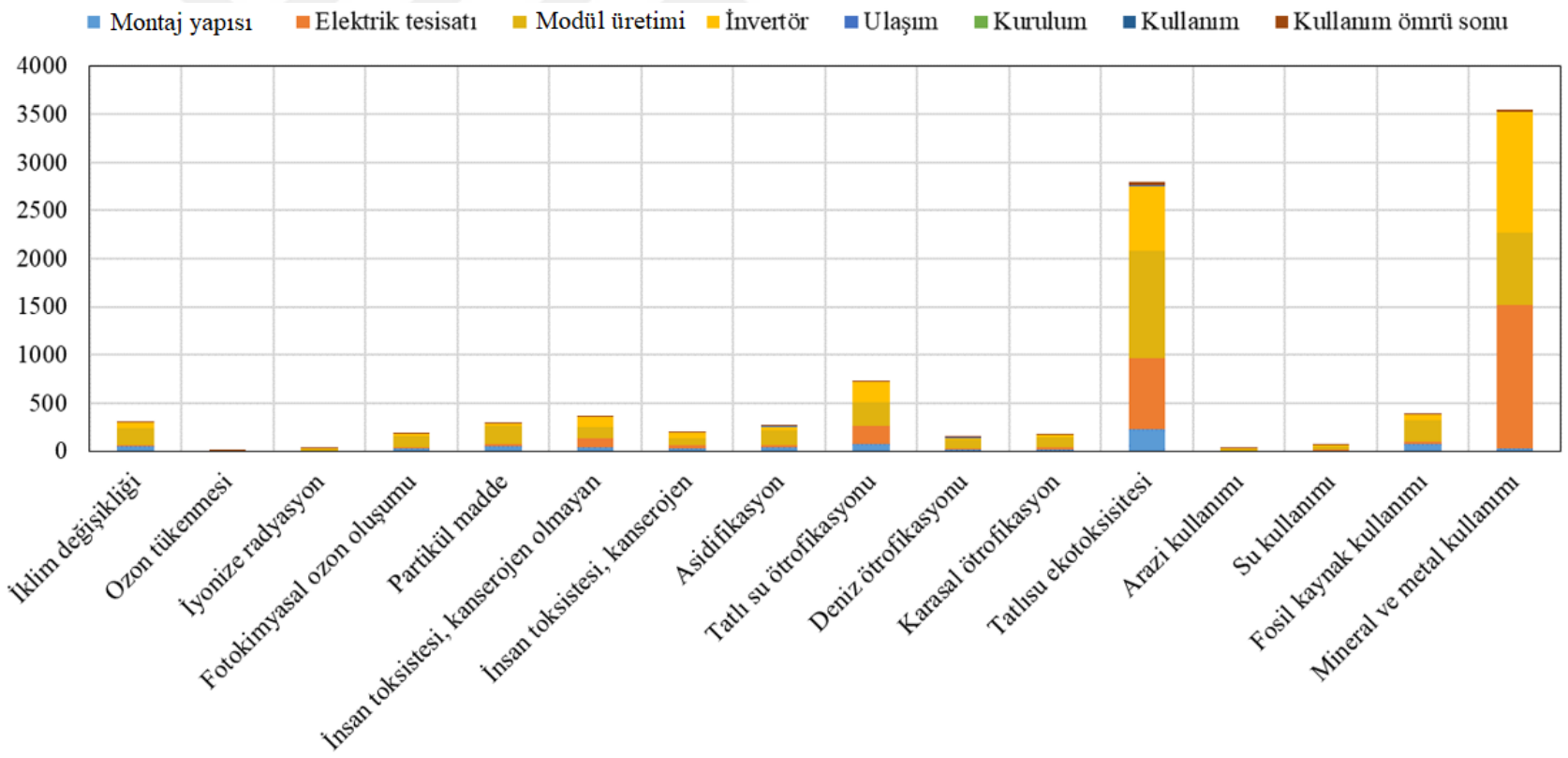
Ek-6.3. ODP, POCP, AP, IRP ve PM etki kategorilerinin her birine ait Sankey diyagramları ve sıcak noktalarının ayrıştırılması



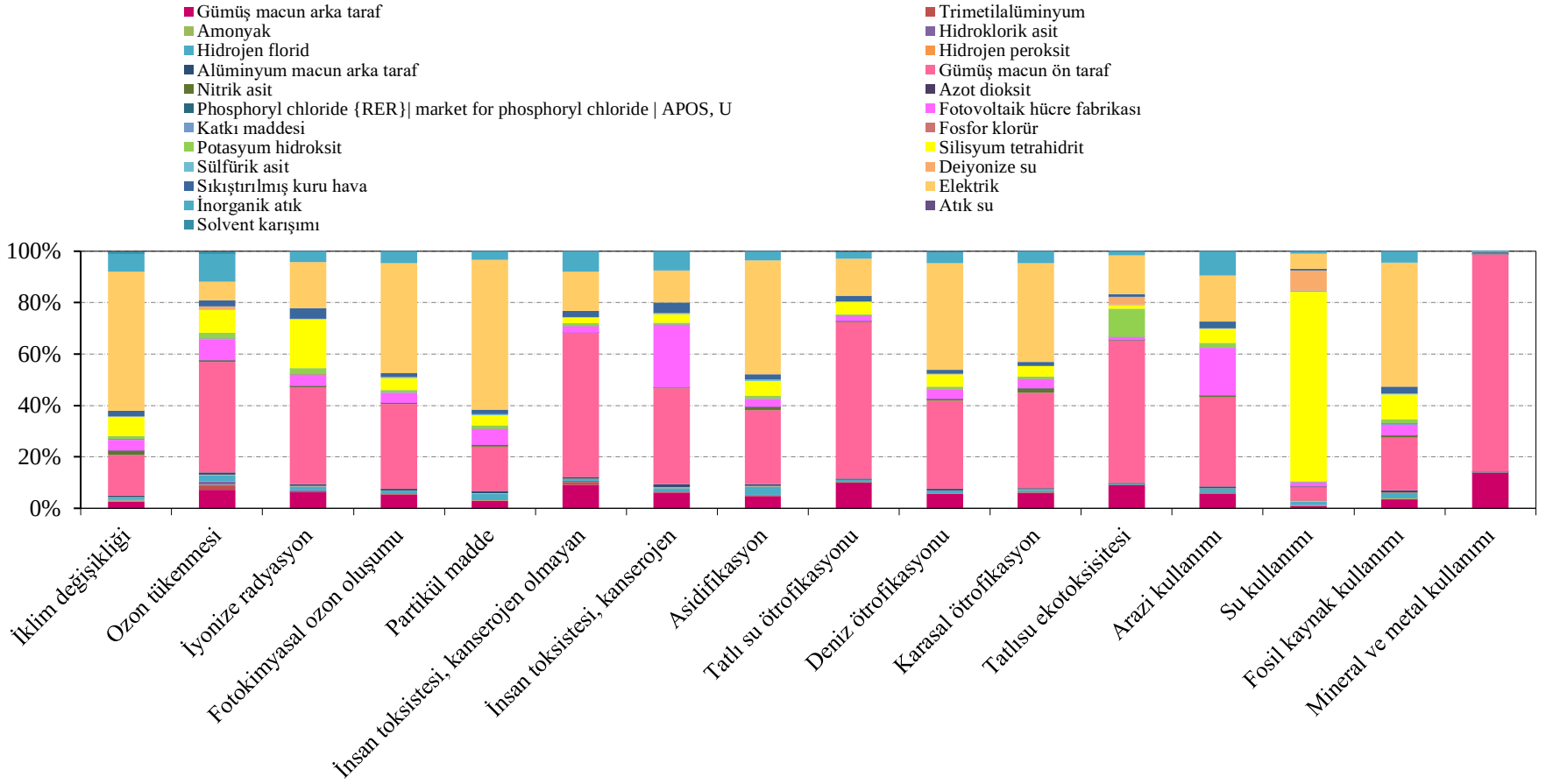
Ek-6.4. MAETP, AE, LU ve WU etki kategorilerinin her birine ait Sankey diyagramları ve sıcak noktalarının ayrıştırılması



Ek-6.5. Üretim aşamasına göre normalizasyon sonuçları



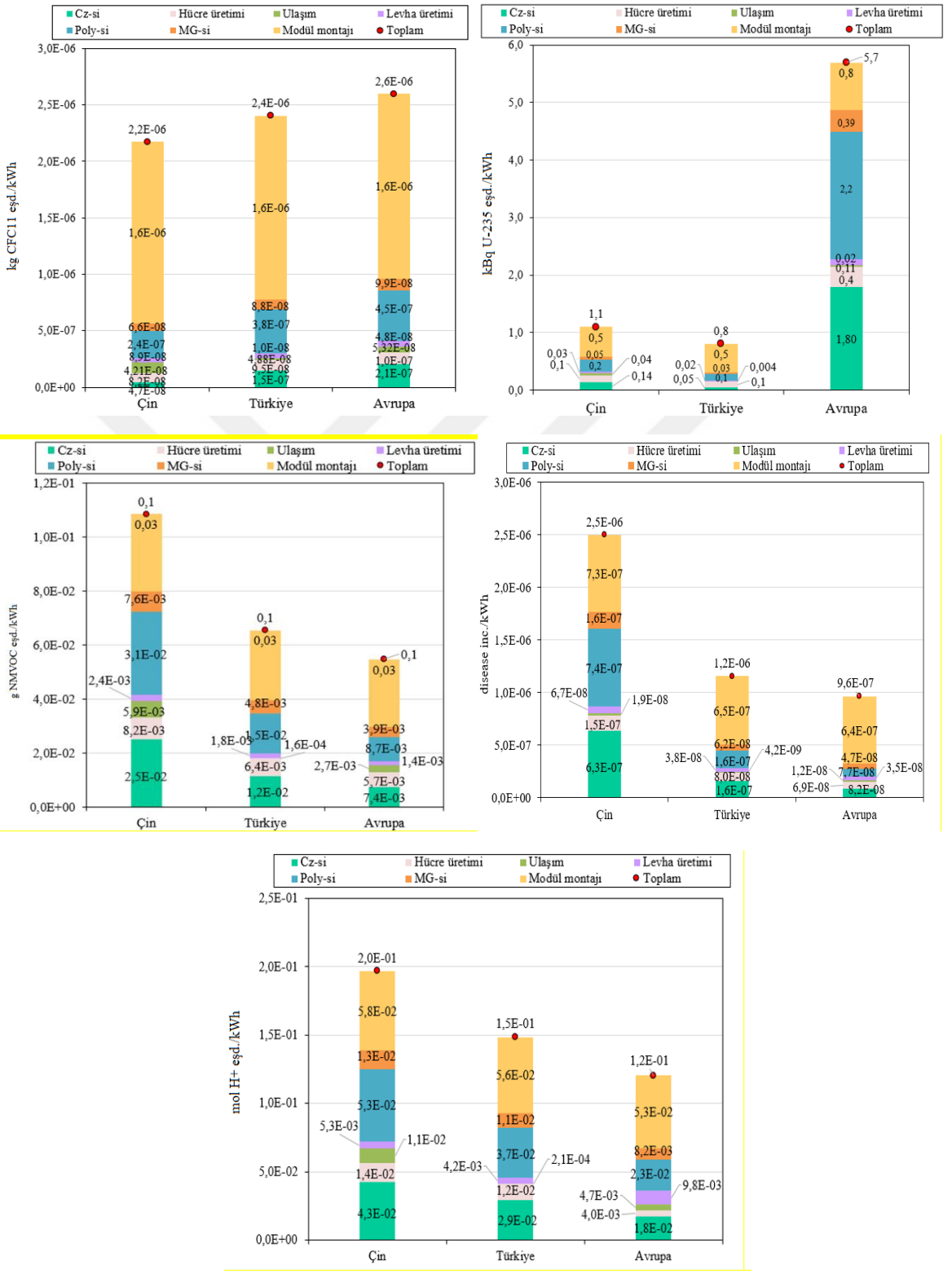
Ek-6.6. Hücre üretim aşamasının her bir çevre etki kategorisine olan yüzdesel katkısı



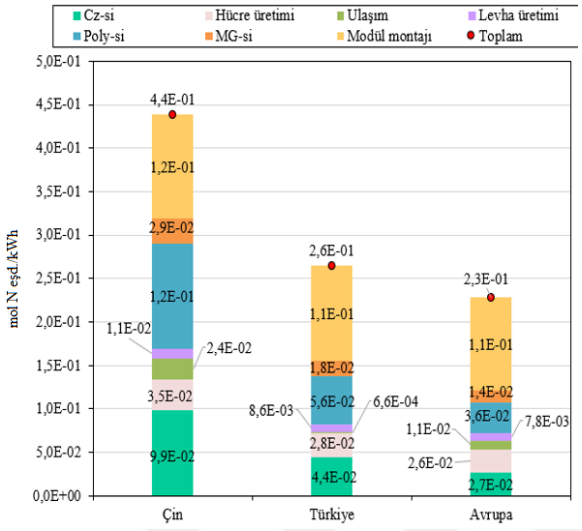
Ek-6.7. İnvertör, montaj yapısı ve elektrik tesisatı üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin karakterizasyon sonuçları

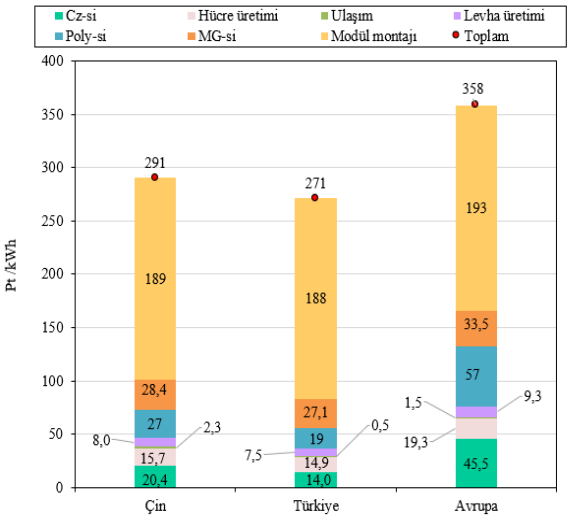
Etki kategorisi	Birim	İnvertör	Montaj yapısı	Elektrik tesisatı
GWP	g CO_2 eşd.	8.73E+0	9.68E+0	2.29E+0
ODP	g CFC11 eşd.	5.83E-07	3.81E-07	2.54E-07
IRP	kBq U-235 eşd.	9.2E-01	2.9E-01	3.4E-01
POCP	g NMVOC eşd.	1.92E-02	2.7E-02	1.3E-02
PM	disease inc.	3.32E-07	6.91E-07	3.17E-07
HTP-kanser olmayan	CTUh	5.64E-07	1.94E-07	5.09E-07
HTP-kanser	CTUh	2.42E-08	1.23E-08	1.32E-08
AP	mol H^+ eşd.	4.0E-02	5.6E-02	3.0E-02
FEP	g P eşd.	7.4E-03	2.8E-03	6.8E-03
MEP	g N eşd.	7.7E-03	9.6E-03	5.3E-03
TEP	mol N eşd.	8.7E-02	9.8E-02	6.8E-02
FETP	CTUe	640	220	698
LU	Pt	132	67	102
WU	m^3 depriv.	2.8E+0	1.8E+0	2.3E+0
ADP-fosil	MJ	75	107	34.6
ADP-nihai	g Sb eşd.	1.8E-03	5.2E-05	2.1E-03

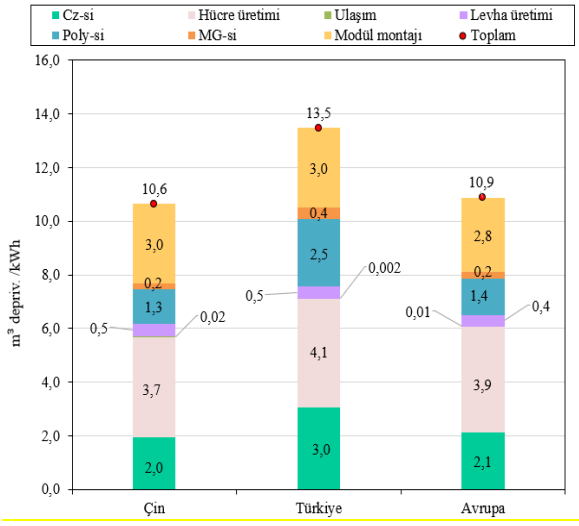
Ek-6.8. Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için ODP, POCP, IRP, PM ve AP sonuçları

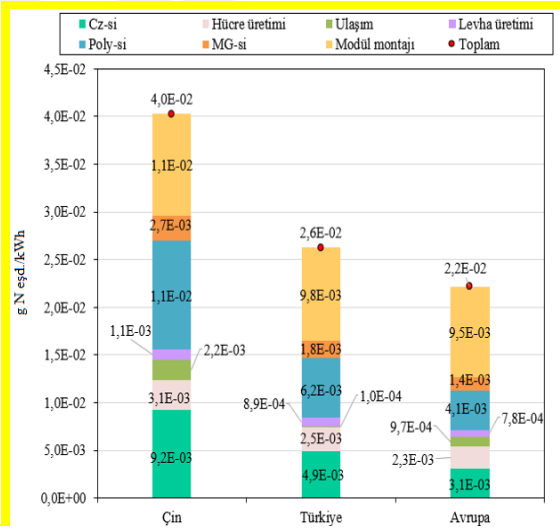


Ek-6.9. Çin, Türkiye ve AB'de üretilen PERC modül üretimi için MEP, TEP, LU ve WU sonuçları

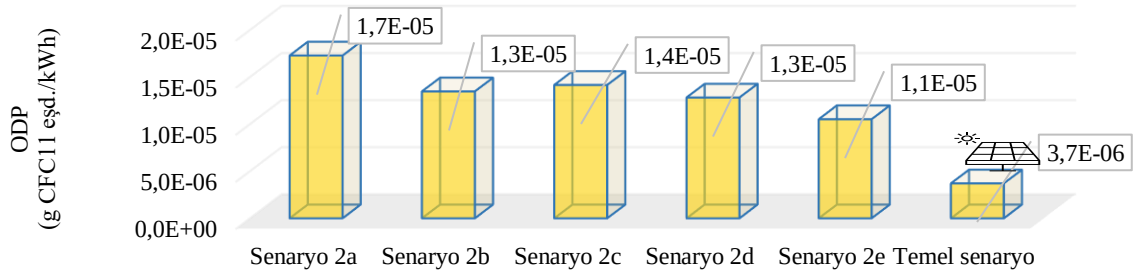


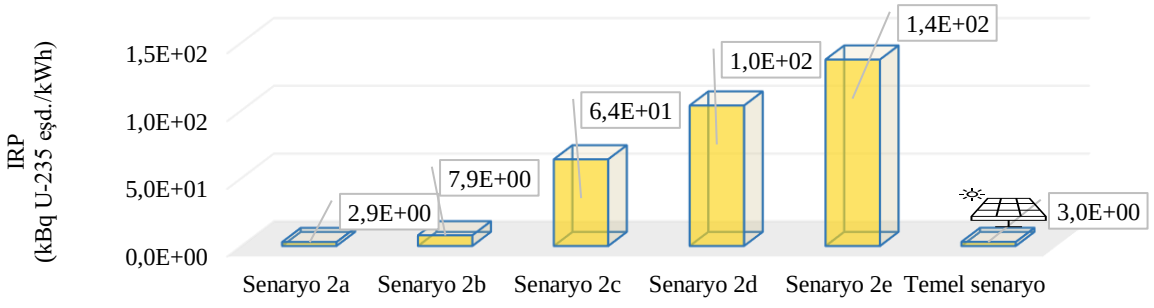


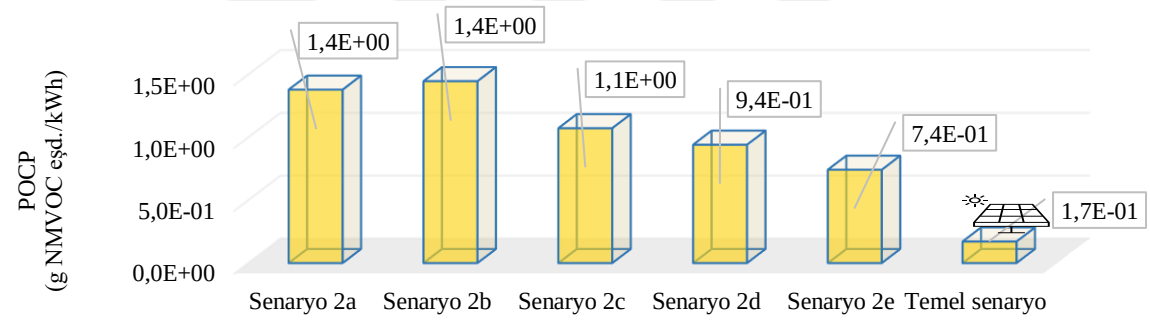


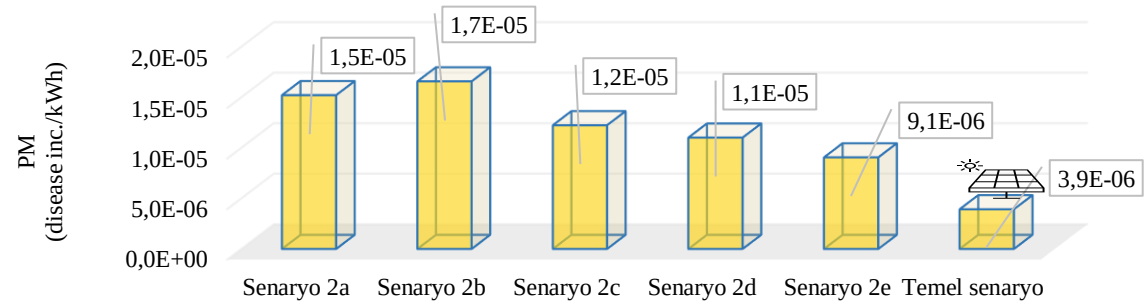


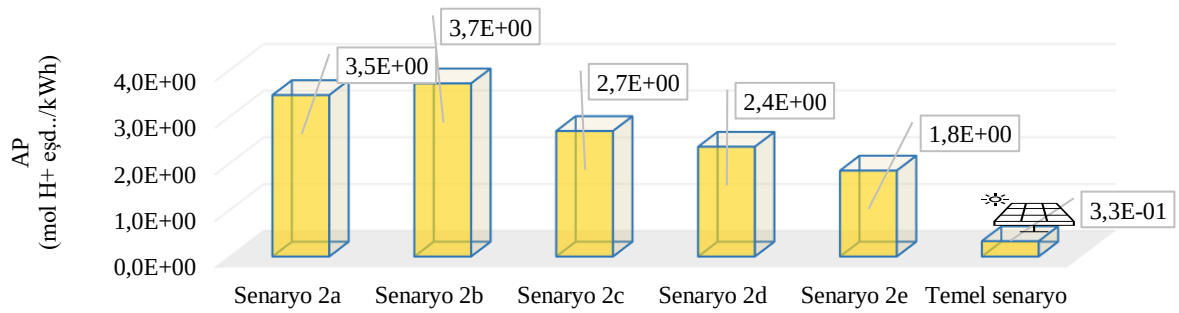
Ek-6.10. ODP, IRP, POCP, PM ve AP etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması



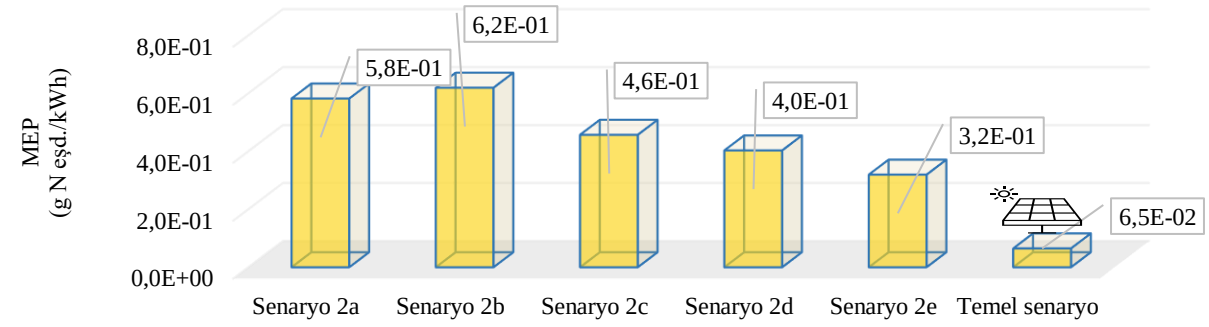


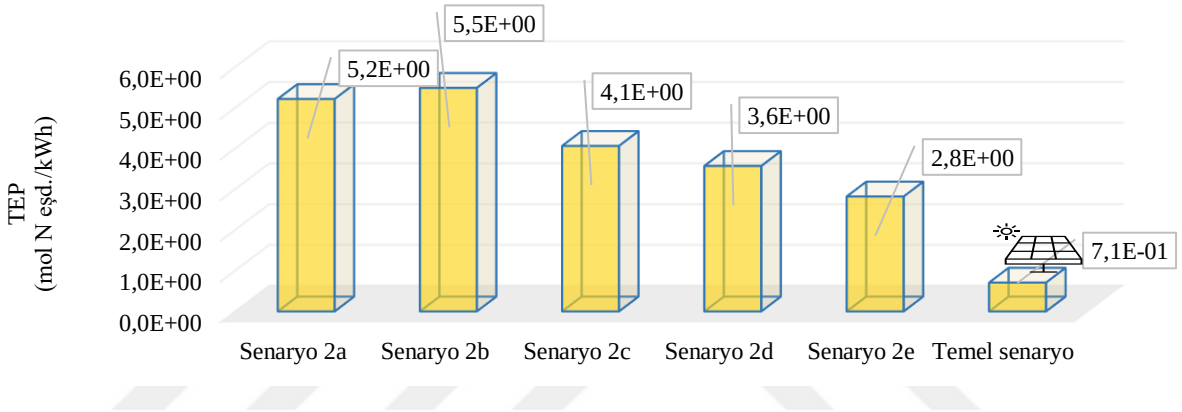


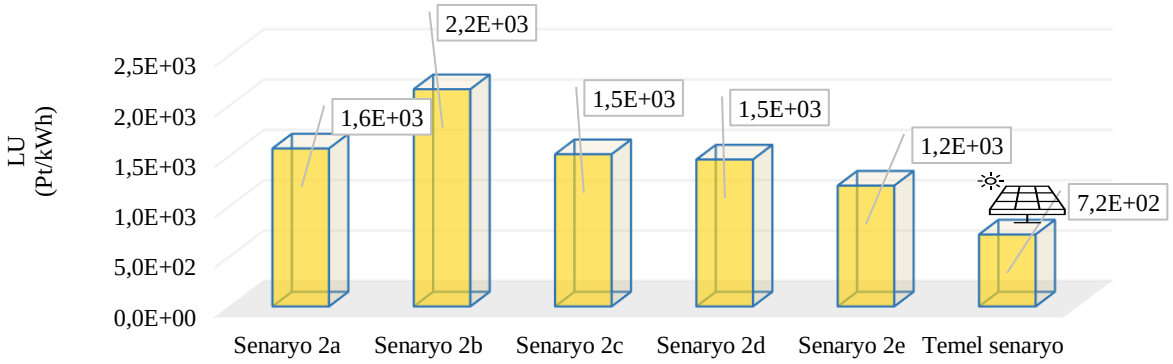


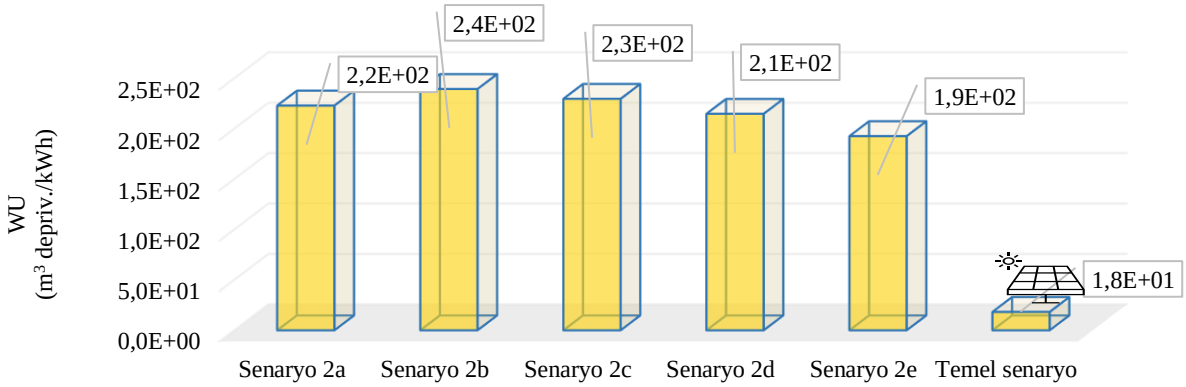


Ek-6.11. MEP, TEP, LU ve WU etkisinin şebeke elektriği ile karşılaştırılması

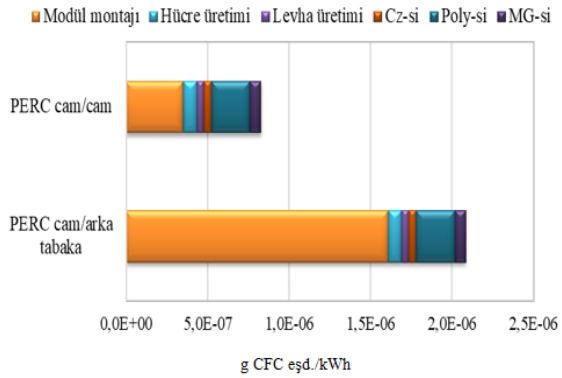


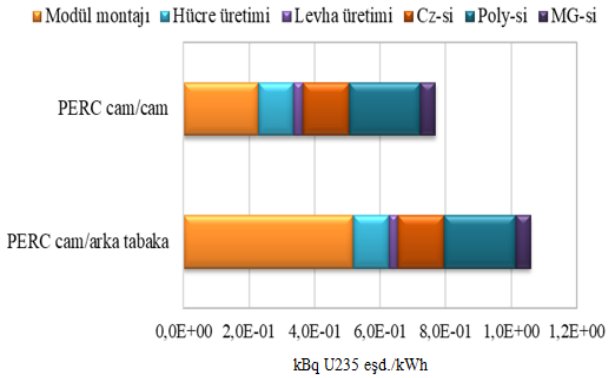


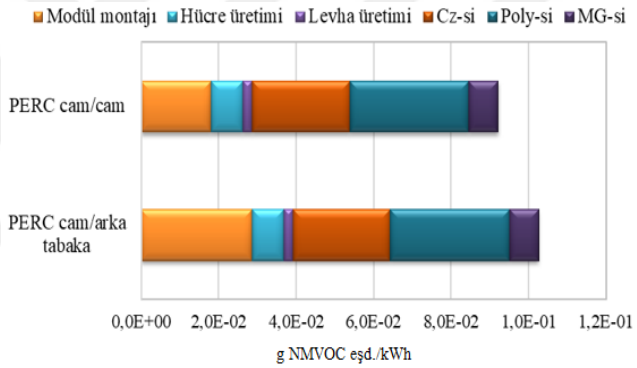


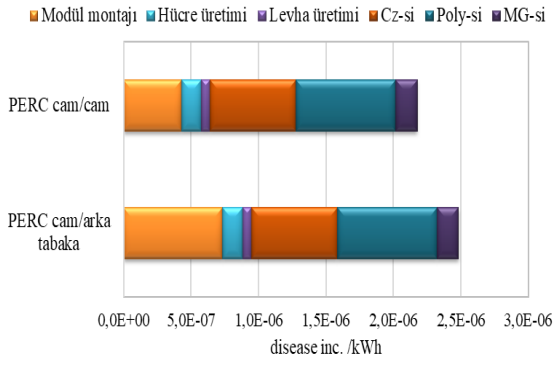


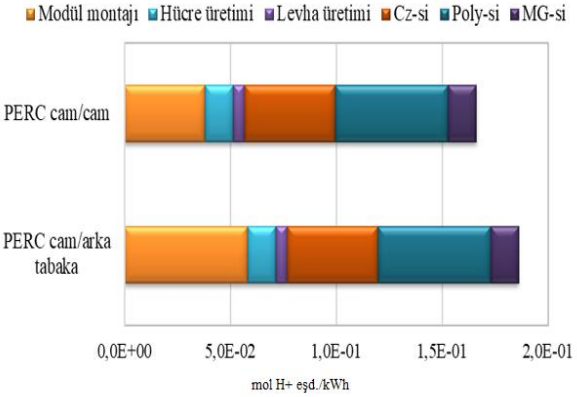
Ek-6.12. İki farklı PERC modül tasarımının farklı aşamaları için ODP, IRP, POCP, PM ve AP etki sonuçları



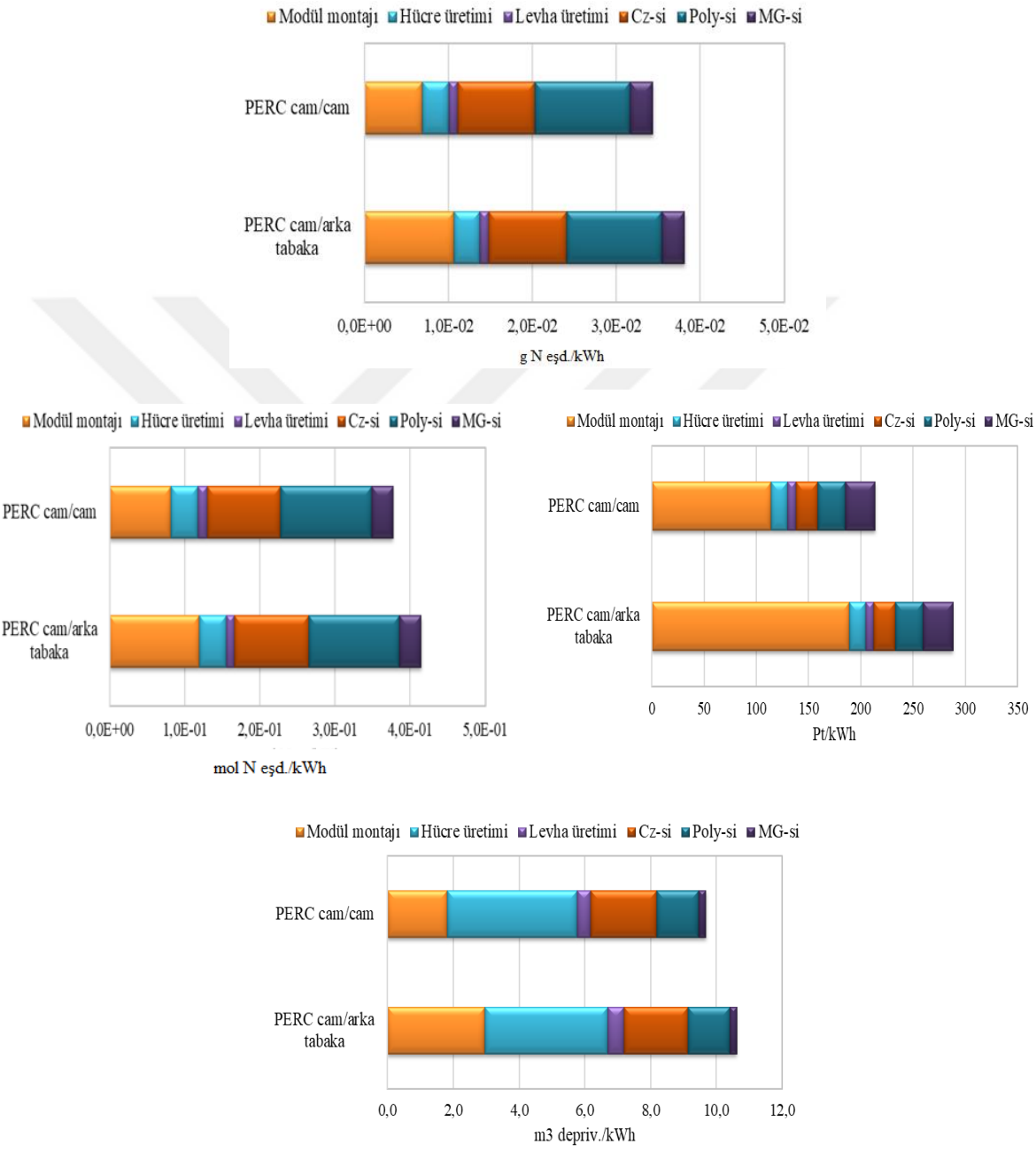




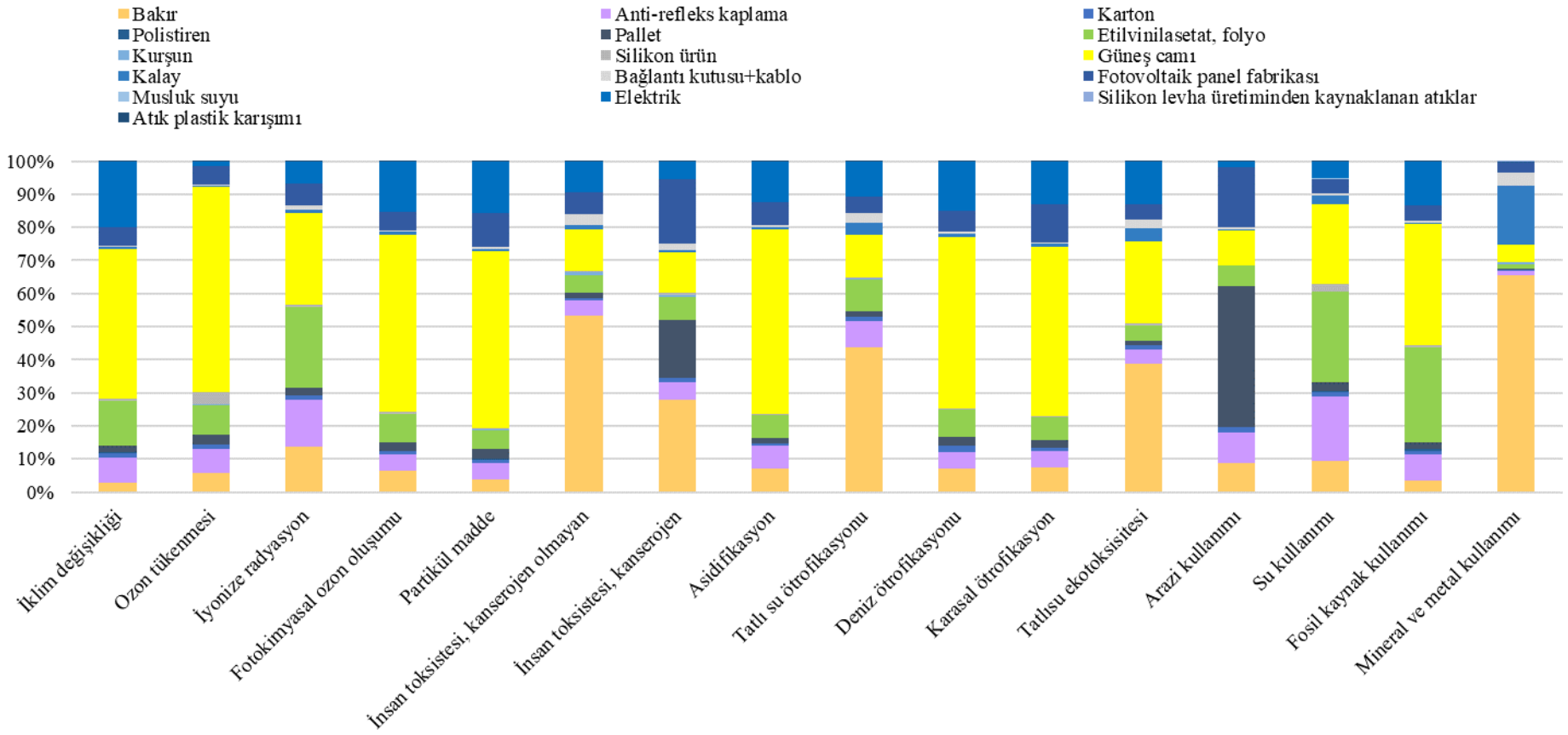




Ek-6.13. İki farklı PERC modül tasarımının farklı aşamaları için MEP, TEP, LU ve WU etki sonuçları



Ek-6.14. Çift cam PERC modül montaj aşamasının her bir etki kategorisine olan yüzde katkılar



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

2602170156-Burcu UZUN

ORİJİNALLİK RAPORU

%11	%10	%8	%8
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
2	core.ac.uk İnternet Kaynağı	<%1
3	Submitted to Leiden University Öğrenci Ödevi	<%1
4	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	coek.info İnternet Kaynağı	<%1
6	bibliotecatede.uninove.br İnternet Kaynağı	<%1
7	iea-pvps.org İnternet Kaynağı	<%1
8	Submitted to Waterford Institute of Technology Öğrenci Ödevi	<%1
9	repository.tudelft.nl	

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Burcu UZUN AYVAZ

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Burcu UZUN AYVAZ